

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ (КТ) ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК И ДЕТАЛЕЙ

МИХАИЛ ЗВЕРЕВ, ГЛАВНЫЙ СПЕЦИАЛИСТ ОТДЕЛА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА НАПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ЗАО ПРЕДПРИЯТИЕ ОСТЕК, LINES@OSTEC-GROUP.RU

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ ПЕРЕЖИВАЕТ ОЧЕРЕДНОЙ ВИТОК РАЗВИТИЯ. ОТКРЫТЫЕ БОЛЕЕ ВЕКА НАЗАД РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ ПОЧТИ НЕМЕДЛЕННО СТАЛИ ПРИМЕНЯТЬСЯ ДЛЯ НУЖД ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

Однако, в течение десятков лет рентгеноскопия не претерпевала принципиальных изменений. Росли мощности рентгеновских установок, уменьшались минимальные размеры обнаруживаемых неоднородностей. Но принцип рентгеноскопии оставался един: получение плоских проекций образца под каким-либо углом.

Не нужно иметь специального образования, чтобы понять, что объёмное изображение объекта гораздо информативнее набора плоских проекций. Однако способности существовавшей вычислительной техники не позволяли «сшивать» полученные отдельные проекции и получать полноценную 3D модель образца. Бурное развитие вычислительной техники позволило развиваться следующему поколению рентгеновских установок – рентгеновских томографов.

Как и обычные рентгеновские аппараты, компьютерный томограф изначально служил рабочим средством технолога. Скорость получения 3D моделей была недостаточна для внедрения 100%-го томографического контроля в серийном производстве. 100%-й контроль применялся только при производстве особо ответственных деталей и механизмов. Как пока-

зывает практика, производство таких изделий чрезвычайно редко бывает серийным, и почти никогда не бывает массовым. В данной статье сделана попытка проанализировать современное состояние томографической инспекции в процессе изготовления металлических деталей.

Для минимизации потерь и затрат на переработку в ходе промышленного производства, методы неразрушающего контроля должны использоваться как можно ближе к местам потенциального возникновения дефектов. В настоящее время для определения качества литья широко применяются высокоскоростные системы двухмерного рентгеновского контроля с программным обеспечением (ПО) для автоматического обнаружения дефектов (рис. 1).

Промышленная рентгеновская компьютерная томография (КТ) позволя-

ет локализовывать и измерять в трёх координатах даже такие малоконтрастные дефекты в литых деталях, как трещины, пустоты и раковины. Анализ дефектов может выполняться как по нескольким секущим плоскостям, так и по объёмному изображению. Возможность построения полного объёмного изображения означает, что КТ может использоваться для неразрушающего объёмного измерения литых деталей, которое невозможно выполнить с помощью обычных координатно-измерительных систем из-за сложной формы этих деталей или наличия внутренних полостей сложной формы. Помимо неразрушающего контроля качества, КТ может применяться для решения множества других практических задач. Например, для оптимизации и уменьшения времени разработки, сравнения реальных деталей с их САД-моделями и построения трёхмерных САД-моделей по объёмному изображению деталей – так называемое «обратное проектирование» (рис. 2). Полная автоматизация измерений и анализа позволяет менее чем

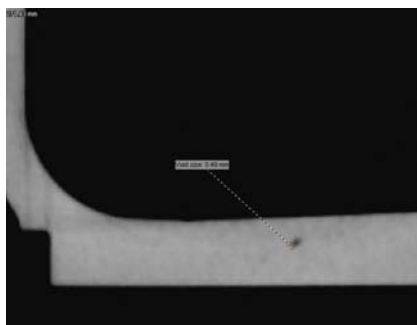


РИС. 1. РАБОТА ПО ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И ИЗМЕРЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ. ОБНАРУЖЕНИЕ ПУСТОТЫ В ГОЛОВКЕ ЦИЛИНДРОВ НА УСТАНОВКЕ ВИТОМЕХ L 300.

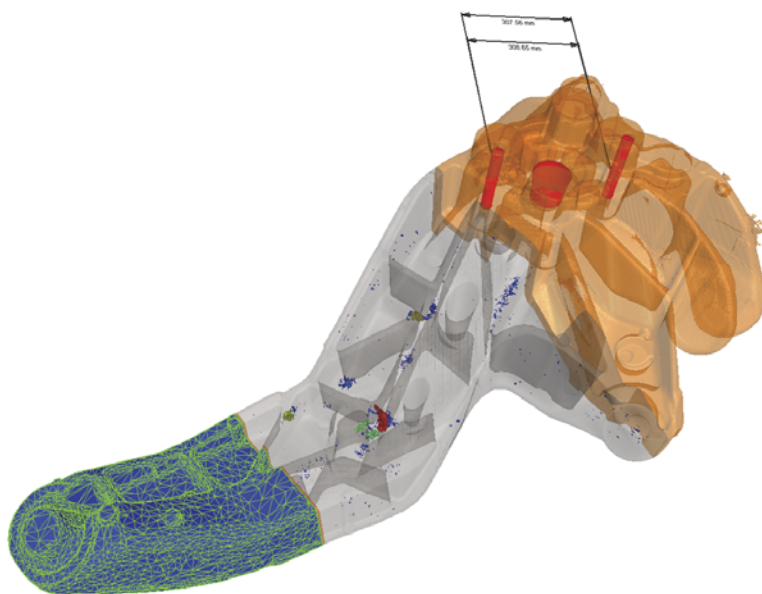


РИС. 2. ОБЪЁМНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ, ГЕНЕРАЦИЯ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО РЫЧАГА УПРАВЛЕНИЯ.

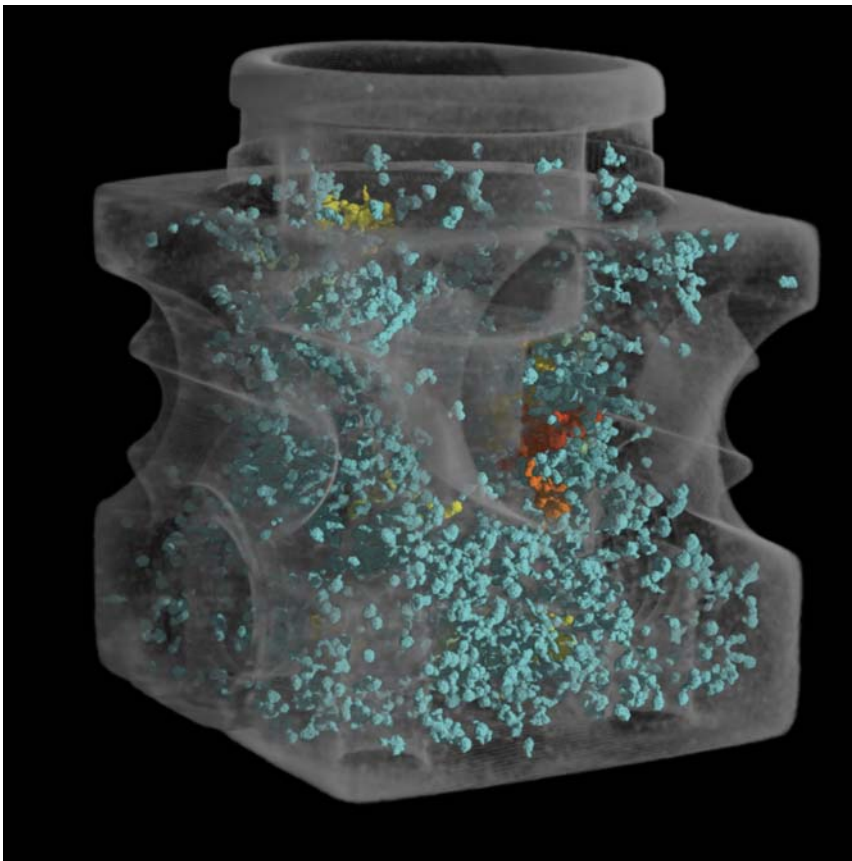


РИС. 3. АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ ПОЗВОЛЯЕТ НАБЛЮДАТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПУСТОТ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА НА ИЗОБРАЖЕНИИ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ.

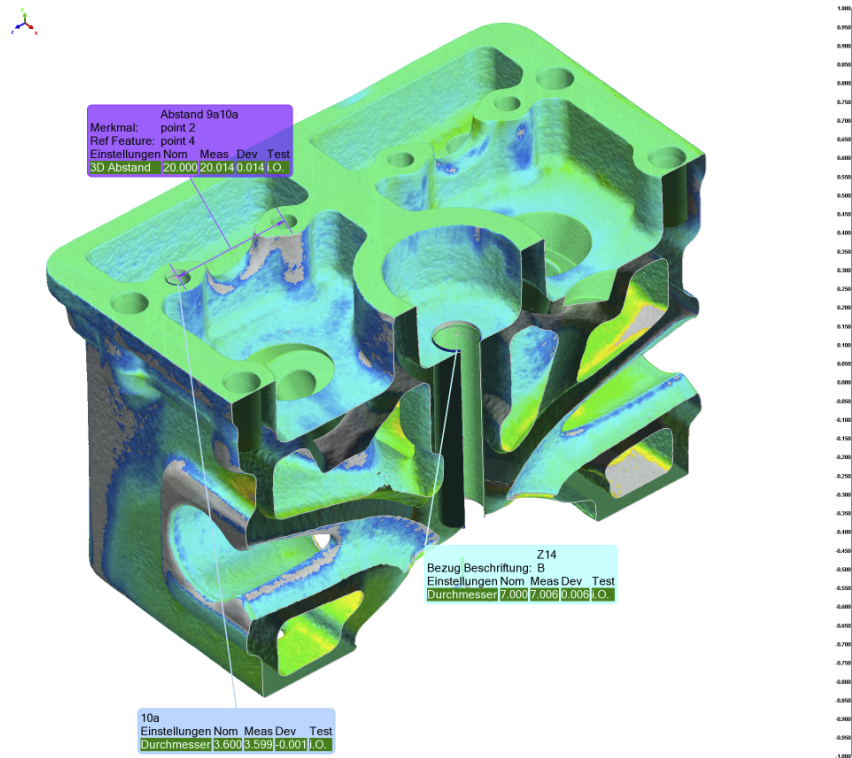


РИС. 4. ИЗОБРАЖЕНИЕ В ИСКУССТВЕННЫХ ЦВЕТАХ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИ САПР. ПО ЭТОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ МОЖНО БЫСТРО ОЦЕНИТЬ КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЛОКА КЛАПАНОВ.

за один час получать первые отчёты о поверхности образцов, даже имеющих сложную форму.

Неразрушающий объемный анализ

В последние годы разрешение и скорость построения моделей в промышленной КТ значительно увеличились. Технология реконструкции изображений с использованием графических процессоров позволяет отображать результаты КТ за несколько минут.

Возможность полного объемного сканирования образцов и получения сечений в любых плоскостях открывает новые возможности анализа и экономии времени при проведении контроля качества в промышленных условиях. Например, автоматический анализ пористости (рис. 3) позволяет вывести размеры включений в таблицу или показать их различными цветами на изображении образца, давая возможность оценить качество или стабильность параметров технологического процесса литья. Его также можно использовать для контроля правильности сборки узлов или определения положения литых деталей после плоскостного рентгеновского контроля, не позволяющего принять окончательное решение.

Линейные измерения с помощью КТ высокого разрешения

Контроль литых деталей из пластика или лёгких сплавов с большим количеством внутренних поверхностей часто невозможен неразрушающими методами и требует длительного времени. Возможность получения очень точного объемного изображения открывает КТ для этой области применения, позволяет использовать её и для координатных измерений. В отличие от обычных контактных или оптических измерительных систем, КТ позволяет также измерять все скрытые поверхности деталей, включая полости и углубления.

Кроме того, в результате сканирования образца с помощью КТ получается большое количество точек измерения (порядка 105-106), что позволяет с помощью статистических методов получить разрешение измерений значительно выше 1/10 вокселя (воксель - объёмный пиксель). В зависимости от размеров объекта измерений, это разрешение может соответствовать единицам микрон.

На рис. 4 для примера показано сопоставление отклонений реального образца и его модели САПР. Резуль-

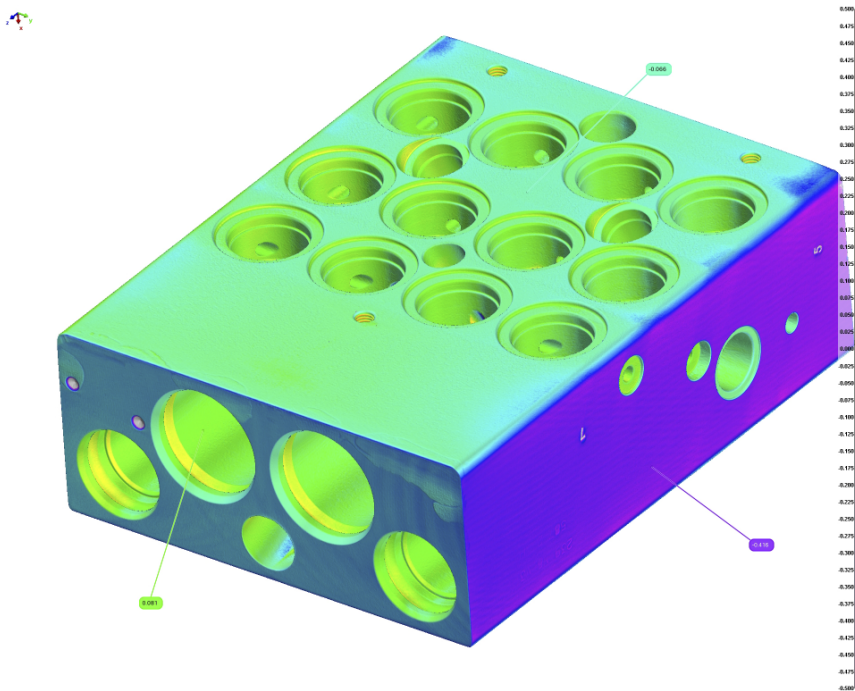


РИС. 5. ОЦЕНКА ТРЕХ ПАРАМЕТРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СКАНИРОВАНИЯ ГОЛОВКИ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ.

СИСТЕМЫ КТ СЕРИИ PHOENIX |X-RAY КОМПАНИИ GE SENSING & INSPECTION TECHNOLOGIES СОДЕРЖАТ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ОБЪЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ. ЭТИ СИСТЕМЫ ТАКЖЕ СОДЕРЖАТ ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДАННЫХ, ВКЛЮЧАЯ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ, ВЫЧИСЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И ДОПУСКОВ ПО СТАНДАРТАМ DIN/ISO И ПОЛНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОТЧЕТОВ ОБ ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦАХ.

таты измерений можно использовать для оперативной коррекции технологического процесса и оптимизации серийного производства.

Точность результатов измерений (проекция КТ) определяет точность всех последующих преобразований. Помимо надёжной структуры измерительной системы, оптимизированной для решения конкретных задач, залогом успешной КТ являются алгоритмы обработки данных. Для получения оптимальных результатов, алгоритм генерации модели, обрабатывающий пространственные данные, должен учитывать неизбежные дефекты КТ, такие как увеличение жесткости пучка. Системы КТ серии phoenix|x-ray компании GE Sensing & Inspection Technologies содержат специальные программные модули для оптимизации обработки объёмных измерений. Эти системы также содержат программные пакеты для обработки поверхностных данных, включая моделирование элементов, вычисление геометрических размеров и допусков по стандартам DIN/ISO и полностью

автоматической генерации отчетов об исходных образцах.

Результаты измерений, полученные с помощью специального оптимизированного алгоритма извлечения поверхностей, преобразуются к обычным стандартам с помощью образцов, сертифицированных в немецкой метрологической организации DKD.

Последовательность операций объёмной КТ

1. Сбор данных.

Вначале требуется получить несколько сот плоских проекций образца, выполненных под разными углами. Для этого образец устанавливается на прецизионный манипулятор с гранитным основанием и поворачивается на 360° на прецизионном столе. Сканирование плоских проекций обычно производится с шагом <math><0,5^\circ</math>. Качество результатов измерений и, соответственно, точность всех последующих вычислений в значительной степени обуславливается резкостью рентгеновских изображений, которые, в свою очередь, зависят от качества источника и детектора рентгеновского излуче-

ния, а также точности и стабильности манипулятора. Таким образом, чем лучше выполняется первый шаг процесса, тем точнее будут результаты измерений.

2. Объёмная реконструкция.

Пространственные координаты точек образца генерируются из исходных данных с помощью специального алгоритма обратной проекции с фильтрацией.

Для получения оптимальных результатов, алгоритм реконструкции должен учитывать и исправлять дефекты, появляющиеся на шаге 1, такие как увеличение жёсткости пучка и тепловое расширение трубки.

3. Генерация поверхностей.

Информация о поверхностях образца извлекается из объёмных данных в виде текстового массива координат или поверхностей STL. Эту информацию можно загружать в ПО для отображения объёмных данных, например, Polyworks Inspector™.

4. Оценка и анализ (виртуальная координатно-измерительная система).

После загрузки поверхностей образца в ПО пространственного анализа можно выполнить дополнительные измерения (рис. 5). Можно сравнить фактическую поверхность образца и его модель САПР с помощью дисперсионного анализа или выполнить линейные геометрические измерения.

Подтверждение точности измерений с помощью КТ (1)

Для подтверждения точности измерений компьютерных томографов серии phoenix|x-ray компании GE Sensing & Inspection Technologies и возможности их использования в качестве трёхмерных координатно-измерительных систем, компьютерной томографии был подвергнут блок клапанов двигателя внутреннего сгорания (рис. 5). Исследования проводились в г. Франкфурте (Германия) на заводе одного из производителей автомобильных комплектующих. Деталь, изготовленная из авиационного алюминия с длиной края 130 мм, измерялась с помощью эталонной прецизионной трёхмерной контактной координатно-измерительной системы Hexagon Metrology Leitz 3D PMM 8.6.6.. КТ осуществлялась с помощью компьютерного томографа phoenix |v|tome|x L компании GE Sensing & Inspection Technologies.

Избранные результаты измерений приведены в таблице 1; они показывают превосходное соответствие

ПАРАМЕТР	Ø Z1 [ММ]	РАССТОЯНИЕ A1 [ММ]
Модель САПР	28,000	70,500
Допуск	0,050	0,100
Результат КТ	28,035	70,442
Результат контактной системы	28,034	70,447
Отклонение КТ и контактной системы	0,001	-0,005

ТАБЛИЦА 1: СООТВЕТСТВИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТРЁХМЕРНОЙ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И КТ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ.

результатов измерений контактной системы и КТ. Доказанное отклонение диаметра и длины составило ≤ 6 мкм (таблица 1).

Как прогресс в области КТ может быть полезен в промышленном производстве

Недавно поступивший на рынок томограф серии phoenix|x-ray компании GE Sensing & Inspection Technologies оборудован абсолютно новой однополярной микрофокусной рентгеновской трубкой 300 кВ/500 Вт, позволяющей выполнять КТ сильно поглощающих образцов с особо высоким увеличением (рис. 6). В этой системе впервые для рентгеновских трубок с макси-

мальным напряжением 300 кВ было достигнуто разрешение 1 мкм. В томографе также используется новый термостабилизированный цифровой детектор с увеличенным контрастным разрешением. Использование новейших программных и аппаратных разработок позволяет выполнять КТ с помощью системы vitome|x L 300 за очень короткое время. Простое в использовании и мощное ПО datos|x томографа phoenix|x-ray СТ включает в себя набор модулей для оптимизации результатов КТ и повышения точности измерений. Так, новый модуль bhc|module позволяет автоматически корректировать увеличение жёсткос-

ти пучка. Автоматическая коррекция изображения позволяет значительно увеличить точность анализа пористости и построения поверхностей для последующих линейных измерений. Новые разработки в аппаратной области также повышают точность результатов измерений. Например, многострочный плоский детектор значительно снижает интерференцию, позволяя сканировать высоко дисперсионные алюминиевые компоненты с высоким разрешением без необходимости установки дополнительного линейного детектора.

Система phoenix vitome|x L 300 может применяться для полного объемного сканирования с высоким разрешением образцов массой до 50 кг и диаметром до 500 мм, что делает ее идеально подходящей для контроля качества в промышленных условиях (рис. 5). В состав системы также входит специальный измерительный пакет ПО, содержащий всё необходимое для выполнения точных и интуитивно-понятных линейных измерений: от калибровочных инструментов до модулей извлечения поверхностей.

Иногда для контроля качества выпускаемой продукции в процессе



РИС. 6. БЛАГОДАРИ НОВЕЙШЕЙ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКЕ, СИСТЕМА РНОЕНИХ|RAY VITOME|X L 300 ОСОБЕННО ПОДХОДИТ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКИМ УВЕЛИЧЕНИЕМ. МОЩНОСТЬ ТРУБКИ ПОЗВОЛЯЕТ ПРОВОДИТЬ ИНСПЕКЦИЮ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХСЯ СИЛЬНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ.



РИС. 7. ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНСПЕКЦИИ ОБРАЗЦОВ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА, СИСТЕМА PHOENIXRAY V|TOME|X L 450 ИМЕЕТ ВОЗМОЖНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ И ДЕТЕКТОРА ПО ВЫСОТЕ. «СШИВКА» ЧАСТЕЙ ОБЪЕМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОИЗВОДИТСЯ СРЕДСТВАМИ ПО.



РИС. 8. ШИРОКАЯ ДВЕРЬ В ЗАЩИТНОМ КАБИНЕТЕ УСТАНОВКИ V|TOME|X L 450 ПРЕДНАЗНАЧЕНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ПРИ РАБОТЕ С ОБРАЗЦАМИ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА И ВЕСА.

НАИБОЛЕЕ МОЩНОЙ УСТАНОВКОЙ В ПРОДУКТОВОЙ ЛИНЕЙКЕ КОМПАНИИ GE SENSING & INSPECTION TECHNOLOGIES ЯВЛЯЕТСЯ КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТОМОГРАФ V|TOME|X L 450. РАЗМЕРЫ МАНИПУЛЯТОРА ПОЗВОЛЯЮТ ПРОВОДИТЬ ПОЛНОЦЕННОЕ ТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ С МАКСИМАЛЬНЫМИ РАЗМЕРАМИ 800 ММ ПО ВЫСОТЕ И 600 ММ В ДИАМЕТРЕ.

производства возникает потребность проведения томографической инспекции образцов большого размера. Очевидно, что увеличение физических размеров образцов ведёт не только к увеличению размеров манипулятора для перемещения образца, но и к повышению мощности рентгеновской трубки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению количества необходимой свинцовой защиты от рентгеновского излучения. Таким образом, при увеличении максимального размера инспектируемого образца, общий вес и размеры томографа существенно возрастают.

Наиболее мощной установкой в продуктовой линейке компании GE Sensing & Inspection Technologies является компьютерный томограф v|tome|x L 450 (см. рис. 7). Размеры манипулятора позволяют проводить полноцен-

ное томографическое исследование образцов с максимальными размерами 800 мм по высоте и 600 мм в диаметре. Максимальный вес исследуемых деталей может достигать 100 кг.

Работа с образцами такого размера уже требует введения средств механизации. Действительно, достаточно сложно, и небезопасно перемещать образец весом в центнер вручную. Поэтому все установки компании GE Sensing & Inspection Technologies оборудованы широкими воротами, позволяющими использовать погрузочные устройства (рис. 8).

В заключение этой статьи, хочется упомянуть о последнем достижении в компьютерной томографии металлических отливок и изделий – 100%-й контроль качества в составе производственной линии (рис. 9) Рассказ об этой системе является темой отдельной статьи. Необходимо отметить, что разработка подобной системы потребовала не только новых подходов в проектировании оборудования. Программное обеспечение для томографии также было полностью переработано.

По всем вопросам, связанным с промышленным оборудованием компании GE Sensing & Inspection Technologies, вы можете обратиться в компанию ЗАО Предприятие Остек. Наличие исследовательского центра, сервисной службы из нескольких десятков сертифицированных инженеров и 10-летний опыт работы с рентгеновским оборудованием серии phoenix|x-ray, делают нашу компанию одним из крупнейших игроков рынка промышленной томографии на территории бывшего СССР.

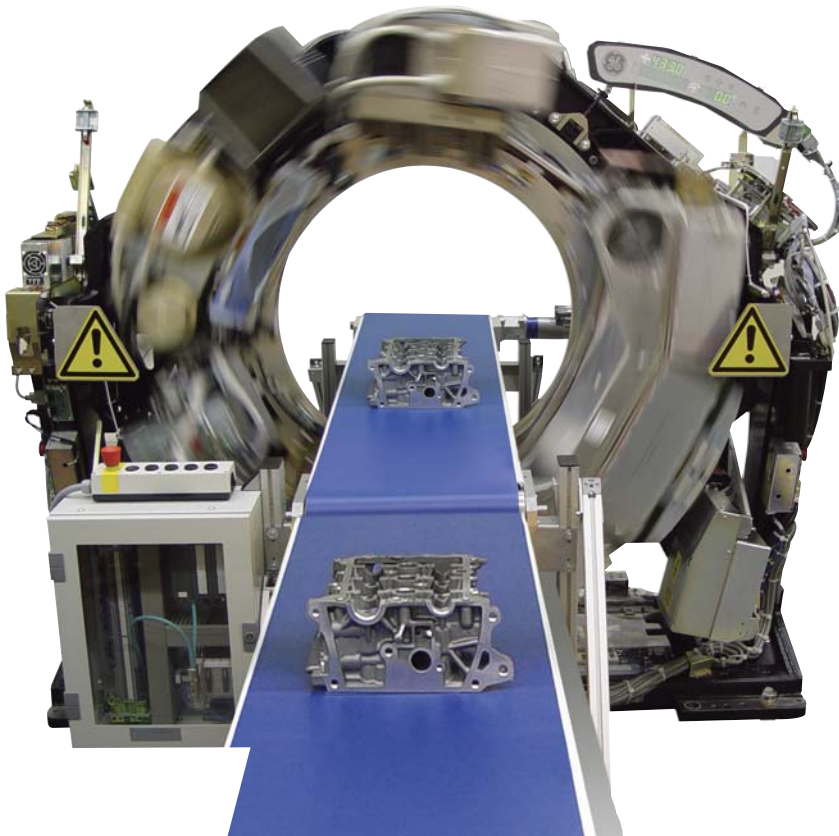


РИС. 9. СИСТЕМА КТ В ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ ПОЗВОЛЯЕТ ВЫПОЛНЯТЬ ОБЪЕМНОЕ СКАНИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДЕТАЛЕЙ, ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ НЕЁ НЕПРЕРЫВНО С БОЛЬШОЙ СКОРОСТЬЮ. ЗАЩИТНЫЙ КОРПУС ТОМОГРАФА GE НА ФОТОГРАФИИ НЕ ПОКАЗАН.



Связаться с нами можно по электронной почте: x-ray@ostec-group.ru или по телефону: +7 (495) 788-44-44.