

# РОССИЙСКИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТОМОГРАФЫ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ООО "Промышленная интроскопия":  
Ирина Алексеевна Вайнберг, старший научный сотрудник, к.т.н.  
Эдуард Ильич Вайнберг, президент, д.т.н.  
Сергей Геннадьевич Цыганов, старший научный сотрудник  
Вадим Борисович Сидорин, старший научный сотрудник

*Авиационное машиностроение продолжает лидировать в конкурентном освоении новых технологий и материалов с целью повышения мощности и надежности энергоустановок при одновременном снижении веса, расхода топлива и затрат на техническое обслуживание. Бурно развивается комфортабельная широкофюзеляжная пассажирская авиация, нацелившаяся на историческую задачу скоростных межконтинентальных перевозок до 1000 пассажиров. Невиданный прогресс в компьютерных технологиях и спутниковой навигации обусловил взрывное развитие беспилотной авиации, цифрового управления, роботизацию производства и применения. Продолжается соревнование за малозаметность, гиперзвуковые скорости, вертикальный взлет и посадку, а 5 поколение скоро сменится 6-м. Отработка технологии, производство и эксплуатация ответственных авиационных изделий с обеспечением высокой надежности немыслимы без использования высокоинформативных средств неразрушающего контроля качества и количественной технической диагностики.*

К сожалению, традиционные методы неразрушающего контроля ориентированы на исследование наружной поверхности или изделий простой формы типа листов или труб, но не обеспечивают количественный контроль внутренней структуры типичных для авиации сложных, пространственно развитых деталей и сборок.

Например, чем измерить толщину стенки замкнутой рубашки охлаждения или охлаждаемой турбинной лопатки сложной формы? Чем оценить величину зазоров и правильность сборки ответственного клапана, датчика или целого авиадвигателя? Как оценить качество пайки внутри сложной форсунки или многослойного неразъемного соединения? Как оценить соответствие пространственного армирования и структуры композиционной конструкции требованиям чертежа? Как гарантировать качество и надежность сложного литья, если в Вашем распоряжении нет адекватных средств неразрушающего контроля изделий произвольной формы и структуры?

Для решения этих и других подобных задач российская фирма "ПРОМИНТРО" более 20 лет разрабатывает и поставляет конкурентоспособные высокоэнергетические рентгеновские компьютерные томографы серии ВТ, позволяющие количественно исследовать

внутреннюю пространственную структуру широкого спектра авиационных изделий любой сложности [1]. Чем сложнее изделие, тем ярче проявляются уникальные информационные возможности томографов. ООО "ПРОМИНТРО" имеет высокую международную репутацию, а ее томографы многие годы успешно эксплуатируются в России, Китае, Франции, Чехии, Южной Корее, Италии и США. Например, томографы "ПРОМИНТРО" уже более 15 лет используются известной французской двигателестроительной компанией SNECMA и ведущей в области углеродных композитов южнокорейской фирмой DACC. Многие аэрокосмические предприятия Китая (в Шанхае, Сиане, Пекине) используют томографы "ПРОМИНТРО". Среди крупных отечественных предприятий, оснащенных томографами "ПРОМИНТРО", можно указать КНИИМ, АвтоВАЗ, ГосНИИмаш, ПМЗ, НПО "Сатурн".

Внешний вид современных высокоэнергетических моделей томографов ВТ-600ХА, ВТ-800ХА и ВТ-1500ХА с рабочим полем соответственно до 600, 800 и 1500 мм представлен на рис. 1 и 2. Рис. 2 позволяет рассмотреть типичные особенности необходимого рентгенозащитного помещения и приспособлений для вертикальной загрузки объектов контроля (ОК) длиной до 3 м.



Рис. 1. Внешний вид высокоэнергетических томографов ВТ-600ХА и ВТ-1500ХА



Рис. 2. Внешний вид высокоэнергетического томографа BT-800XA

Отличительные особенности высокоэнергетических томографов "ПРОМИНТРО", благодаря которым они превосходят доступные зарубежные аналоги [1]:

- широкий диапазон плотностей и размеров контролируемых изделий вследствие применения двух уникальных высокоэнергетических источников излучения (минифокусной рентгеновской трубки на 450 кВ с проникающей способностью до 50 мм стали и минифокусного специализированного ускорителя электронов на 5 МэВ с проникающей способностью более 150 мм стали);
- возможность контролировать ОК весом до 300 и даже 1000 кг;
- увеличенный диапазон рабочих полей томограмм от 50 до 600/800/1500 мм при длине зоны контроля по вертикали (без перестановки ОК) более 1000 мм;
- увеличенная ширина рабочего поля рентгенограмм ОК - до 600/800/1500 мм;
- высокое пространственное разрешение (внутри ОК диаметром до 600/800/1500 мм) до 100 пер/см во всем диапазоне энергий за счет сочетания фирменной методики локальной томографии и дополнительного коллимирования минифокусных источников излучения при увеличенном формате томограмм до 2048 x 2048;
- высокая точность бесконтактного измерения размеров внутренних структурных элементов, адекватная точности традиционных машиностроительных средств измерения (штангенциркулей и микрометров);
- уникально высокое качество томограмм, достигаемое благодаря перечисленному выше и за счет двумерной коллимации многоканальных пучков излучения с физическим подавлением вклада рассеянного излучения.

Приведенные далее примеры практического применения этих томографов для отработки технологии ответственных изделий, актуальных для современного этапа авиакосмических разработок, позволяют читателям самостоятельно убедиться в указанных достоинствах и расширяют представления о возможных областях применения компьютерной томографии [2, 3].

При анализе представленных изображений томограмм следует помнить, что каждая двумерная томограмма сечения ОК содержит от 1 до 4-х миллионов 16-разрядных цифровых значений, отражающих распределение плотности материалов в исследуемом сечении или выбранной оператором локальной зоне такого сечения. Результаты томографического контроля представляются в виде изображений и графиков распределения плотности внутри ОК, позволяющих обнаружить дефекты типа разноплотностей, пор,

трещин, включений и бесконтактно количественно измерить плотность и геометрические размеры внутренних конструктивных элементов и зазоров. Правда, делается это не по картинкам, а по цифровым файлам исходных томограмм с помощью специального программного обеспечения томографа. Однако тенденции безжалостной тотальной компьютеризации технологий таковы, что и изображения и оператор томографа скоро станут ненужным атавизмом, а результатом томографического контроля будет цифровой протокол с таблицами значений и координат критических отклонений от требований конструкторской документации.

Рис. 3-8 дополняют представления об информативности высокоэнергетических томографов "ПРОМИНТРО" при отработке технологии и сертификации достаточно крупных, тяжелых и сложных по форме и внутренней структуре

деталей и сборок из металлов (алюминиевых сплавов, титана и жаропрочной стали) [3].

На рис. 3 внутри сложного толстостенного литья отчетливо видны пор и ошибки геометрии механообработки длинных 4 мм каналов. Рис. 4 подтверждает возможность детального исследования любых сечений и правильности сборки сложного титанового направляющего аппарата компрессора  $\varnothing 600$  мм с 46 регулируемыми лопатками.

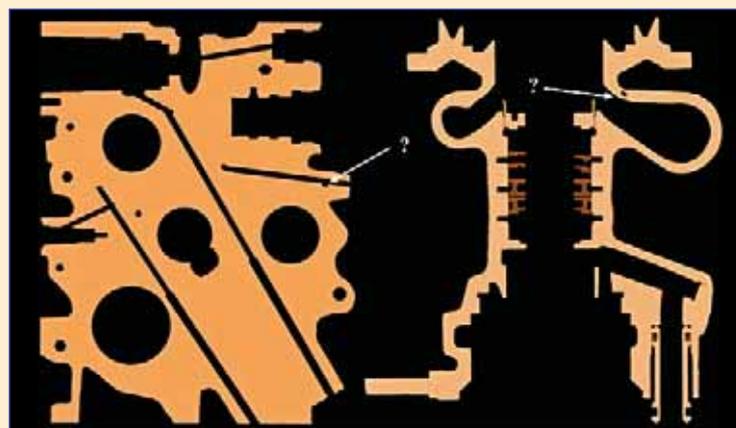


Рис. 3. Томограммы  $\varnothing 400/200$  мм сложного литья авиакосмического назначения

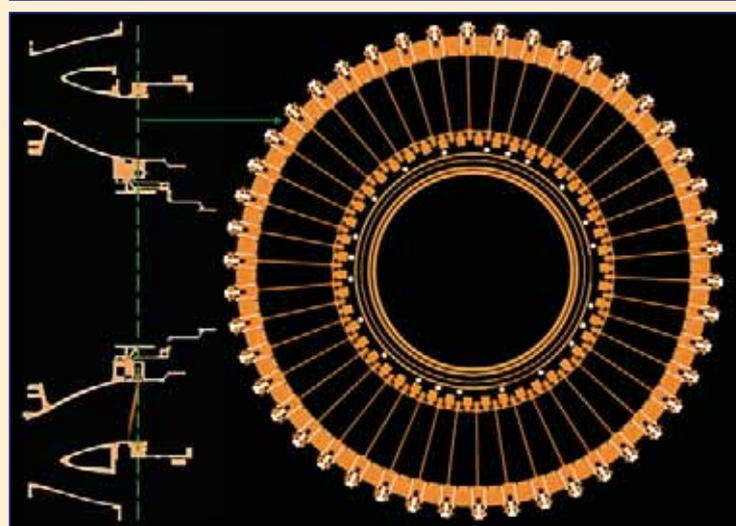


Рис. 4. Продольная и поперечная томограммы титанового корпуса направляющего аппарата компрессора ТРДД  $\varnothing 600$  мм с 46 регулируемыми лопатками

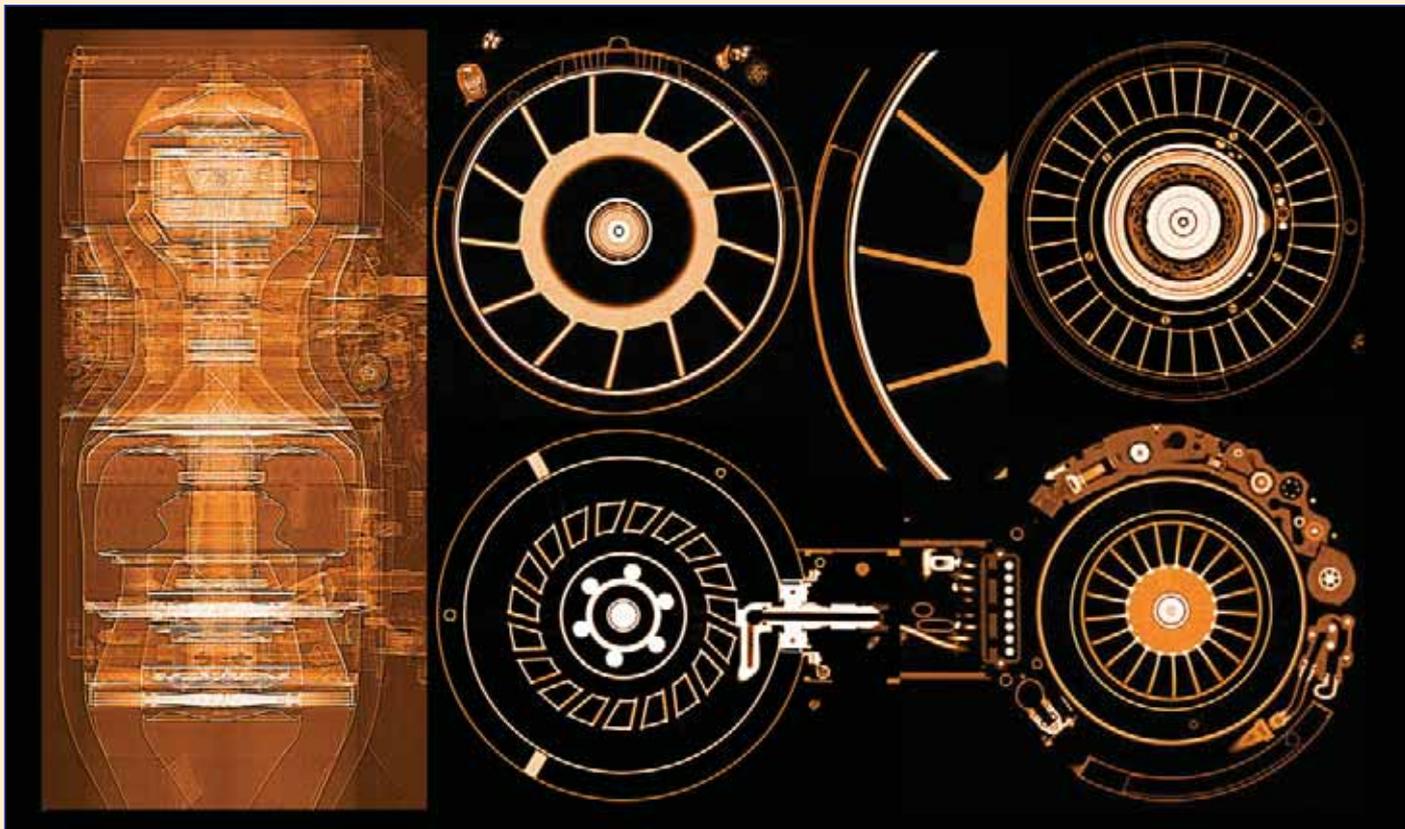


Рис. 5. Рентгенограмма и поперечные томограммы двухконтурного двухвального ТРД Ø330 мм в сборе

Рис. 5 - уникальный пример томографического контроля мало-размерного двухконтурного двухвального ТРД в сборе. Правильность сборки, качество использованных деталей и узлов, величина зазоров, состояние подшипников, положение критичных элементов

регулировки доступны для объективной сертификации.

Рис. 6 отражает реальный процесс высокоэнергетической томографии на 5 МэВ крупной лопатки из жаропрочного сплава с габаритами 170 x 80 x 350 мм и прямым получением поперечных и про-

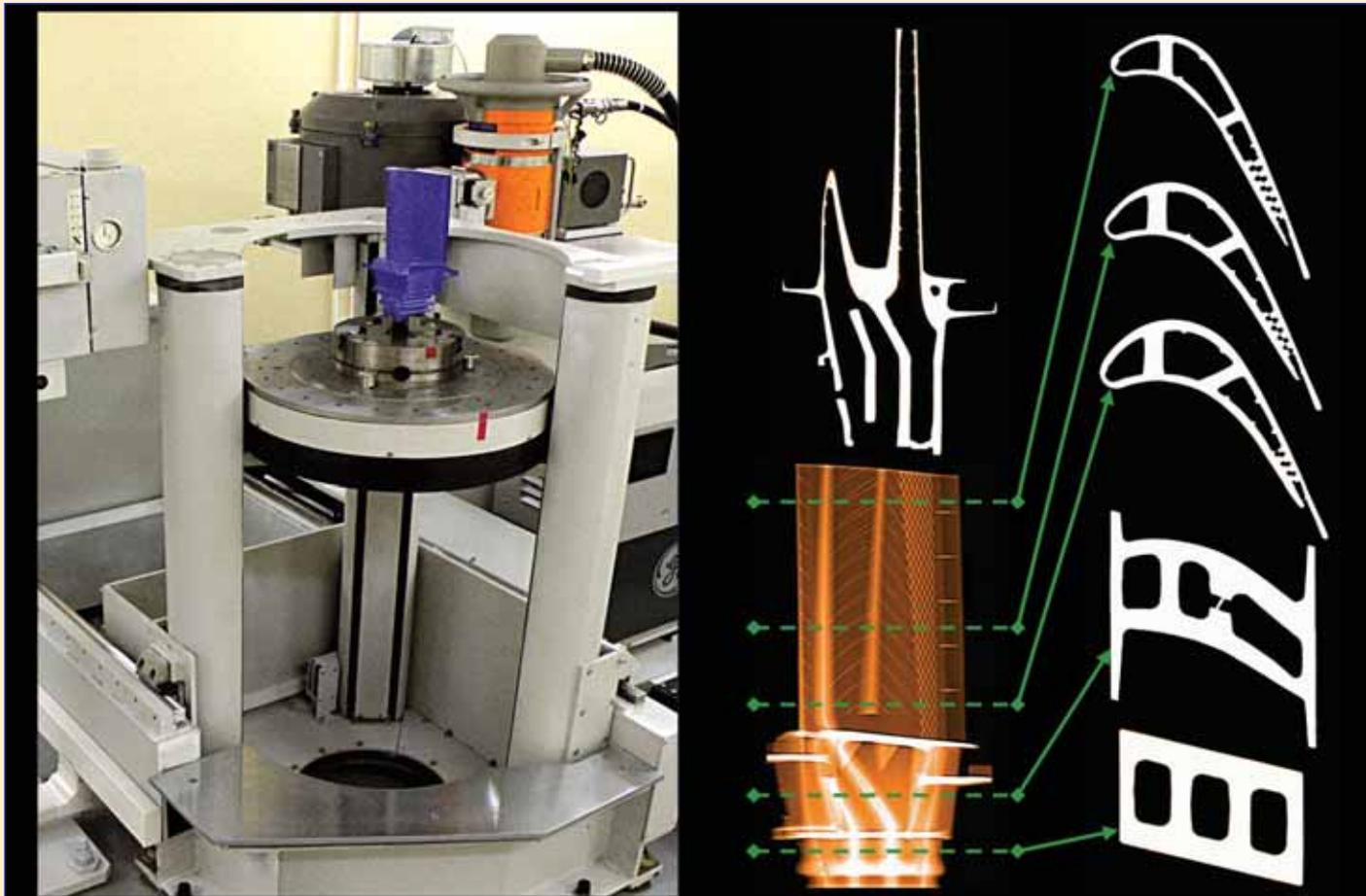


Рис. 6. Внешний вид и томограммы продольного и поперечных сечений крупной охлаждаемой турбинной лопатки из жаропрочной стали с габаритами 170 x 80 x 350 мм

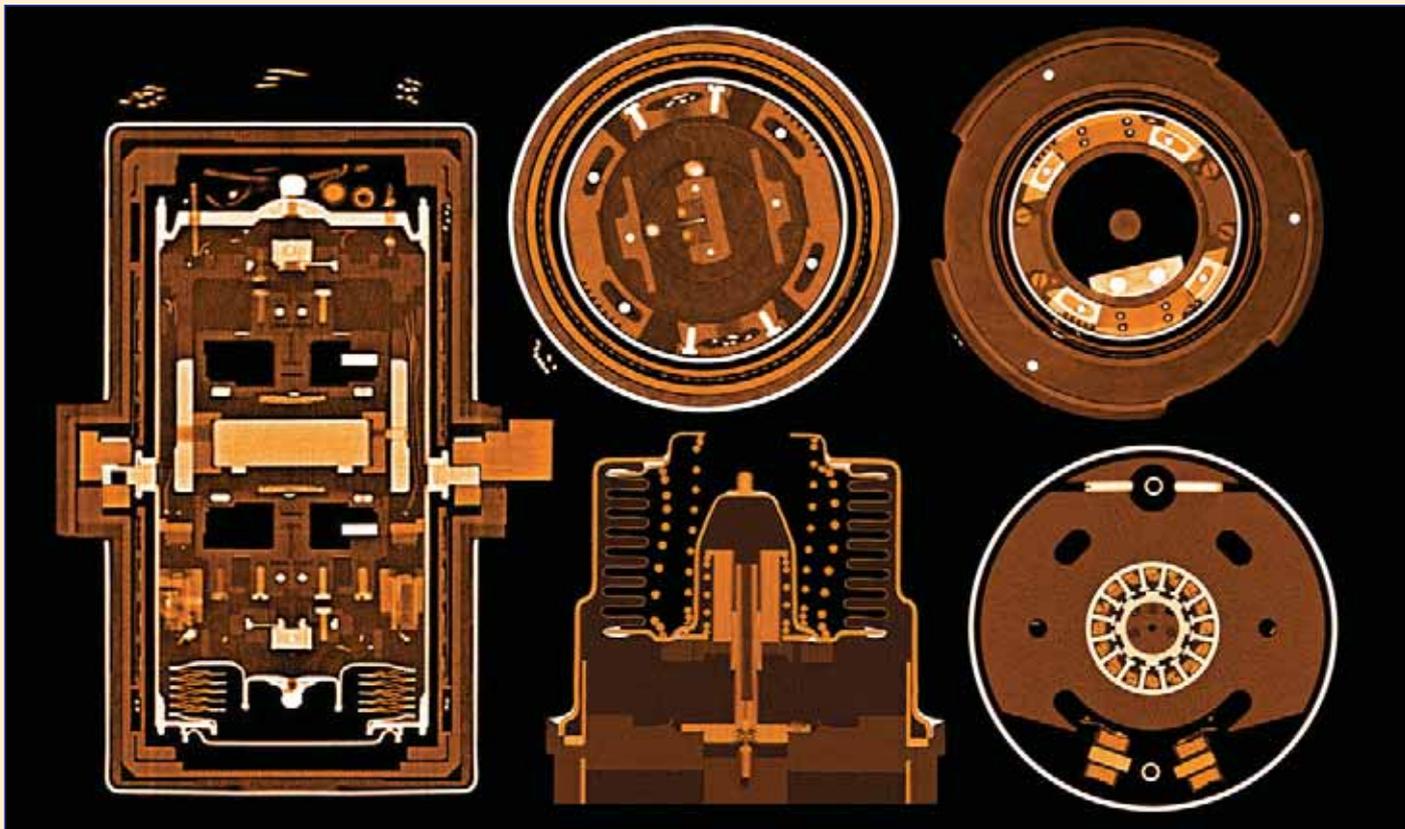


Рис. 7. Обзорные и локальные томограммы  $\varnothing 100/50$  мм датчиков аэрокосмического назначения

дольного 2-D сечения. На приведенных томограммах виден структурный дефект литья в хвостовике лопатки, а также разнотолщинность "спинки" и "корыта" пера и угонение носка входной кромки пера, обусловленные смещением и недостатками элементов стержня.

На рис. 7-8 приведены примеры томограмм внутренней структуры неразборных навигационных датчиков и теплообменников. Несмотря на предельную сложность внутренней структуры этих изделий, отчетливо прослеживается геометрия, зазоры, многочислен-

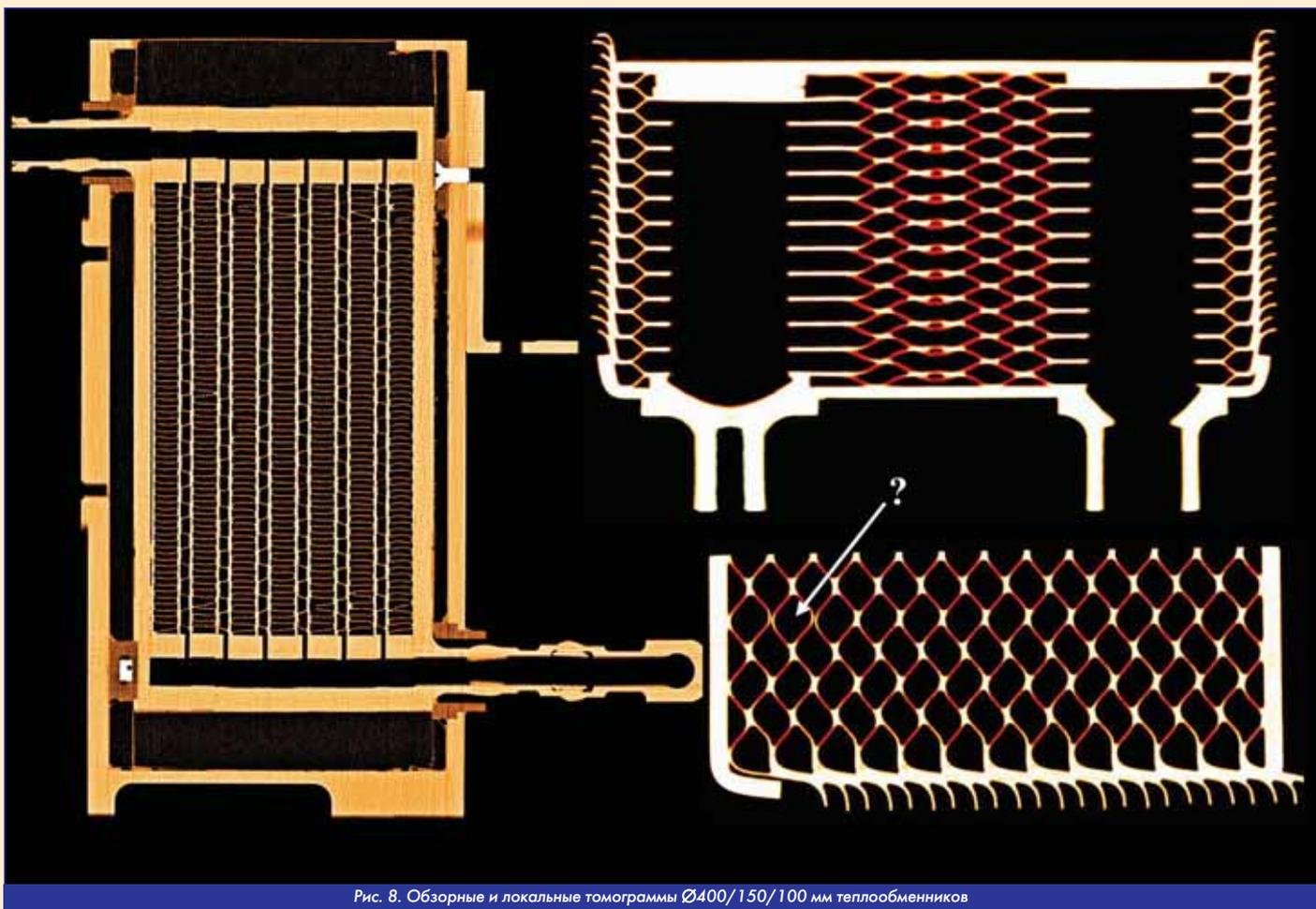


Рис. 8. Обзорные и локальные томограммы  $\varnothing 400/150/100$  мм теплообменников

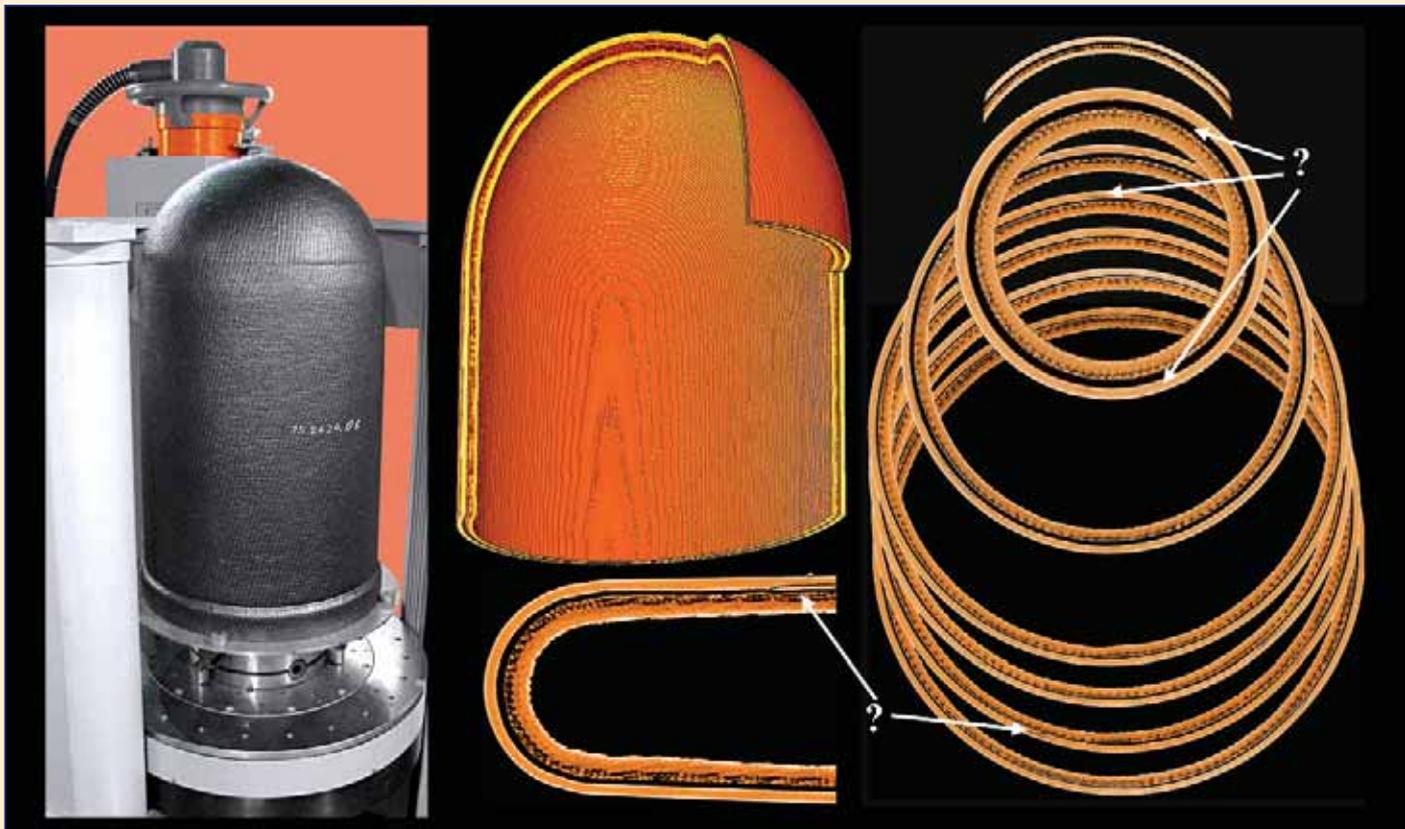


Рис. 9. Внешний вид и томограммы крупногабаритного тигля ( $\varnothing 415 \times 725$  мм) из двух слоёв пирографита на плетёном каркасе из углеродных нитей

ные паяные и сварные соединения, положение элементов регулировки. Видно, что запас высокого пространственного разрешения придает томографам "ПРОМИНТРО" универсальные свойства, позволяя эффективно исследовать не только крупные изделия из ме-

таллов, но и локальные зоны крупных ОК или достаточно малые изделия диаметром до 50...20 мм.

Как видно из рис. 9-12, универсальный характер информативности рассматриваемых томографов еще более ярко проявляется

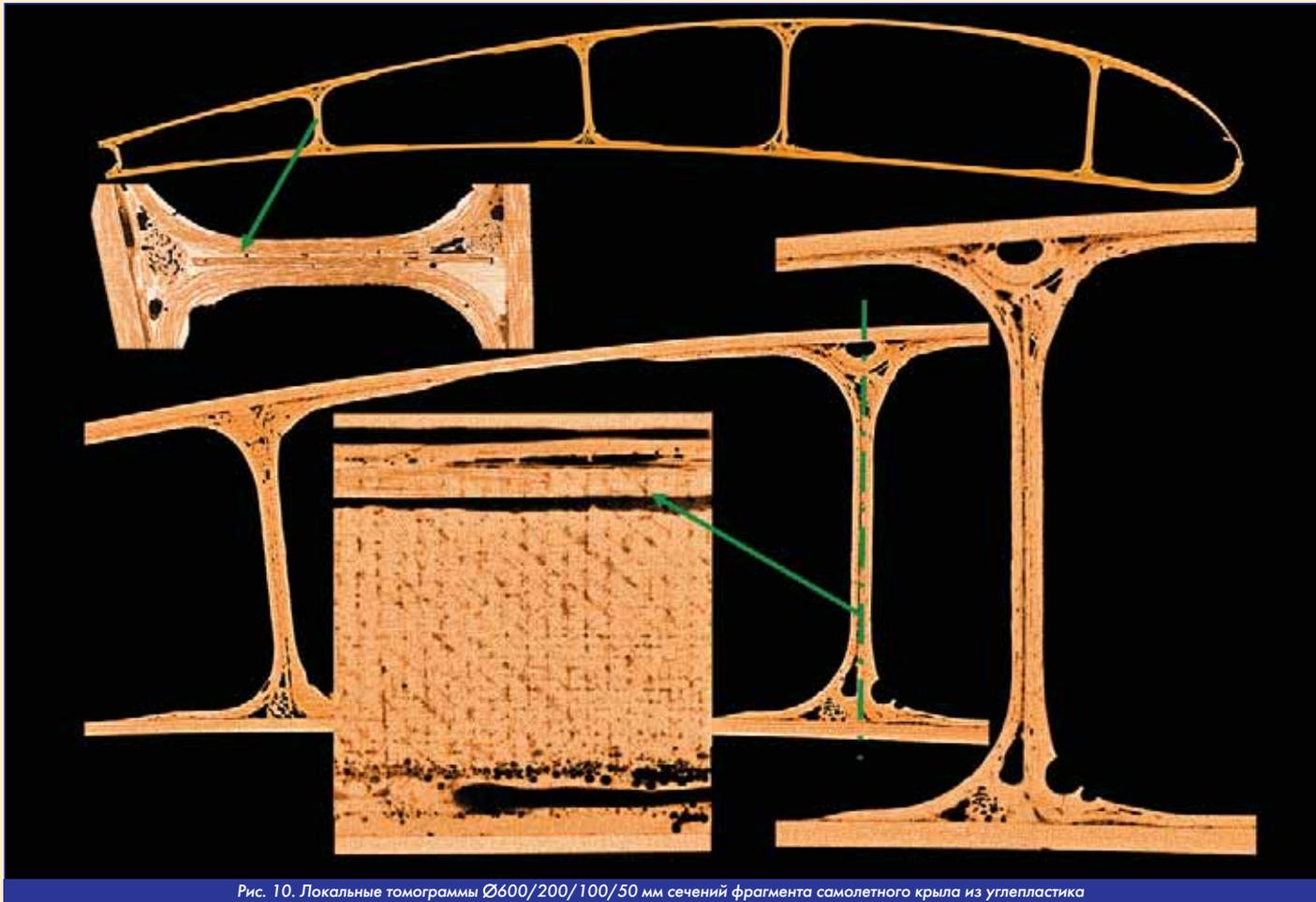


Рис. 10. Локальные томограммы  $\varnothing 600/200/100/50$  мм сечений фрагмента самолетного крыла из углепластика



Рис. 11. Внешний вид и томограммы широкохордной углепластиковой лопасти вентилятора (710 x 400 x 40 мм)

при исследовании внутренней структуры современных ответственных изделий из композитов, чему способствует и более низкий уровень плотности композитных материалов.

Внутри сложнейших изделий из углеродных композитов без

разрушения удается уверенно выявлять типичные технологические дефекты:

- отклонения геометрии от требований конструкторской документации;

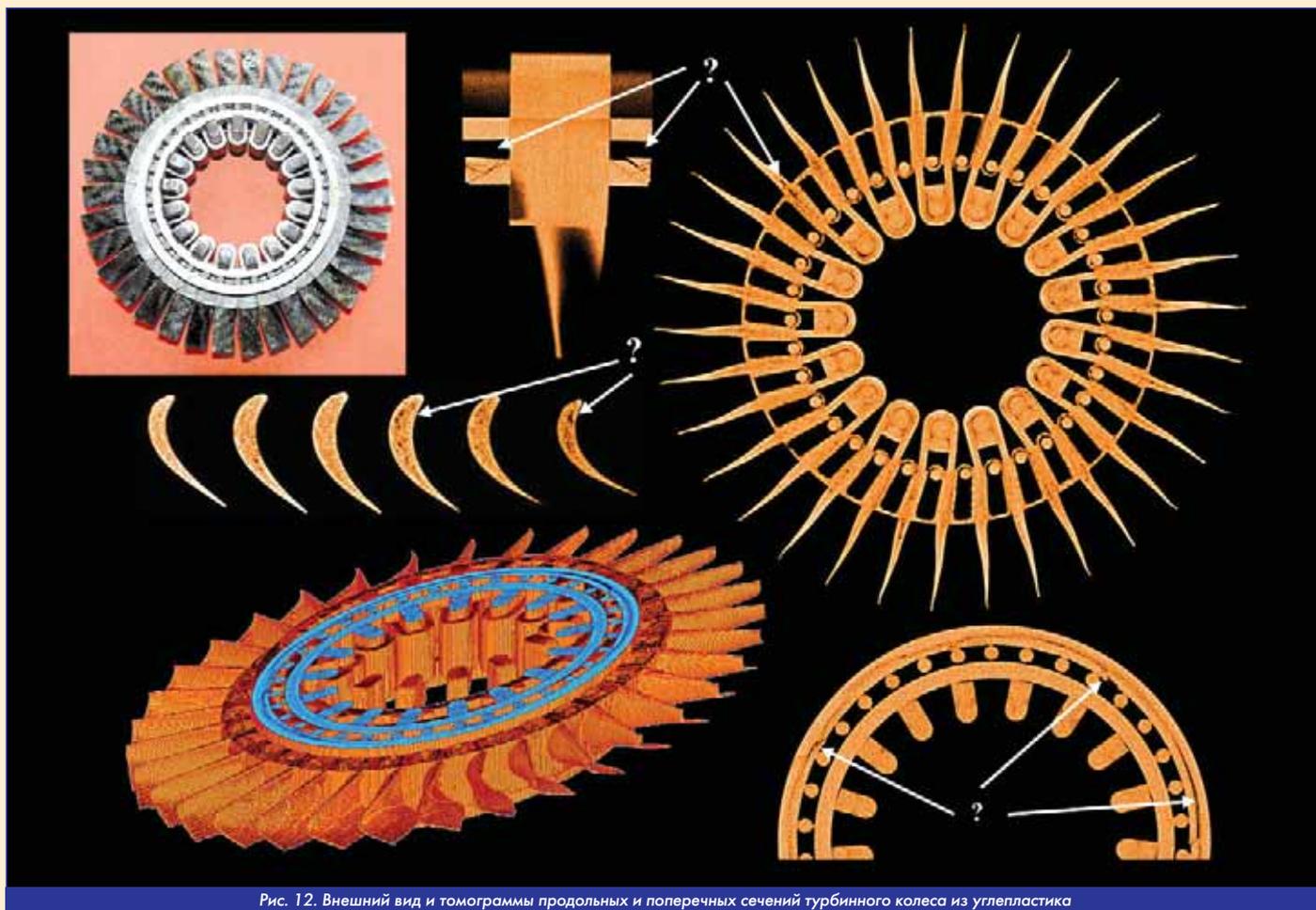


Рис. 12. Внешний вид и томограммы продольных и поперечных сечений турбинного колеса из углепластика

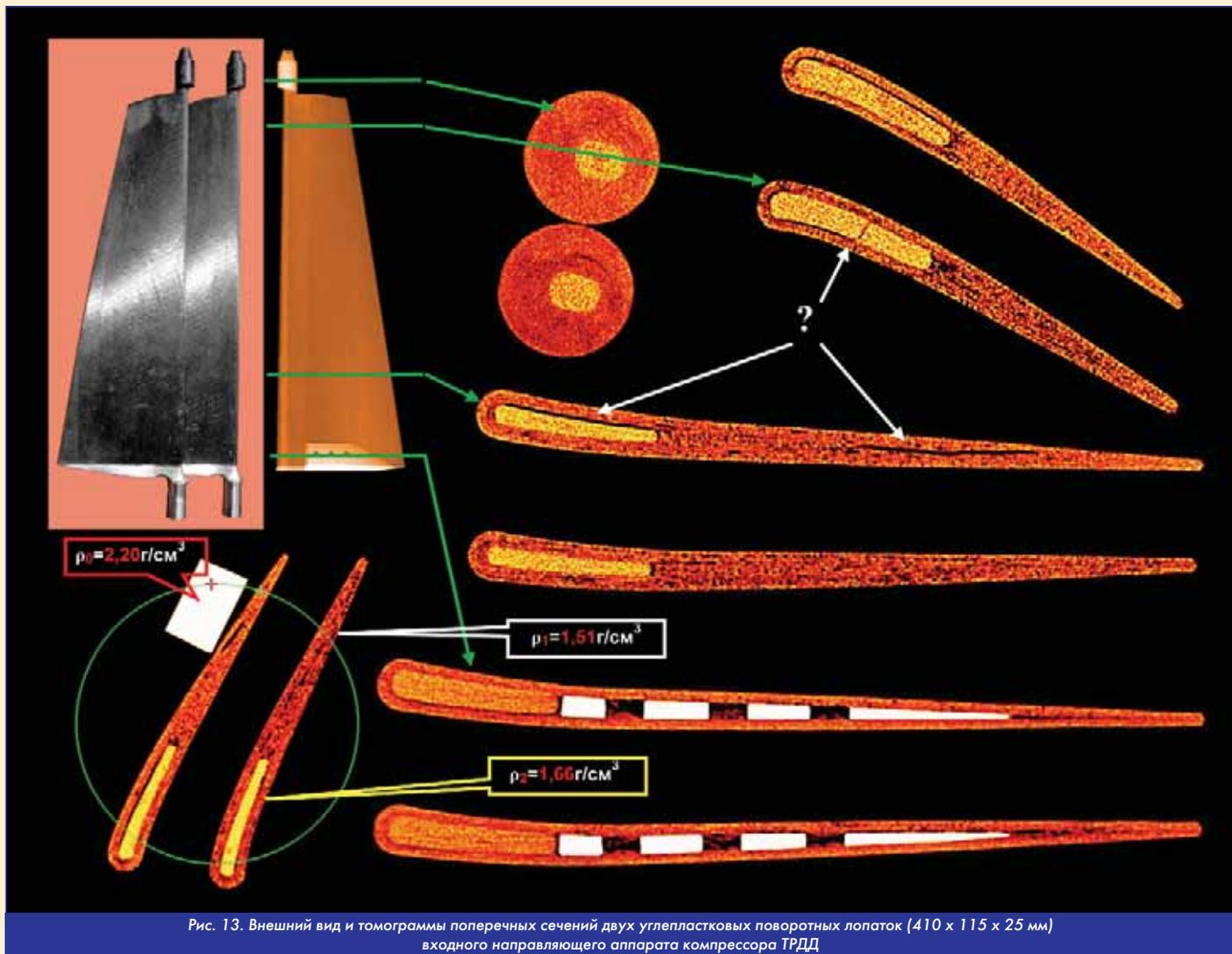


Рис. 13. Внешний вид и томограммы поперечных сечений двух углепластковых поворотных лопаток (410 x 115 x 25 мм) входного направляющего аппарата компрессора ТРДД

- разноплотности, обусловленные различиями соотношения армирующих волокон и связующего;
- непрочности и расслоения в местах сопряжения разнотолщинных элементов структуры;
- нарушения структуры армирования;
- поры, трещины и плотные включения.

В нижнем левом углу рис. 13 показан пример калибровки абсолютных значений плотности внутренних структур по томограмме с использованием контрольного образца из пирографита, не содержащего смолы и пор, с аттестованной плотностью  $\rho_0 = 2,20 \text{ г/см}^3$ .

Применение композитов в аэрокосмической промышленности, энергетике, автомобилестроении, судостроении, строительстве и оборонной промышленности переживает в наши дни небывалый виток популярности. От самолетов из многослойных деревянных композитов через эпоху тотального превосходства металлов авиакосмические технологии нового каменного века осваивают легкие, прочные и термостойкие углекомпозитные корпуса, крылья, лопасти, лопатки, турбинные колеса, тормозные диски, керамический режущий инструмент, подшипники, трубопроводы, броню, камеры сгорания и теплозащиту.

В этой связи томографическая диагностика с ее уникальной информативностью при неразрушающем изучении внутренней структуры повышенной сложности представляется чрезвычайно важной для всей технологической цепи создания ответственных конструкций из композиционных материалов.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают всех областей применения высокоэнергетических томографов "ПРОМИНТРО" в авиационном двигателестроении и шире - авиацион-

ной промышленности. Это охлаждаемые турбинные лопатки и литейные формы для них, сложное корпусное литье и сварные соединения, клапаны, форсунки, топливорастворительные агрегаты, уплотнительные кольца, подшипники, всевозможные датчики, теплозащита, обтекатели, лопасти, лопатки, турбинные колеса, элементы крыла и другие изделия из композитов и керамики, радиопоглощающие покрытия и многое другое. Однако и этой краткой заметки достаточно, чтобы оценить практические достоинства и уникальность сочетания высокой проникающей способности, высокого пространственного разрешения и режима локальной томографии высокоэнергетических томографов "ПРОМИНТРО".

Авторы признательны многочисленным специалистам КНИИМ, ГосНИИмаш, МАИ, ТПУ, ПМЗ, "Салют", "Сатурн", ЦИАМ, Китайской аэрокосмической академии, ДАСС и Снеста за помощь в определении важных областей применения и внедрении высокоэнергетических томографов "ПРОМИНТРО".

#### Литература

1. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. Универсальные компьютерные томографы для отработки технологии и сертификации ответственных промышленных изделий. Критерии выбора. - Двигатель. 2011. №4. С.20-25.
2. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И., Цыганов С.Г. О месте томографической диагностики в повышении качества турбинных лопаток. - Двигатель. 2011. № 6. С.10-13.
3. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И., Цыганов С.Г. Опыт томографической диагностики композитов. - Композитный мир. 2011. № 6. С.8-11.