

---

## История, состояние и перспективы промышленной рентгеновской компьютерной томографии

Сотрудники  
ООО «Промышленная интроскопия», Москва



Вайнберг  
Ирина  
Алексеевна  
Старший научный  
сотрудник, к. т. н.



Вайнберг  
Эдуард  
Ильич  
Президент,  
д. т. н.

Промышленная рентгеновская компьютерная томография возникла как отражение феерического успеха медицинской компьютерной томографии, изобретенной английским инженером Г. Н. Хаунсфилдом, опубликовавшим первое описание компьютерного томографа в 1972 г. [1]. Уже через неполные 7 лет это выдающееся открытие эпохи компьютерной революции было отмечено Нобелевской премией. С тех пор достоинства медицинской томографической диагностики не устарели, и она продолжает помогать лечить людей в десятках тысяч медицинских учреждений по всему миру. Небывалый масштаб успеха медицинской рентгеновской томографии — следствие счастливого совпадения уникальных информационных возможностей метода, адекватных диагностическим задачам, размерам и физическим свойствам человеческого тела, а также наличию многомilliардного рынка сбыта дорогостоящего медицинского оборудования.

Воодушевленные идеями томографии, десятки фирм и университетов Великобритании, США, Франции, Германии, Японии и СССР [2–7] активно взялись за создание рентгеновских компьютерных томографов для промышленных и научных целей, разработку стандартов [8–11, 26–29] и поиски наиболее важных областей применения. Из отечественных достижений того периода можно упомянуть настольный микротомограф ВТ-50 (рис. 1), разработанный в лаборатории Э. И. Вайнberга, который уже в 1990 г. был поставлен в Италию и США и с большим успехом представлен на конференциях в Милане (1990 г.) и Сан-Диего (1991 г.).

За прошедшие тридцать лет своего развития промышленные рентгеновские компьютерные томографы стали привычным инструментом отработки технологии и повышения надежности ответственных промышленных изделий многих инновационных отраслей ведущих промышленных стран [12-18].

Они используются для количественного НК внутренней пространственной структуры широкого спектра ответственных автомобильных и аэрокосмических узлов и деталей: сложного литья из легких сплавов, титана и специальных сталей, охлаждаемых турбинных лопаток из жаропрочной стали, твердотопливных ракетных двигателей, крупногабаритных лопаток вентилятора турбовентиляторных двигателей, теплообменников, трансмиссий, форсунок, датчиков и клапанов, сложных сварных и паяных соединений; головок блока цилиндров, поршней, гидроопор, каталитиче-



Рис. 1. Внешний вид микротомографа ВТ-50 (1990 г.) и примеры полученных на нем томограмм из области материаловедения, геологии, электроники и медицины



ских нейтрализаторов, тормозных дисков и колодок, автоматических коробок передач, малогабаритных двигателей крылатых ракет и беспилотных летательных аппаратов; ответственного корпусного литья и топливораспределительных блоков; углеродных уплотнителей и подшипников, сложных изделий из керамики; изделий из композиционных материалов, многослойных конструкций, kleевых соединений, сотовых конструкций, теплозащиты, звукопоглощающих панелей и обтекателей; боеприпасов, электродвигателей, аккумуляторов, изоляторов, сильно-точных высоковольтных выключателей и других электротехнических изделий; крупногабаритных шин, геологических кернов и т. д. на всех этапах «жизни» изделия: от входного контроля материалов, отработки техпроцесса, мониторинга серийной технологической дисциплины до диагностики в процессе испытаний, эксплуатации и ремонта.

Несмотря на сложность, дороговизну и проблемы биологической защиты, востребованность промышленной компьютерной томографии до сих пор обусловлена неспособностью традиционных методов и средств НК и измерений количественно исследовать сложную внутреннюю структуру ответственных деталей и сборок, имеющих критическое значение для обеспечения надежности аэрокосмических, автомобильных, энергетических и оборонных систем. Например, чем измерить геометрию системы охлаждения внутри литой турбинной лопатки из жаро-прочной стали? Чем количественно оценить однородность распределения плотности и размеры неоднородностей внутри тормозного диска, композитной лопасти или ракетного сопла из углекомпозита? Чем оценить качество сварных и паяных соединений внутри сложного теплообменника или радионуклидного источника тока космического аппарата? Чем определить правильность сборки сложного неразборного клапана или боеприпаса, измерить величину зазоров и плотностей внутренних структурных элементов? Подобные задачи являются исключительными областями применения промышленной томографии, в которых информационные возможности томографического метода пока не имеют себе равных.

В то же время, если сопоставить современный уровень развития техники и рынка промышленной компьютерной томографии с успехами ее «прапородителя» — медицинской томографической диагностики, то неизбежна более скромная оценка многолетних достижений промышленной томографии. Основных причин три:

1) «неудобные» для многоракурсного рентгеновского просвечивания физические свойства промышленных объектов контроля (высокие плотность и эффективный атомный номер материалов, значительные размеры и вес) и их несоответствие характеристикам современных источников тормозного излучения (по проникающей способности излучения [19, 20, табл. 1], размерам фокусного пятна [6, 14] и уровню мощности экспозиционной дозы);

Табл. 1. Требования к источникам тормозного излучения [19, 20]

Просвечиваемая толщина стали, мм	3	15	30	50	60
Необходимое анодное напряжение рентгеновской трубки, кВ	125	225	320	450	600

2) существенно меньшие размеры подлежащих обнаружению локальных дефектов [4, 5], и повышенные требования к пространственному разрешению, точности измерения размеров и разноплотностей внутренних структур [4, 14];

3) низкая емкость рынка томографического оборудования для инновационных технологий ответственных промышленных изделий аэрокосмического, автомобильного и оборонного назначения.

Именно эти фундаментальные факторы определяют современное состояние и перспективы развития промышленной компьютерной томографии.

Сегодня около 30 фирм и научных центров США, Германии, Великобритании, Бельгии, Японии, России, Италии, Китая и Индии на своих сайтах предлагают или описывают промышленные компьютерные томографы самых разнообразных моделей для разных областей применения:

- **«таможенные»** инспекционно-досмотровые томографические комплексы;
- **микро- и нанотомографы** для промышленного контроля, научных исследований;
- **координатно-измерительные машины** с использованием рентгеновской компьютерной томографии;
- и собственно **универсальные компьютерные томографы промышленных изделий** для отработки технологии и сертификации деталей и узлов авиационных и автомобильных двигателей и оборонной промышленности [15–18, 21].

За последние годы соотношения этих подвидов томографической технической диагностики заметно изменились под воздействием спроса и экономической конъюнктуры, бурного развития компьютерной техники, прихода нового поколения разработчиков и фирм, а также растущей популярности автоматизированных компьютерных технологий, призванных минимизировать «человеческий фактор».

В частности, в ответ на продолжающийся деструктивный рост терроризма, наркомании и контрабанды оружия, на первое место вышел наиболее емкий рынок специализированной томографической радиационной диагностики для инспекции и **досмотра авиабагажа** (рис. 2). В крупных авиатерминалах мира подобных дорогостоящих установок десятки, а общее число авиа-пассажиров в мире удваивается каждые 15 лет и уже превышает три миллиарда человек (и чемоданов), что соответствует потребности в три тысячи досмотровых компьютерных томографов, за которые заплатят пассажиры! Этот растущий рынок томографов «имени 2001 года» на порядок превышает потребности в томографическом контроле на производстве.

Среди высокопроизводительных (от 600 до 1800 чемоданов в час) компьютерных томографов для досмотра авиабагажа с автоматическим обнаружением взрывчатых вложений наиболее популярны конкурирующие томографы североамериканских фирм **Rapiscan Systems** / [www.rapiscansystems.com](http://www.rapiscansystems.com), **Morpho Detection (Safran Group)** / [www.morphodetection.com](http://www.morphodetection.com), **L-3 Communication/Security Detection Systems** (партнер фирмы **Analogic**) / [www.L-3com.com/sds](http://www.L-3com.com/sds), **SAIC Security and Transportation Technology** / [www.saic.com/security](http://www.saic.com/security) и европейского производителя **Smiths Heimann / Smiths Detection** / [www.smithsdetection.com](http://www.smithsdetection.com).

Этот технически развитый и экономически наиболее выгодный подвид промышленной рентгеновской томографии заслуживает пристального внимания разработчиков, но в силу низкой проникающей способности (10 мм стали, 90–180 кВ) и пространственного разрешения (≈



Рис. 2. Внешний вид досмотрового компьютерного томографа авиабагажа типа СТ-800мс американской фирмы SAIC

5–10 пер/см), адекватных специфике объектов контроля, «багажные» томографы, еще в меньшей степени, чем более массовые — медицинские томографы, неэффективны для количественного томографического контроля внутренней структуры ответственных промышленных изделий из плотных металлов и композитов. В то же время конструкция транспортерных «багажных» томографов (как и медицинских) с модернизацией источника, детекторов излучения и радиационной защиты может использоваться как основа для высокопроизводительного 100% томографического контроля ответственных серийных изделий «на потоке» с умеренной метрологией.

Попутно отметим (рис. 3) и новый емкий рынок высокоенергетического (3/4/6/9 МэВ) цифрового радиографического досмотра большегрузного автотранспорта, железнодорожных вагонов и морских контейнеров, где благодаря применению ускорителей достигается повышенная проникающая способность (до 200 мм стали) при габаритах объектов контроля до  $4 \times 5 \times 20$  м, но идеи всестороннего многоракурсного просвечивания с реализацией компьютерной томографии пока остаются на уровне перспективных проработок. Среди успешных изгото-



Рис. 3. Внешний вид высокоенергетического (6 МэВ) портального досмотрового рентгенографического оборудования типа Rapiscan Eagle P60 американской фирмы Rapiscan Systems

вителей разнообразных моделей высокоенергетического досмотрового оборудования можно указать американские фирмы **Rapiscan Systems** / [www.rapiscansystems.com](http://www.rapiscansystems.com) и **American Science and Engineering (AS&E)** / [www.as-e.com](http://www.as-e.com), Smiths Heimann / **Smiths Detection** (Германия) [www.smithsdetection.com](http://www.smithsdetection.com) и **NUCTECH** (КНР) / [www.nuctech.com](http://www.nuctech.com). Это оборудование на сегодня является основным потребителем промышленных ускорителей (преимущественно линейных) с энергией ускоренных электронов от 3 до 9 МэВ и многоэлементных решеток детекторов с крупными сцинтилляционными кристаллами.

За последние годы существенно расширилось количество предложений и опыт применения рентгеновских **микротомографов** для НК внутренней структуры небольших изделий ( $\varnothing$  1–100 мм), материалове-

дения, томографии электронных компонентов и научных исследований [23]. Сегодня на рынке промышленных томографов представлено большое число моделей микротомографов и нанотомографов с использованием разборных и отпаянных микрофокусных трубок (0,2–6 мкм при мощности на мишени 0,2–6 Вт) на анодное напряжение от 80 до 225 кВ. Для многоракурсного томографического контроля стальных изделий напряжения 225 кВ (15 мм стали) безусловно недостаточно, но дальнейшее повышение анодного напряжения микрофокусных рентгеновских трубок технологически затруднено и резко утяжеляет автономную биологическую защиту. Тем не менее, европейская фирма **Nikon Metrology NV (X-Tek)** / [www.nikonmetrology.com](http://www.nikonmetrology.com), помимо микрофокусной трубы на 225 кВ (3 мкм), использует в своих микротомографах оригинальные разборные трубы с коротким фокусным расстоянием и напряжением 320 кВ (20 мкм) и 450 кВ (80 мкм). Пока эта трубка (рис. 6) на 450 кВ — лучшее мировое достижение в проникающей способности промышленной микротомографии, хотя и с умеренным предельным пространственным разрешением на уровне 100 пер/см.

На рис. 4 представлен внешний вид двух моделей микротомографов известных производителей: слева — микротомографическая координатно-измерительная машина **METROTOM 1500** фирмы **Carl Zeiss** / [www.metrology.zeiss.com](http://www.metrology.zeiss.com) / с разборной трубкой на 225 кВ и нанотомограф **phoenix nanotom s&m** фирмы **GE Sensing**



Рис. 4. Внешний вид микротомографической координатно-измерительной машины **METROTOM 1500** фирмы **Carl Zeiss** и нанотомографа **phoenix nanotom s&m** фирмы **GE Sensing & Inspection Technologies (Phoenix|x-ray)**

**& Inspection Technologies (Phoenix|X-ray)** / [www.ge-mcs.com](http://www.ge-mcs.com), [www.phoenix-xray.com](http://www.phoenix-xray.com)/с нанофокусной трубкой на напряжение 180 кВ.

Среди изготавителей микро- и нанотомографов, помимо трех указанных выше, следует отметить европейские фирмы **Yxlon International (Comet Group)** / [www.yxlon.com](http://www.yxlon.com), **RayScan Technologies** / [www.rayscan.eu](http://www.rayscan.eu), **MatriX Technologies** / [www.m-xt.com](http://www.m-xt.com), **Bruker microCT (SkyScan)** / [www.skyscan.be](http://www.skyscan.be), **RX Solutions** / [www.rxsolutions.fr](http://www.rxsolutions.fr), **Viscom** / [www.viscom.de](http://www.viscom.de), **Procon X-ray** / [www.procon-x-ray.de](http://www.procon-x-ray.de), **Shake** / [www.shake-gmbh.de](http://www.shake-gmbh.de), **Scanco Medical** / [www.scanco.ch](http://www.scanco.ch); американские фирмы **North Star Imaging (XVIEWCT)** / [www.xviewct.com](http://www.xviewct.com), **Xradia** / [www.xradia.com](http://www.xradia.com) и **IRIS Systems** / [www.irisystems.com](http://www.irisystems.com), японские Shimadzu / [www.shimadzu.com/an/ndi](http://www.shimadzu.com/an/ndi), **Yamato Scientific** / [www.yamato-scientific.com](http://www.yamato-scientific.com) и **Toshiba IT & Control Systems** / [www.toshiba-itc.com](http://www.toshiba-itc.com).

Большинство этих фирм предлагает покупателям по несколько моделей микротомографов, отличающихся максимальными размерами объекта контроля, проникающей способностью излучения, пределом пространственного разрешения, типом используемой рентгеновской трубы (рабочим напряжением и размерами фокусного пятна), типом многоканального блока детекторов (интервалом дискретизации, числом элементов, геометрическими размерами, разрядностью АЦП, конструктивными особенностями: двумерные панели, однорядные или многорядные линейки детекторов), грузоподъемностью и диапазоном перемещений сканирующей системы, габаритами и весом рентгенозащитного бокса, а также быстродействием и особенностями комплекта программного обеспечения. В большинстве случаев изготавители микротомографов используют собственные программы для управления оборудованием и реконструкции, а также однотипные, часто покупные, пакеты программного обеспечения обработки, визуализации, преобразования томограмм и автоматической расшифровки результатов исследования. Например, программное обеспечение фирм **Volume Graphics** / [www.volumegraphics.com](http://www.volumegraphics.com), **Visualization Sciences Group** / [www.vsg3d.com](http://www.vsg3d.com), **InnovMetric Software** / [www.innovmetric.com](http://www.innovmetric.com) и **Fraunhofer IIS** / [www.iis.fraunhofer.de](http://www.iis.fraunhofer.de) для конического пучка и спиральной томографии.

Наличие автономной биологической защиты для микротомографов является стандартом, что позволяет их эксплуатировать в обычных лабораторных помещениях и способствует распространенности микротомографов в сфере высшего образования и научных учреждениях. При

этом расширение диапазона размеров и плотности объектов контроля неизбежно связано с повышением анодного напряжения рентгеновской трубы и еще более значительным увеличением веса рентгенозащитного бокса.

Несмотря на оптимизм рекламных буклетов, при покупке микротомографа, а тем более нанотомографа, необходимо проявлять известную осторожность, доверяя только экспериментально подтвержденным результатам. Например, на пространственное разрешение влияют не номинальные, а суммарные размеры фокусного пятна с учетом вклада афокального излучения и изменений пространственного положения фокусного пятна в процессе эксплуатации под воздействием механических деформаций, вариаций температуры электромагнитной фокусирующей системы и мишени, изменений величины ускоряющего напряжения или вибраций. Кроме того, для пространственного разрешения важны интервал дискретизации каналов детектора, фокусное расстояние и используемое увеличение [6]. Поэтому приводимое в проспектах малое значение номинального фокусного пятна рентгеновской трубы еще не гарантирует адекватно высокого предела пространственного разрешения томографа.

По аналогии с соревнованием рекламных значений мощности микрофокусных трубок, т. к. оно соответствует максимальному размеру фокусного пятна, а для минимального — все трубы практически равнозначны, т. к. имеют предельную тепловую нагрузку на неподвижной мишени на уровне  $\approx 1 \text{ Вт}/\text{мкм}$  ( $\text{kВт}/\text{мм}$ ), а отличия на 10–50% от этого уровня несущественны, т. к. нивелируются статистикой квантового шума, пропорционального квадратному корню из числа зарегистрированных квантов.

Использование в промышленных томографах разборных микрофокусных трубок с непрерывной откачкой и сменными электродами создает эксплуатационные неудобства и является наглядным свидетельством несовершенства технологии промышленной электровакуумной техники. Для сравнения отметим, что в массовой медицинской томографии используются только отпаянные рентгеновские трубы. Причем современные конструкции серийных трубок медицинской томографии используют охлаждаемую маслом вращающуюся отпаянную вакуумную камеру с кратковременной тепловой нагрузкой на вращающейся расположенной мишени  $100\text{--}200 \text{ кВт}/\text{мм}$ , что на два порядка выше, чем в промышленной томографии.

Применительно к выбору конструкции детекторов необходимо обратить внимание на долговременную стабильность чувствительности каналов и проблему физического ослабления вклада рассеянного излучения, доминирующего в области комптоновского рассеяния при повышенном напряжении. Последняя проблема не решена для двумерных панельных детекторов, вследствие чего качество и метрология микротомографов с коллимированными линейными решетками детекторов (при одновременном уменьшении облучаемого объема объекта контроля) существенно выше.

Относительно микротомографов на синхротронном и ондуляторном излучении лазеров на свободных электронах [24]. Подобные работы проводились в десятке ускорительных центров, имеющих накопители со станциями синхротронного излучения, например в Новосибирском ИЯФ, в Курчатовском институте, в Аргоннской и Брукхэвенской национальных лабораториях, Стенфордской лаборатории синхротронного излучения (США), в Гренобле и Мельбурне, в японской национальной лаборатории КЭК, в Барселоне и т. д. Из-за удручающе низкой энергии синхротронного излучения (10–40 кэВ) применительно к промышленным объектам контроля они проигрывают микротомографам на тормозном излучении рентгеновских трубок. Значимых объектов исследования, для которых высокая интенсивность и поляризация дорогостоящего синхротронного излучения проявились бы в решающей мере, пока не выявлено.

В метрологическом обеспечении современного производства сложных пространственно развитых изделий важную роль играют высокоточные компьютеризированные **координатно-измерительные машины**, прошедшие в своем развитии значительный путь от тяжеловесных порталных до переносных портативных контактных установок и бесконтактных лазерных измерителей наружной геометрии изделий произвольной сложности и масштаба (рис. 5).

Не останавливаясь на достигнутом, ведущие производители координатно-измерительных машин в последние годы решили перенести разработанные и стандартизованные [23] принципы бесконтактных трехкоординатных измерителей с внешней поверхности промышленных изделий на их внутреннюю структуру путем замены механических щупов и оптического излучения на многоракурсное рентгеновское просвечивание и реконструкцию трехмерных томограмм измеряемых изделий (рис. 4, 6).

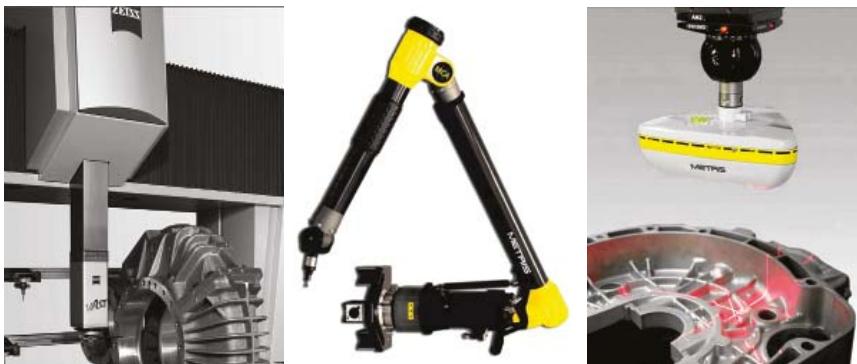


Рис. 5. Внешний вид контактной координатно-измерительной машины PRISMO navigator фирмы Carl Zeiss, переносной портативной «измерительной руки» и трехмерного лазерного бесконтактного сканера pXC650Dx фирмы Nikon Metrology

В числе наиболее продвинутых изготавителей этого подвида промышленного томографического оборудования следует выделить европейские фирмы **Werth Messtechnik** / [www.werth.de](http://www.werth.de), **Carl Zeiss** / [www.metrology.zeiss.com](http://www.metrology.zeiss.com), **Nikon Metrology NV (X-Tek)** / [www.nikonmetrology.com](http://www.nikonmetrology.com), **WENZEL Volumetrik** / [www.wenzel-group.com/volumetrik](http://www.wenzel-group.com/volumetrik) и **North Star Imaging (XVIEWCT)** / [www.xviewct.com](http://www.xviewct.com). От эйфории начального оптимизма измерителей электронных компонентов эти фирмы уже дошли до понимания ограниченности проникающей способности низкоэнергетического излуче-

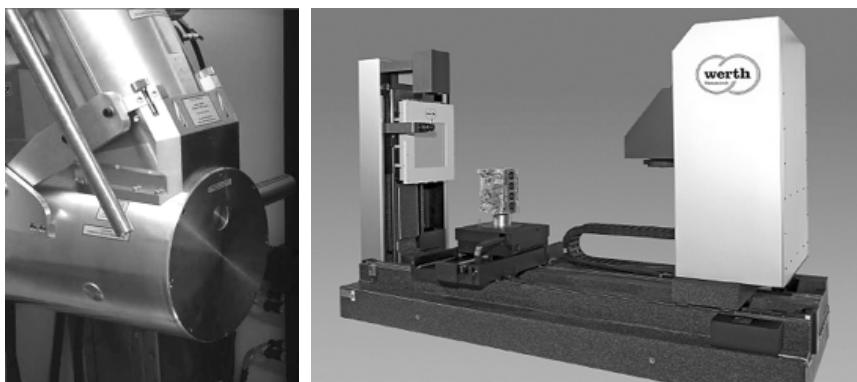


Рис. 6. Внешний вид рентгеновской томографической измерительной машины Werth TomoScope HV 800 фирмы Werth Messtechnik и оригинальной разборной микрофокусной трубки на 450 кВ при 80 мкм фирмы Nikon Metrology (X-Tek)

ния микрофокусных трубок с напряжением 225 кВ и в настоящее время, помимо измерительных микротомографов, фирмы **Werth Messtechnik** и **Nikon Metrology NV (X-Tek)** разработали более информативные модели на напряжение 450 кВ с проникающей способностью до 50 мм стали. И тенденция дальнейшего повышения энергии излучения томографических координатно-измерительных машин несомненна.

И, наконец, о собственно **универсальных томографах промышленных изделий** для НК внутренней структуры, отработки технологии и сертификации ответственных деталей и узлов авиакосмического, автомобильного и оборонного машиностроения.

Развитие этого подвида промышленных томографов принципиально затруднено и не адекватно прогрессу цифровой техники и программного обеспечения. Основное фундаментальное физическое ограничение — конечная проникающая способность тормозного излучения [19, 20]. И хотя для снижения материалоемкости в современном машиностроении широко применяются тонкостенные конструкции, легкие сплавы (на базе Ti, Al или Mg) и композиты, наиболее нагруженные и высокотемпературные детали по-прежнему изготавливаются из стали и жаропрочных сплавов с плотностью от 7,6 до 8,6 г/см<sup>3</sup>. Эта проблема отражена в стандартах, обсуждалась нами ранее и представлена в табл. 1 и 2.

Видно, что в силу неотменяемых физических законов промышленный томограф начального уровня должен иметь рентгеновскую трубку

Табл. 2. Требования к источникам высокоэнергетического тормозного излучения [19, 20]

Просвечиваемая толщина стали, мм	50	80	120	150	190	200
Энергия ускоренных электронов источника тормозного излучения, МэВ	0,5	0,8	2	5	9	15

с анодным напряжением не ниже 450 кВ, а перспективный универсальный томограф для промышленных изделий должен оснащаться ускорителем на энергию 5–9 МэВ. Этую аксиому постепенно за 20 лет начали понимать ведущие производители, и сегодня этот класс универсальных высокоэнергетических промышленных томографов представлен некоторым числом высокоэнергетических моделей от известных производителей: **Yxlon International (Comet Group)**, **GE Sensing & Inspection Technologies (Phoenix|x-ray)**, **RayScan Technologies**, **Nikon Metrology**

**NV (X-Tek), MatriX Technologies, North Star Imaging (XVIEWCT) и российской фирмой Проминтро (Indintro).**

На рис. 7 представлен внешний вид универсального высокоенергетического промышленного томографа российской фирмы «Проминтро» с диаметрами томограмм от 50 до 800 мм, грузоподъемностью более 500 кг и длиной хода по вертикали более 1 м. В томографе используются два источника излучения: неразборная минифокусная рентгеновская трубка на 450 кВ (с двумя фокусными пятнами 0,4 и 1 мм) и ускоритель электронов с энергией 5 МэВ в сочетании с дополнительными коллиматорами, управляющими размерами эффективных фокусных пятен (0,4/0,2 мм) и минимизирующими уровень афокального излучения. Проникающая способность по стали не менее 150 мм, предел пространственного разрешения во всем диапазоне энергий — 50 пер/см и точность измерения размеров внутренних структурных элементов — 0,05 мм. Используется метод локальной томографии [7] с форматом реконструируемых обзорных и локальных томограмм от  $1024 \times 1024$  до  $2048 \times 2048$  при адекватном числе разноракурсных проекций.

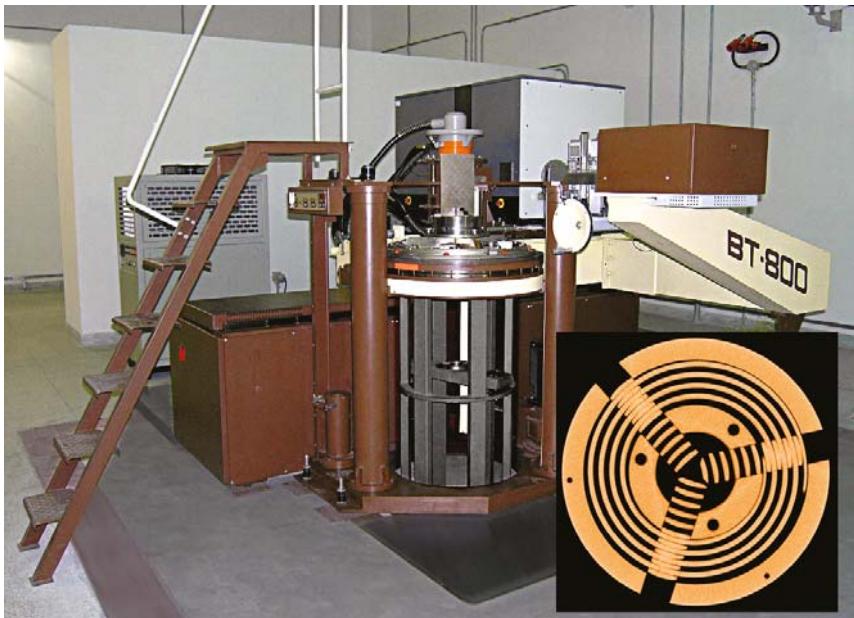


Рис. 7. Внешний вид универсального высокоенергетического томографа BT-800XA российской фирмы Проминтро и томограмма стального токарного патрона  $\varnothing 250$  мм

Если при напряжении 450 кВ с проникающей способностью 50 мм стали производители предлагают рентгенозащитные боксы разных габаритов массой до 20 т, то для высокоэнергетических промышленных томографов с ускорителем и проникающей способностью более 150 мм стали биологическую защиту обеспечивают бетонные стены бокса толщиной более 1 м с лабиринтом для защиты входной двери.

Характеристики доступных высокоэнергетических трубок и ускорителей оставляют желать лучшего и из-за ограниченного спроса годами не улучшаются. Например, единственны модели отпаянных минифокусных (0,4 мм) трубок на 450 (600) кВ MXR-451 (600) HP/11, выпуск которых осуществляется швейцарской фирмой **Comet** / [www.comet.ch](http://www.comet.ch), имеют повышенный уровень афокального излучения, существенно ухудшающий метрологию томографа, но альтернативы нет.

По аналогии с доступными линейными ускорителями, энергия и интенсивность излучения которых нестабильны, значителен уровень фо-

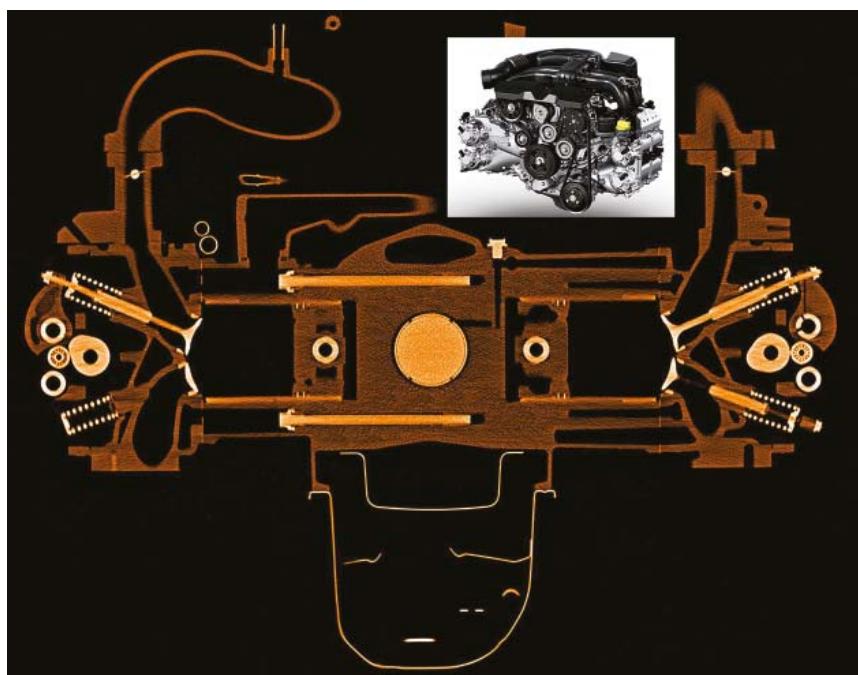


Рис. 8. Внешний вид и высокоэнергетическая (5 МэВ) томограмма  $\varnothing$  800 мм сечения автомобильного двигателя Subaru в сборе

нового излучения, а фокусное пятно обычно имеет размер около 2 мм вместо необходимых 0,4–0,2 мм.

Использование ускорителей и повышение пространственного разрешения **универсальных высокозергетических томографов** являются важнейшими тенденциями развития этого подвида промышленных томографов с целью увеличения чувствительности к локальным дефектам и повышения точности измерения размеров элементов сложной внутренней структуры. Поэтому современные высокозергетические томограммы промышленного объекта контроля в лучших образцах уже содержат до  $2048 \times 2048$  расчетных элементов. Сверх этого, благодаря использованию метода локальной томографии [7], общее отношение диаметра объекта контроля и минимально разрешаемого элемента томограммы  $D/d$  может превосходить  $10^4$ . В этом промышленные томографы опередили медицинскую рентгеновскую томографию, для которой стандартом является формат реконструи-

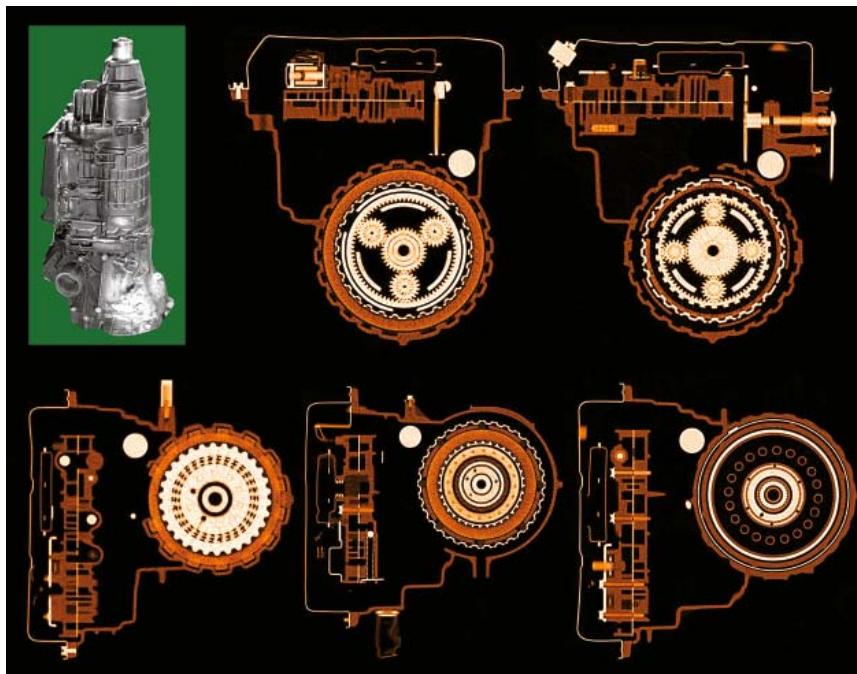


Рис. 9. Внешний вид и высокозергетические (5 МэВ) томограммы Ø 600 мм поперечных сечений автоматической коробки передач Subaru

руемых томограмм  $512 \times 512$  при визуализации с интерполяцией до  $1024 \times 1024$ .

В связи с непрерывным увеличением объема данных двумерных и трехмерных результатов томографического контроля неизбежен переход от интерактивной расшифровки цифровых томограмм опытным оператором к автоматической диагностике с формированием итогового протокола количественной оценки соответствия томографических результатов контроля требованиям конструкторской документации на изделие. Автоматизация полного цикла количественной томографической диагностики наиболее оправданна для специализированных промышленных томографов узкого класса изделий, повышает производительность и снижает зависимость от «человеческого фактора» при интерпретации результатов контроля. К сожалению, при этом роль средств визуализации томограмм, затрат на двумерную и трехмерную графику и даже функции оператора ослабевают. Красота томографии уступает рациональности цифровых оценок.

Для иллюстрации достигнутого уровня информативности и открывающихся перспектив на рис. 8 и 9 приведены примеры высокоэнергетических (5 МэВ) томограмм крупных металлических узлов автомобиля, полученных на промышленном томографе российской фирмы «Проминтро».

Мы видим, что промышленная томография жива, разветвилась на ряд взаимосвязанных подвидов, которые продолжают развиваться, хотя и не всегда ожидаемым образом.

## Литература

1. Hounsfield G. N. UK. Pat. No. 1283915 / A method and apparatus for examination of a body by radiation such as X-ray or gamma radiation. 1972 (23.08.1968).
2. Вайнштейн Б. К. Трехмерная электронная микроскопия биологических макромолекул. — Успехи физ. наук. 1973. Т. 109. Вып. 3. С. 455–497.
3. Васильева Э. Ю., Майоров А. Н. Применение ЭВМ-томографии для контроля твэлов. — Атомная энергия. 1979. Т. 46. № 6. С. 403–406.
4. Вайнберг Э. И., Гончаров В. И., Казак И. А., Курозаев В. П. Чувствительность рентгеновской вычислительной томографии при контроле изделий с локальными дефектами. — Дефектоскопия. 1980. № 10. С. 14–20.
5. Reimers P., Goebbels J. New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-ray Computed Tomography. — Materials Evaluation. 1983. V. 42. No. 6. P. 732–737.
6. Вайнберг Э. И., Казак И. А., Курозаев В. П. Точность воспроизведения пространственной структуры контролируемого объекта в рентгеновской вычислительной томографии. — Дефектоскопия. 1980. № 10. С. 5–14.
7. Вайнберг Э. И., Казак И. А., Курозаев В. П. Реконструкция внутренней пространственной структуры объектов по интегральным проекциям в реальном масштабе времени. — ДАН СССР. 1981. Т. 257. № 1. С. 89–94.

8. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging. E-1441. Philadelphia: ASTM, 2002.
9. Standard Guide for Computed Tomography (CT) System selection. E-1672. Philadelphia: ASTM, 1995.
10. Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination. E-1570. Philadelphia: ASTM, 1995.
11. Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination of Castings. E-1814. Philadelphia: ASTM, 2002.
12. 18<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing, April 16–20 2012, Durban, South Africa, [www.wcndt2012.org.za](http://www.wcndt2012.org.za).
13. 4<sup>th</sup> Conference on Industrial Computed Tomography — iCT2012, 19–21 September, Wels, Austria, <http://www.3dct.at>.
14. Вайнберг И. А., Вайнберг Э. И. Измерение размеров внутри сложных неразборных изделий с помощью компьютерных томографов. — В мире НК. 2005. № 3. С. 38–41.
15. Вайнберг И. А., Вайнберг Э. И., Цыганов С. Г. О месте томографической диагностики в повышении качества турбинных лопаток. — Двигатель. 2011. № 6. С. 10–13.
16. Вайнберг Э. И., Цыганов С. Г., Шаров М. М. Опыт трехмерной компьютерной томографии. — В мире НК. 2008. № 1. С. 56–59.
17. Вайнберг И. А., Вайнберг Э. И., Цыганов С. Г. Опыт томографии современных изделий из композитов и керамики. — В мире НК. 2012. № 3. С. 44–48.
18. Вайнберг И. А., Вайнберг Э. И., Цыганов С. Г. Актуальный опыт высокоенергетической томографии ответственных изделий авиационной промышленности. — В мире НК. 2012. № 1. С. 56–60.
19. EN 444:1994. Non-destructive testing. General principles for radiographic examination of metallic materials by X- and gamma rays. GEN, 1994.
20. ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения. — М.: ГК ССР по стандартам, 1982.
21. Вайнберг И. А., Вайнберг Э. И. Критерии выбора универсального компьютерного томографа для отработки технологии и сертификации ответственных промышленных изделий. — В мире НК. 2011. № 2 (52). С. 20–25.
22. Вайнберг И. А., Вайнберг Э. И., Цыганов С. Г., Сидорин В. Б. Российские высокоенергетические томографы для разработки технологии и сертификации ответственных изделий авиационной промышленности. — Двигатель. 2012. № 4. С. 20–26.
23. Первая Всероссийская научн. конф. «Практическая микротомография» (Micro-CT.RU), 5–7 декабря 2012, Казань.
24. Тернов И. М. Синхротронное излучение. — УФН. 1995. Т. 165. № 4. С. 429–456.
25. ISO 10360-2:2009. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and re-verification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions.
26. EN 16016-1:2011. Non-destructive testing — Radiation methods — Computed tomography. Part 1: Terminology.
27. EN 16016-2:2011. Non destructive testing — Radiation methods — Computed tomography. Part 2: Principle, equipment and samples.
28. EN 16016-3:2011. Non destructive testing — Radiation methods — Computed tomography. Part 3: Operation and interpretation.
29. EN 16016-4:2011. Non destructive testing — Radiation methods — Computed tomography. Part 4: Qualification.