



ПРОМЫШЛЕННАЯ ТОМОГРАФИЯ ИЗ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ПРОЕКЦИОННЫХ ДАННЫХ

С. Л. ЗОЛОТАРЕВ, В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ

Традиционная томография является эффективным средством для медицинской диагностики, неразрушающего контроля промышленных конструкций и проверки качества индустриальных изделий. Задача томографической реконструкции изображений объектов в случае ограниченного угла обзора, малого количества проекций и/или недостаточной мощности рентгеновского источника излучения является некорректной обратной задачей. Статья посвящена случаю, когда закон линейного ослабления не выполняется для некоторых направлений просвечивания и, более того, эффект ужесточения лучей приводит к погрешностям в реконструкции.

Traditional tomography is an effective means for medical diagnostics, non-destructive testing of industrial structures and checking the quality of industrial products. The problem of tomographic reconstruction of object images in the case of a limited viewing angle, small number of projections and/or insufficient power of X-ray radiation source is an incorrect inverse problem. The paper is devoted to the case, when the linear weakening law is not fulfilled for some directions of transmission and moreover, the effect of increased rigidity of the beams leads to reconstruction errors.

Томографическая визуализация (ТВ) — это технология математической реконструкции свойств и изображений объектов по многосенсорным данным с помощью тепловых, электромагнитных, акустических, рентгеновских, оптических и других измерительных систем. Она является важным средством для создания интегрированной информационной среды, а именно, для получения трехмерных цифровых компьютерных изображений производственных изделий и процессов.

Если при ТВ «наблюдение» объекта доступно из любого положения на круговой траектории, то для получения качественного трехмерного изображения объекта используется либо алгоритм, основанный на преобразовании Радона, либо итерационный метод реконструкции, либо метод фильтрованных обратных проекций (ФОП). Однако в случае наличия ограниченных углов обзора и/или малого количества проекций, задача становится сильно некорректной [1–6].

Если, например, рентгеновское излучение не может полностью просветить объект контроля по наилучшим направлениям, то его нельзя реконструировать с помощью традиционных итерационных алгоритмов [7]. Иногда удовлетворительной реконструкции можно добиться, применяя байесовскую реконструкцию изображений с использованием приемлемой априорной информации, признанной наиболее эффективной для реконструкции изображений из неполных наборов данных [6–8]. Использование в качестве априорной информации статистических свойств восстанавливаемого изображения также является весьма полезным для бинарных изображений [9–12].

В последнее время быстрыми темпами развивается промышленная рентгеновская томография, которая позволила вывести, например, контроль фасонных отливок различных деталей автомобильных и тракторных двигателей на качественно новый уровень. Производство ответственных изделий современного машиностроения — автомобильных, тракторных и авиационных двигателей, охлаждаемых турбинных лопаток невозможно без использования современных средств измерения линейных размеров. Однако традиционные средства измерения, незаменимые при оценке характеристик отдельных деталей и образцов простейшей формы, неприменимы при измерениях внутри сложных пространственно разветвленных деталей и сборных либо неразборных соединений. Понятно, что штангенциркулем невозможно измерить толщину стенки охлаждаемой турбинной лопатки сложной формы, также как, например, и зазор внутри неразборного клапана. Такие задачи решаются с помощью промышленной рентгеновской томографии, способной без геометрических искажений и с высокой степенью точности бесконтактно измерить размеры указанных выше структурных элементов внутри изделий любой сложности. С ее помощью достижима уникально высокая точность бесконтактного неразрушающего измерения размеров внутренних структурных элементов и их локальных дефектов, соизмеримая с точностью традиционных средств контактного измерения наружных размеров промышленных изделий. Основные ограничения информационных характеристик и возможных областей применения современных промышленных



томографических систем обусловлены несовершенством источников рентгеновского излучения — слишком низкой для машиностроительных задач величиной энергии, слишком большими размерами фокусных пятен и ничтожной удельной интенсивностью в пересчете на размеры фокусного пятна.

Все это вызывает необходимость развития новых направлений исследований, направленных на создание концепции, теории, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для преодоления дефицита исходных данных в задачах неразрушающего контроля (НК) с помощью новых эффективных математических и алгоритмических средств. На сегодня нужно уметь осуществлять реконструкцию с ограниченного количества направлений просвечивания, расположенных в угловом диапазоне меньше, чем 180° , а также в условиях применения минифокусных рентгеновских трубок с небольшими напряжениями. Снижением энергии просвечивания можно одновременно повысить разрешение, так как при этом соответственно уменьшится и размер фокусного пятна. Актуальным является вопрос разработки эффективных вычислительных технологий, которые позволили бы осуществлять высокоточную реконструкцию сложных машиностроительных деталей, например, головок блока цилиндров дизельных двигателей, при отсутствии полной информации по некоторым направлениям просвечивания. Следует также заметить, что одним из самых массовых объектов томографического контроля в авиационной промышленности и очень важным для надежности авиадвигателей являются охлаждаемые турбинные лопатки, неразрушающее измерение внутренней геометрии которых невозможно без ТВ.

Двухмерная итерационная реконструкция турбинных лопаток. При традиционном томографическом контроле подобных объектов контроля из-за резкого изменения толщины в зависимости от направления просвечивания общие требования к энергии излучения ориентируются на худшие направления, отказавшись от которых можно было бы достичь существенного улучшения, перейдя в область более низких энергий, где имеются минифокусные трубки. Типичные задачи технологического контроля лопаток — локальные измерения размеров стенок в местах утонений, обнаружение рыхлот, пор и трещин. На рис. 1, *а* показана современная охлаждаемая лопатка с простейшей внутренней структурой, изготовленная из никелевого сплава (худшее направление в месте контроля — ширина пера порядка 35 мм; лучшее направление — поперек стенки с суммарной толщиной порядка 4 мм),

на рис. 1, *б* — обработанные линейные проекции одного из поперечных сечений данной лопатки для энергии источника 125 кВ, которые содержат 1024×480 16-разрядных значений.

Интервал между 1024 значениями в каждой одноракурсной проекции равен 0,04 мм, угловой шаг между ракурсами $0,375^\circ$. Рентгеновскую съемку проводили при напряжении рентгеновской трубки 125 кВ, причем, рассеянное излучение ослаблено удаленностью от детекторов и коллимацией. Всего здесь содержится 480 проекций. Проблема заключается в том, что для того, чтобы полностью просветить данный объект контроля во всех направлениях, необходимо напряжение рентгеновской трубки 420 кВ. При таком напряжении поперечное сечение лопатки реконструируется с пространственным разрешением, достаточным для оценки необходимых технологических размеров и обнаружения дефектов сплошности и рыхлот, которые могут присутствовать в изделии. Однако при этом приходится использовать дорогостоящее рентгеновское оборудование и поскольку размер фокусного пятна для данного напряжения является достаточно большим, то существуют принципиальные ограничения для повышения пространственного разрешения для особо тонких стенок, т. е. внутренняя конфигурация лопатки может быть существенно более сложной. Для уменьшения размера фокусного пятна желательно было бы перейти к напряжению рентгеновской трубки 125 кВ, однако из-за невозможности полностью просветить лопатку в наиболее протяженных направлениях, получается реконструкция, осуществленная ФОР.

С целью улучшения последней реконструкции была проведена коррекция экспериментальных данных. Для коррекции реальных проекций использовали алгоритм, учитывающий эффект ужесточения лучей, характерный для просвечивания протяженных объектов полихроматическим рентгеновским излучением. Закон ужесточения рентгеновских лучей был определен по экспериментальным данным, полученным при просвечивании реальной лопатки известной конфигурации для напряжения рентгеновской трубки 125 кВ и модельным проекциям, полученным для САД пред-

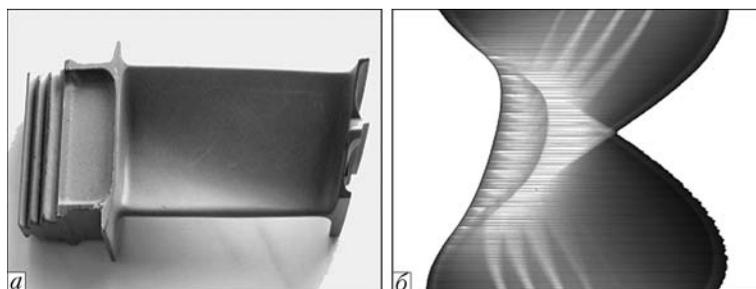


Рис. 1. Современная турбинная лопатка (*а*) и линейные проекции одного из ее поперечных сечений (*б*)

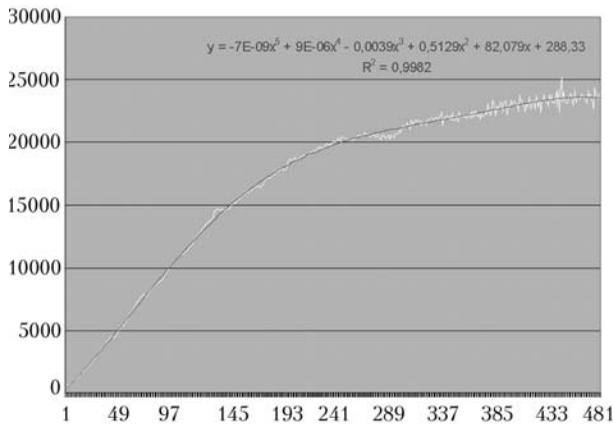


Рис. 2. Зависимость суммарной толщины лопатки на лучевых срезах от соответствующих показаний детекторов

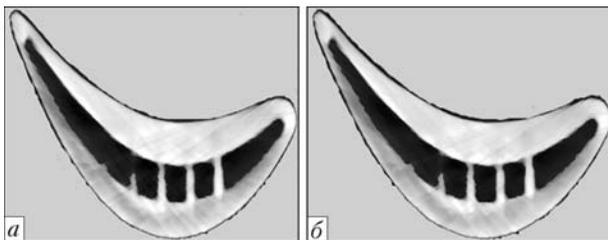


Рис. 3. Результаты итерационной реконструкции лопатки после 16 (а) и 20 итераций (б)

ставления данной лопатки, совмещенного в пространстве с реальным изделием. На рис. 2 показан график аппроксимации зависимости суммарной толщины лопатки на лучевых срезах от соответствующих показаний детекторов полиномом пятой степени.

Используя методику, основанную на предварительной коррекции реальных проекционных данных по данной зависимости, с целью устранения эффекта ужесточения лучей, была проведена итерационная байесовская реконструкция [6] по 240 проекциям. На рис. 3 показаны результаты итерационной байесовской реконструкции после 16 и 20 итераций соответственно. Полученное пространственное разрешение уже достаточно близко к тому, которое необходимо иметь по техническим условиям и, конечно, существенно лучше того, которое было получено с использованием стандартного алгоритма.

Трехмерная реконструкция промышленных объектов. С целью исследования возможности создания на территории Беларуси промышленных томографов на основе уже выпускаемого серийно рентгеновского оборудования фирмы «Адани» [13], было проведено рентгеновское сканирование вентилятора и масляного распределителя на рентгеновской установке фирмы «Адани» Securescan с неподвижным Г-образным детектором с 3136 регистрирующими элементами размером 0,8 мм (детали перемещались относительно планки детекторов на подвижной платформе). Рассто-

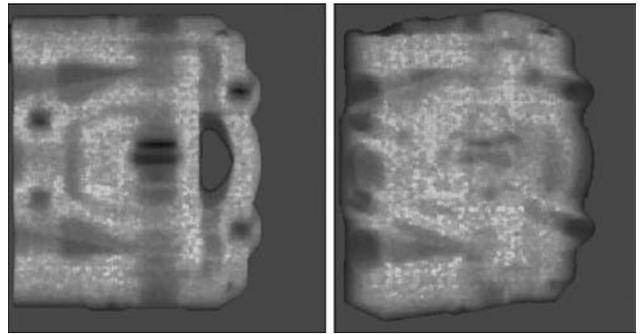


Рис. 4. Проекция масляного распределителя для 0 и 30°



Рис. 5. Сечения трехмерного изображения масляного распределителя координатными плоскостями XOY и XOZ

яние от рентгеновского источника до детектора 1799 мм, рабочее напряжение трубки 160 кВ, размер фокусного пятна 0,8 мм. Было получено 60 цифровых рентгеновских снимков вентилятора размером 1150×3136 с разрешением 0,6×0,8 мм в угловом диапазоне 180° с шагом 3° и 60 таких же рентгеновских снимков для масляного распределителя.

Особый интерес представляет реконструкция масляного распределителя. Габаритные размеры масляного распределителя 134×90×45 мм, а для напряжения 120 кВ, при котором проводили рентгеновскую съемку, можно просветить слой стали порядка 40 мм, т. е. на большинстве рентгеновских проекций очень значительны потери информации, однако, благодаря коррекции эффекта ужесточения лучей и учета дополнительной априорной информации о реальном значении коэффициента линейного ослабления стали для данной энергии просвечивания, удалось в принципе восстановить внутреннюю структуру масляных каналов. На рис. 4 показаны проекции для углов 0 и 30°. Хорошо видно насколько сильно зашумлены и как быстро деградируют проекционные изображения в зависимости от углового положения рентгеновского источника по отношению к масляному распределителю.

На рис. 5 приведены сечения реконструированного трехмерного изображения масляного распределителя координатными плоскостями XOY, YOZ и XOZ.



Выводы

Способ компенсации неполноты исходных данных на основе осуществления коррекции ужесточения рентгеновского излучения по имеющимся реальным проекциям и проекциям, полученным для известного САД представления этого же объекта контроля, показал хорошую эффективность при использовании байесовских реконструктивных алгоритмов. Дальнейшее развитие и усовершенствование данной технологии должно позволить существенно повысить эффективность томографического контроля промышленных изделий.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. В. Н. Линеву за помощь в организации рентгеновского сканирования промышленных изделий.

1. *X-ray 3D reconstruction using minimal projections and maximum a priori knowledge* / V. L. Vengrinovich, Yu. B. Denkevich, G.-R. Tillack, S. Heine // Proc. Intern. conf. «Computer methods and Inverse Problems in nondestructive Testing and Diagnostics», 21–24 Nov. — Minsk, 1995. — P. 77–82.
2. *X-ray 3D reconstruction of objects with unhomogeneous internal structure using a priori knowledge* / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev, G.-R. Tillack, C. Nockemann // Ibid. — P. 124–128.
3. *Multistep 3D X-ray tomography from a limited number of projections and views* / V. L. Vengrinovich, Yu. Denkevich, G.-R. Tillack, C. Nockeman // Review of Progress in QNDE, ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti, Plenum Press. — New York, 1997. — 16. — P. 317–323.
4. *Золотарев С. А., Венгринович В. Л.* Трехмерная реконструкция по минимальному числу проекций с внутриитерационным подавлением теневых артефактов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 2. — С. 32–38.
5. *Reconstruction of Three-Dimensional Binary Structures from Extremely Limited Number of Cone-Beam X-ray Projections. Choise of Prior.* / V. L. Vengrinovich, Yu. Denke-

- vich, G.-R. Tillack // J. of Phys., D:Applied Physics. — 1999. — 32. — P. 2505–2514.
6. *Vengrinovich V. L., Denkevich Yu., Tillack G.-R.* Bayesian 3D X-ray reconstruction from incomplete noisy data // Maximum Entropy and Bayesian Methods, ed. by W.von der Linden et. al., Kluwer Academic Publishers. — 1999. — P. 73–83.
7. *Vengrinovich V. L., Denkevich Yu., Tillack G.-R.* Limited projection 3D X-ray tomography using the maximum entropy method // Review of Progress in QNDE, ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti. Plenum Press. — New York, 1998. — 17. — P. 403–410.
8. *Bayesian Restoration of Crack Images in Welds from Incomplete Noisy Data* / V. L. Vengrinovich, Yu. Denkevich, G.-R. Tillack et al. // Review of Progress in QNDE, ed. By D. O. Tompson and D. E. Chimenti, American Institute of Physics. — Melville-New York, 2000. — 19A. — P. 635–642.
9. *Золотарев С. А., Венгринович В.Л., Тиллак Г. Р.* 3-хмерная реконструкция внутренней поверхности двухсвязного бинарного объекта по малому числу проекций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — Киев, 2001. — № 2. — С. 8–11.
10. *Трехмерная томографическая визуализация труб в процессе эксплуатации* / В. Л. Венгринович, С. А. Золотарев, Ю. Б. Денкевич, Г.-Р. Тиллак // 4-я Нац. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 2003. — С. 46–50.
11. *New technique for 2D an 3D X-ray image restoration of pipes in service given a limited access for observation* / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev, A. Kuntsevich, G. R. Tillack // Review of Progress in QNDE, ed. By D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press New-York. — New-York, 2001. — 20A. — P. 756–763.
12. *Zolotarev S. A., Vengrinovich V. L., Tillack G.-R.* 3D Reconstruction of Flaw Images with Inter-Iterational Suppression of Shadow Artefacts // Review of Progress in QNDE, ed. By D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press New-York. — New-York, 1997. — 16. — P. 216–221.
13. *Линев В. Н.* Роль современных сканирующих технологий в цифровой рентгенодиагностике // Сб. матер. Междунар. междуниверситетского семинара по диагностической и терапевтической радиологии «Радиология в медицинской диагностике». — Минск, 2003. — С. 41–49.

Гос. науч. уч-ние «Ин-т прикладной физики», НАН Беларуси, Минск

Поступила в редакцию 29.11.2008

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВАЛИКА УСИЛЕНИЯ СВАРНОГО ШВА И УПРАВЛЕНИЯ ДОЗАТОРОМ ПОЛИМЕРА ПРИ НАНЕСЕНИИ АНТИКОРРОЗИЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ СВАРНЫХ ТРУБ



Система предназначена для обнаружения центра валика усиления шва при вращении трубы и формирования сигналов управления дозировкой полимера для обеспечения однородной толщины полимерного покрытия на готовой трубе (увеличение дозировки в момент нанесения полимера на валик). Система внедрена в производство на предприятии ОАО «Харцызский трубный завод» (Украина, 2008 г.).

ИЭС им. Е.О.Патона, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Тел./факс (044) 287-67-11, 271-25-05, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua.