



*The ways of overcoming of lack of source information, allowing to reduce energy of primary X-radiation, necessary for radiography and to provide high quality of reconstruction, are offered.*

*В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, С. А. ЗОЛОТАРЕВ,  
Институт прикладной физики НАН Беларуси*

УДК 620.179.15

## ТРЕХМЕРНАЯ ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛИТЕЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ОГРАНИЧЕННЫМ МОДЕЛЬНЫМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

### Введение

В настоящее время для контроля фасонных отливок сложной формы все чаще применяют промышленную рентгеновскую томографию [1]. Использование трехмерных томографических изображений литейных изделий позволяет не только осуществлять эффективный контроль формы изделий и наличия в них дефектов, но и оказывает принципиальное влияние на промышленные технологии производства сложных изделий машиностроения, замкнув технологический цикл производства в цепочку: автоматизированное проектирование – автоматизированное производство – автоматический контроль. На ведущих машиностроительных предприятиях в развитых странах рентгеновская томография позволила вывести разработку, подготовку производства и контроль фасонных отливок различных деталей автомобильных и тракторных двигателей на качественно новый уровень. Производство ответственных изделий современного машиностроения (автомобильных, тракторных и авиационных двигателей, вертолетных лопастей, охлаждаемых турбинных лопаток) невозможно без использования современных средств измерения линейных размеров с помощью традиционных контактных методов измерения. Такие измерения неприменимы при оценке размеров внутри сложных пространственно разветвленных деталей и сборных либо неразборных соединений. Понятно, что штангенциркулем невозможно измерить толщину стенки охлаждаемой турбинной лопатки сложной формы, так же как, например, и величину зазора внутри неразборного клапана. Такие задачи решаются с помощью промышленной рентгеновской томографии, способной без геометрических искажений и с высокой степенью точности бесконтактно в интер-

активном режиме измерить размеры указанных выше структурных элементов внутри изделий любой сложности. Достижимая точность соизмерима с точностью традиционных средств контактного измерения наружных размеров промышленных изделий. Основные ограничения информационных характеристик и областей применения современных промышленных томографов обусловлены несовершенством источников рентгеновского излучения – слишком низкой для машиностроительных задач величиной энергии, слишком большими размерами фокусных пятен, малой удельной интенсивностью, а также ограничением всестороннего обзора контролируемого изделия в процессе сбора проекционных данных. Эти ограничения приводят, в конечном итоге, к недостатку исходных данных, необходимых для реконструкции.

Поэтому следует развивать новые направления исследований, нацеленные на создание концепции, теории, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для преодоления дефицита исходных данных в задачах неразрушающего контроля литейных изделий с помощью новых эффективных математических и алгоритмических средств. Нужно уметь осуществлять реконструкцию с ограниченного числа направлений просвечивания [2–4], расположенных в угловом диапазоне, меньшем чем  $180^\circ$  [5–8], а также в условиях применения большефокусных рентгеновских трубок с небольшими энергиями.

В настоящей статье рассматриваются новые возможности для промышленной томографии на базе разработанных авторами подходов к реконструкции изображений из ограниченных исходных данных, обусловленных недостаточной энергией рентгеновского излучения.

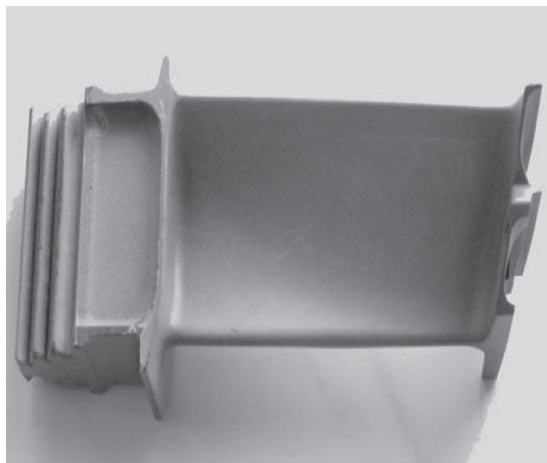


Рис. 1. Охлаждаемая турбинная лопатка



Рис. 2. Линейные проекции поперечного сечения

### 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, обеспечиваемого минифокусными трубками. На рис. 1 показана современная охлаждаемая лопатка с простейшей внутренней структурой, отлитая из никелевого сплава на заводе «Пермские моторы»; худшее направление в месте контроля – ширина пера порядка 35 мм; лучшее направление – поперек стенки с суммарной толщиной порядка 4 мм.

На рис. 2 представлены обработанные линейные проекции одного из поперечных сечений данной лопатки (синограммы), которые содержат  $1024 \times 480$  16-разрядных значений [9]. Интервал между 1024 значениями в каждой одноракурсной проекции равен 0,04 мм; угловой шаг между ракурсами составляет  $0,375^\circ$ <sup>1</sup>. Рентгеновскую съемку

проводили при напряжении рентгеновской трубки 125 кВ. Всего здесь содержится 480 проекций. Для того чтобы полностью просветить ее во всех направлениях, необходим рентгеновский источник с напряжением на трубке 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. На рис. 3 приведена реконструкция лопатки традиционным методом фильтрованных обратных проекций (ФОП) при просвечивании трубкой с напряжением 420 кВ. Естественно, что при таких энергиях приходится принимать дополнительные меры радиационной защиты, использовать дорогостоящее рентгеновское оборудование, а так как размер фокусного пятна для данного напряжения является достаточно большим, то существуют принципиальные ограничения для повышения пространственного разрешения. Поэтому для уменьшения размера фокусного пятна желательно было бы значительно снизить напряжение на трубке, однако это ведет к существенной потере ин-



Рис. 3. Реконструкция ФОП при энергии 420 кВ

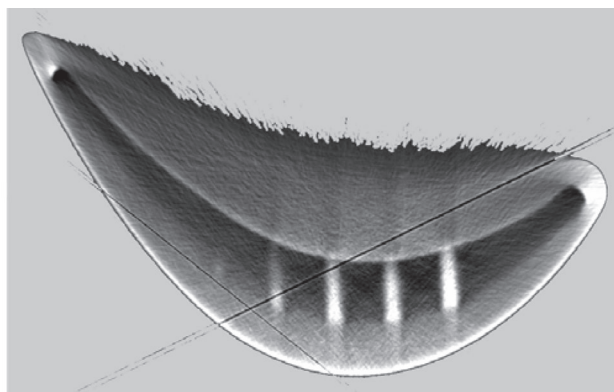


Рис. 4. Реконструкция ФОП при энергии 125 кВ

<sup>1</sup> Авторы благодарят проф. Э.И.Вайнберга за любезно предоставленные проекционные данные лопатки.

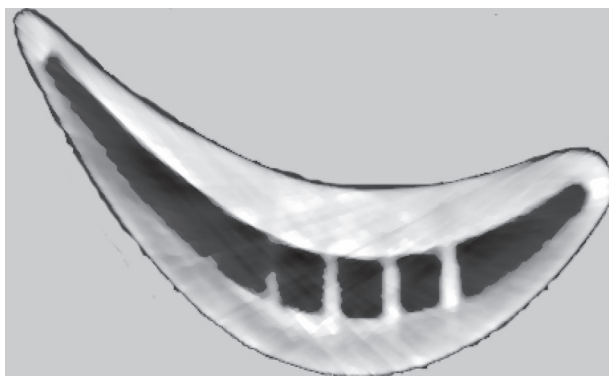


Рис. 5. Итерационная байесовская реконструкция по 240 проекциям для 125 кВ

формации, необходимой для реконструкции. Это приводит к размытию изображения, появлению артефактов и невозможности, в конечном итоге, визуализировать изображение. На рис. 4 показан результат реконструкции методом ФОП при использовании источника с напряжением 125 кВ. Причиной подобного ухудшения качества изображения является эффект «ужесточения лучей», характерный для просвечивания протяженных объектов полихроматическим рентгеновским излучением. Он имеет место при сборе проекционных данных и характеризуется нелинейным ослаблением вторичного рентгеновского излучения с увеличением толщины просвечиваемого металла.

С целью улучшения последней реконструкции была произведена коррекция экспериментальных данных. Для коррекции реальных проекций был использован алгоритм, учитывающий эффект «ужесточения лучей». После предварительной коррекции реальных проекционных данных с целью устранения эффекта ужесточения лучей была произведена итерационная байесовская реконструкция по 240 проекциям (рис. 5). Полученное пространственное разрешение уже достаточно близко к тому, которое необходимо иметь по техническим условиям и, конечно, существенно луч-

ше того, которое было получено с использованием стандартного алгоритма (см. рис. 4), несмотря на двукратное уменьшение числа использованных при реконструкции проекций.

Таким образом, способ компенсации неполноты исходных данных на основе осуществления коррекции ужесточения рентгеновского излучения по имеющимся реальным проекциям и проекциям, полученным для известного CAD-представления этого же объекта контроля, показал хорошую эффективность.

#### Реконструкция головки блока цилиндров по модельным данным

Реконструкция головки блока цилиндров была выполнена для так называемой «круговой» геометрии сбора проекционных данных. Модельные данные, используемые для реконструкции, были получены для случая, когда расстояние от конического источника до плоскости матрицы равнялось 1000 мм, а сам источник двигался по окружности радиуса 750 мм. Всего было использовано 60 проекций, что намного меньше, чем используется при классической компьютерной томографии (несколько сотен проекций). Для проверки точности реконструкции из CAD-представления головки блока цилиндров, полученного от РУП «МТЗ», было создано воксельное представление этого объекта, в котором были искусственно созданы семь отверстий во внутренних стенках. Диаметры этих отверстий изменялись от 2 до 8 мм с шагом в 1 мм. Были получены модельные проекции головки блока цилиндров как для параллельного, так и конического пучка лучей.

На рис. 6 показана головка блока цилиндров, на рис. 7 – это же изображение, но в виде поверхности, заданной в STL-формате, который был принят в качестве оптимального для оболочечного представления и применен для моделирования проекций головки (без отверстий) и также при оболочечной реконструкции данного объекта. На

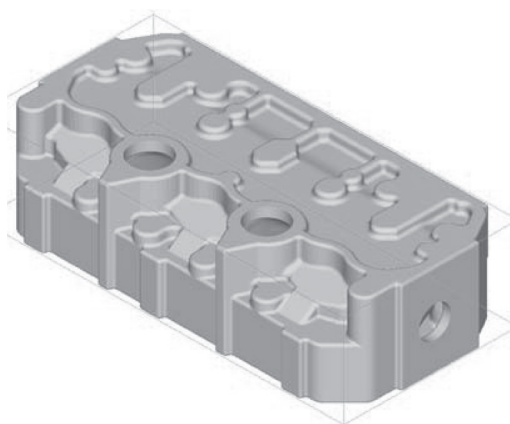


Рис. 6. Трехмерный вид головки

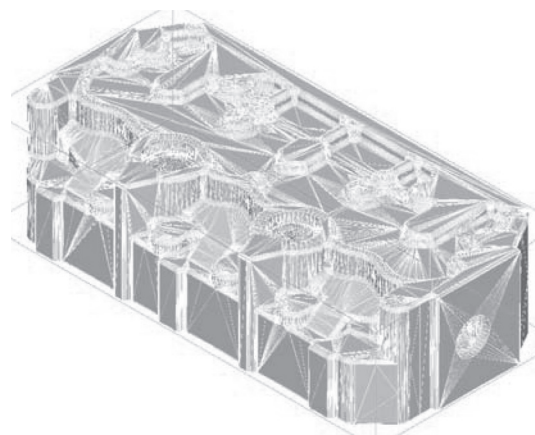


Рис. 7. Трехмерный вид головки (STL-формат)



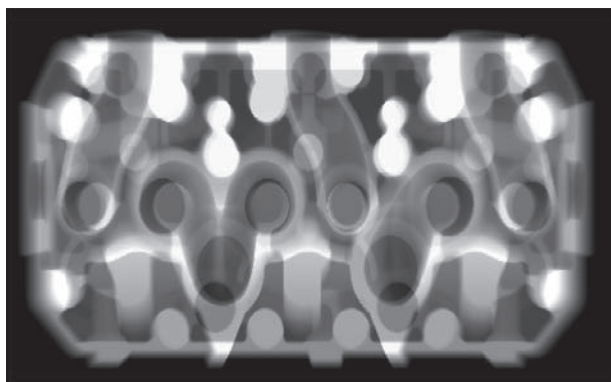


Рис. 8. Проекция головки для 0°

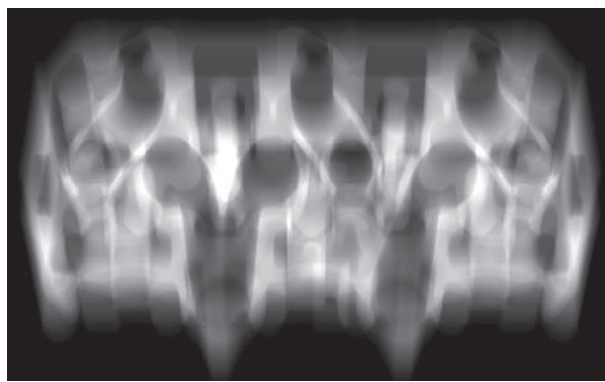


Рис. 9. Проекция головки для 45°

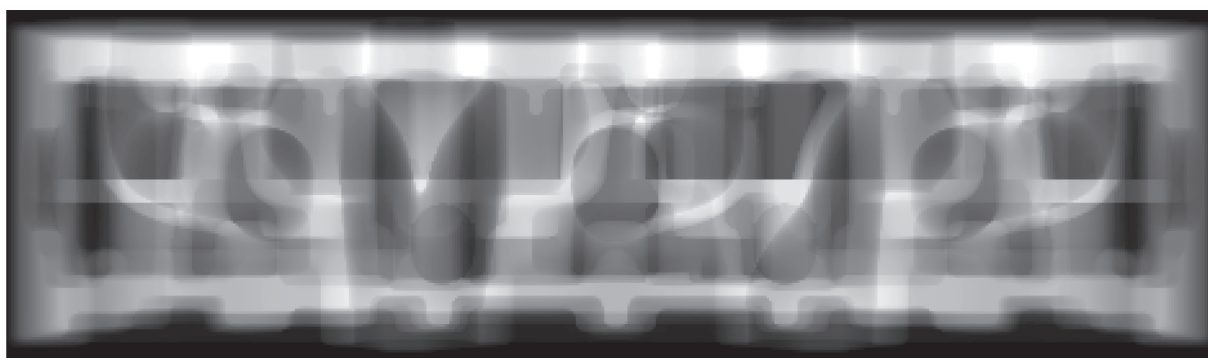


Рис. 10. Проекция головки для 90°

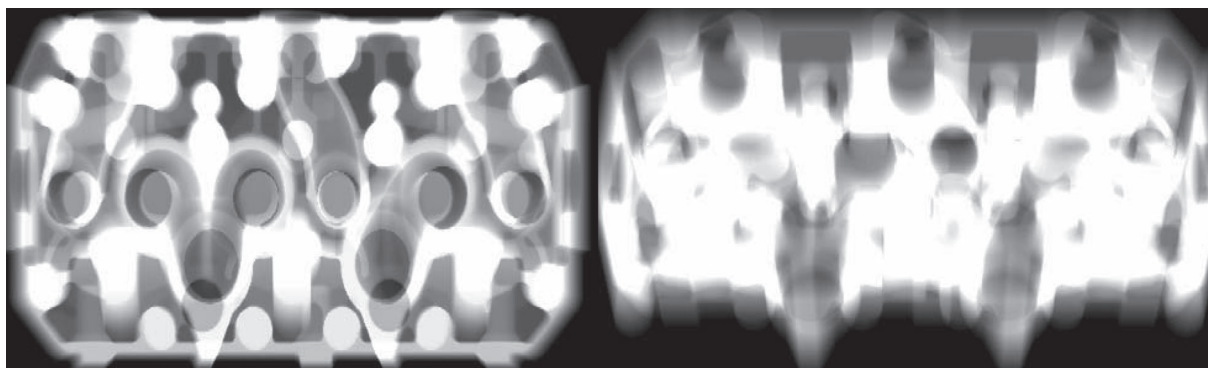


Рис. 11. Усеченная проекция для 0°

Рис. 12. Усеченная проекция для 45°



Рис. 13. Усеченная проекция для 90°

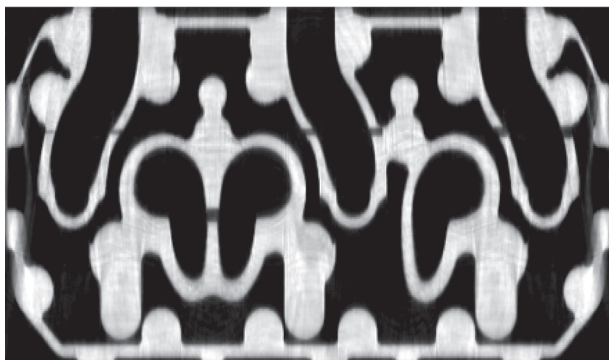


Рис. 14. Реконструкция (полные данные)

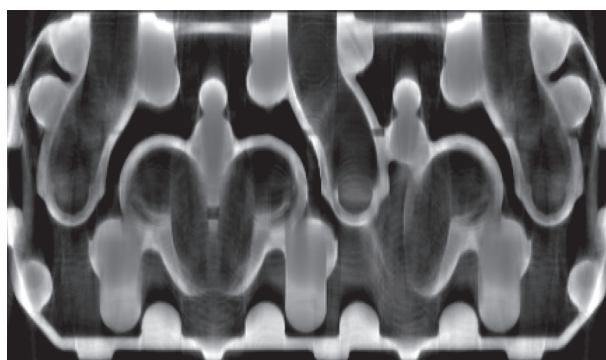


Рис. 15. Реконструкция (неполные данные)



Рис. 16. Оболочечная реконструкция (неполные данные)

рис. 8–10 показаны три проекции головки блока цилиндров для углов 0, 45 и 90°.

На рис. 11–13 показаны те же проекции, но при условии порогового ограничения проникающей способности источника рентгеновского излучения толщиной чугуна, равной 80 мм. Как видно из рисунков, потери информации, необходимой для томографической реконструкции, очень велики. На рис. 14 представлен характерный слой объекта контроля после реконструкции его изображения, содержащий дефекты при реконструкции по проекциям с полной информацией, а на рис. 15 – по проекциям, содержащим «усеченную» информацию.

Очевидно, что качество реконструированного изображения стало намного хуже. Теряется информация о внутренней структуре объекта и визуально можно определить только наиболее крупные дефекты. Потеря информации при реконструкции изображения объекта является результатом эффекта ужесточения и не может быть преодолена при использовании традиционных алгоритмов реконструкции, например ФОП.

Ранее [8] нами был разработан метод так называемой оболочечной реконструкции бинарных объектов, суть которого состоит, с одной стороны, в использовании условия бинарности, т. е. наличия внутри объекта только металла и воздуха, и с другой – в представлении объекта в виде структуры его поверхностей. Результат реконструкции показан на рис. 16. Из рисунка видно, что использование метода оболочечной реконструкции для бинарных объектов, каковыми являются большинство изделий машиностроения, позволяет компенсировать потерю информации, вызванную недостатком энергии первичного рентгеновского излучения.

### Выводы

1. Трехмерная рентгеновская томография фасонного машиностроительного литья как способ визуализации его внутренней структуры позволяет обнаруживать в литейных изделиях дефекты сплошности, а также измерять в интерактивном режиме с высокой производительностью все размеры, включая и скрытые. В этом смысле она может стать важным фактором управления качеством литья.

2. Геометрическая неоднородность изделий литья, а также ограничения, накладываемые на энергию рентгеновского излучения, в конечном итоге, приводят к недостатку исходной информации, необходимой для получения качественной томографической реконструкции изображений отливок.

3. Предлагаются способы преодоления недостатка исходной информации, позволяющие, с одной стороны, уменьшить энергию первичного рентгеновского излучения, необходимую для просвечивания, а с другой – обеспечить высокое качество реконструкции.

### Литература

1. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии / Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
2. Венгринович В. Л., Денкевич Ю. Б., Тиллак Г.-Р., Ноккеман И. К. Многоступенчатая 3-мерная рентгеновская томография для ограниченного числа проекций и обзоров // Прогресс в количественном неразрушающем контроле. Нью-Йорк, 1997. Т. 16. С. 317–323.

3. Золотарев С. А., Венгринович В. Л., Тиллак Г.-Р. Трехмерная реконструкция по минимальному числу проекций с внутриитерационным подавлением теневых артефактов. Киев, 1998, № 2. С. 32.

4. Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G. - R. Reconstruction of Three-Dimensional Binary Structures from an Extremely Limited Number of Cone-Beam x-ray Projections. Choice of Prior // Journal of Phys., D: Applied Physics. 1999. Vol. 32. P. 2505–2514.

5. Vengrinovich V., Zolotarev S., Kuntsevich A., Tillack G. - R. New technique for 2d an 3d ray image restoration of pipes in service given a limited access for observation // Review of progress in qnde. 2001. Vol. 20a. P. 756–763.

6. Венгринович В. Л., Золотарев С. А., Денкевич Ю. Б., Тиллак Г. - Р. Трехмерная томографическая визуализация труб в процессе эксплуатации // 4-я Национ. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Киев, 2003. С. 46–50.

7. Vengrinovich V., Denkevich Y., Zolotarev S., Jaenisch G. and Zscherpel U. Tomographic Reconstruction and Wall Thickness Measurement with Special Attention to Scattered Radiation for In-Service Inspection of Pipes // Research in Nondestructive Evaluation. 2005. Vol. 16. N 1. P. 3–22.

8. Венгринович В. Л., Золотарев С. А., Шлегель В., Хессе Б.-М. Двухшаговая реконструкция трехмерных изображений при ограниченном угле обзора и разреженных проекциях // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. Киев, 2007. № 3.

9. Vengrinovich V., Zolotarev S., Reshetouski I. 3D Image Reconstruction from Low Energy and Noisy X-Ray Projection Data // Proceedings of the XVII World Conference on NDT. Shanghai, China, 24–27 October 2008. P. 1–7.