

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Назарчук З. Т., Кошевой В. В.

*Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов*

Изложены результаты исследований, выполненных за последние годы в Физико-механическом институте НАН Украины, по созданию новых информационных и физических технологий диагностики материалов с использованием принципов ультразвуковой вычислительной томографии.

## 1. Введение

Задача оценки преддефектного состояния путем экспериментального определения неразрушающими методами пространственного распределения свойств материала в объеме изделия является важной задачей космического материаловедения и технической диагностики. В рамках проекта “International Space Station” [1] данной тематике уделено внимание по трем направлениям: “Material”, “Degradation” и “Diagnostics”. Как отмечено в работе [2], неизбежным этапом эволюции почти всех диагностических систем является применение томографических методов. На достаточно высоком уровне развития техники дистанционного зондирования и средств обработки данных появляется возможность реконструировать пространственную структуру среды на основе томографии. В докладе изложены результаты исследований, выполненных за последние годы в Физико-механическом институте НАН Украины, по созданию новых информационных и физических технологий диагностики материалов с использованием принципов ультразвуковой вычислительной томографии.

## 2. Особенности ультразвуковой томографии материалов

Современными исследованиями в области механики разрушения установлено, что процесс разрушения материала делится на докритическую и закритическую стадии. В связи с этим при определенных условиях допускается работа материала в режиме регламентированного разрушения. Благодаря возможности прогнозировать скорость роста дефектов возникла новая концепция “безопасного повреждения” [3], в рамках которой появление трещины не всегда есть основанием для изъятия изделия из эксплуатации. Наибольшее внимание следует уделять критическим параметрам трещины, которые характеризуют переход разрушения в закритическую, неуправляемую стадию. Современными исследованиями в области механики разрушения установлено, что процесс разрушения материала делится на докритическую и закритическую стадии. В связи с этим при определенных условиях допускается работа материала в режиме регламентированного разрушения. Благодаря возможности прогнозировать скорость роста дефектов возникла новая концепция “безопасного повреждения” [3], в рамках которой появление трещины не всегда есть основанием для изъятия изделия из эксплуатации.

Наибольшее внимание следует уделять критическим параметрам трещины, которые характеризуют переход разрушения в закритическую, неуправляемую стадию.

Процессы зарождения дефектов и формирования неоднородного распределения физико-механических характеристик (ФМХ) материала взаимосвязаны. Так, имеющиеся дефекты приводят к неоднородному пространственному распределению (ПР) ФМХ материала, а усиленное развитие неоднородного распределения ФМХ (в первую очередь, параметров напряженно-деформированного состояния (НДС)) завершается зарождением и развитием дефектов. Поэтому для оценки преддефектного состояния материала и определения областей, возможного возникновения дефектов, необходимо восстановить ПР ФМХ материала в объеме изделия.

Одними из наиболее распространенных методов определения ФМХ материалов являются ультразвуковые (УЗ) методы. Ультразвуковой контроль основан на зависимости между акустическими и механическими характеристиками материала и используется для оценки его упругих (модули упругости), прочностных (границы прочности на растяжение, изгиб и др.), технологических (твердость) и структурных (размер зерна, содержимое включений, степень междукристаллитной коррозии) характеристик и параметров НДС [4]. При этом с помощью УЗ-методов определяют только интегральные (усредненные за лучом или объемом) ФМХ материала.

Для реконструкции ПР ФМХ материала важными являются две особенности УЗ-контроля, связанные со своеобразностью контролируемых ФМХ. Первая состоит в том, что реально УЗ методом можно получить количественную информацию о акустических характеристиках материала, а те или другие механические характеристики – лишь путем вычислений, базируясь на аналитической или эмпирической (корреляционной) их связи с акустическими характеристиками материала изделия. Вторая особенность УЗ-контроля в том, что изменения величины большинства механических характеристик материала вызовут лишь незначительные изменения его акустических характеристик. Например, при разных типах обработки стали максимальные изменения скорости продольных УЗ-волн 2.2...2.5 %, а поперечных 2.9...3.2 % [9]. Диапазон изменения скоростей практически не зависит от марки стали. Поэтому ПР акустических характеристик в преддефектном состоянии материала слабоконтрастно. Это приводит к тому, что для определения АХ необходимо использовать теневые методы, а при рассмотрении распространения УЗ-волн можно ограничиться приближением геометрической акустики, линейным распространением луча, а также принципом суперпозиции и линейных отношений.

Одним из наиболее интересных объектов для применения УЗ-методов оценки физико-механических характеристик и остаточных напряжений являются сварные образцы и элементы конструкций. Особое внимание привлекают конструкции со сварочными напряжениями. Даже в сравнительно тонких листах они распределены по закону объемного НДС. Например, с увеличением толщины пластины возрастает составляющая напряжения  $\sigma_z$  (ось  $z$  направлена вдоль толщины пластины), достигая значений  $\sigma_x$

и  $\sigma_y$  при толщинах 10 см и больше. Объемные остаточные напряжения от сваривания имеют локальный характер, занимая в плоскости  $x, y$  область двух-трех толщин листа. Анализируя эпюры напряжений, рассчитанные для стальной пластины толщиной  $\delta = 16$  мм во время нагрева сосредоточенным источником, расположенным на ее поверхности [5], можно отметить, что распределение напряжений по толщине листа довольно неравномерно. Увеличение толщины пластины влияет на значение напряжений, в особенности существенно при  $\delta > 16$  мм. В зонах сварных швов действуют приблизительно равные объемные напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , которые имеют неоднородный в объеме характер и при определенных условиях могут инициировать зарождение микротрещин в местах их концентрации. Это еще раз подчеркивает необходимость неразрушающих методик и аппаратных средств для оценки неоднородного НДС и ФМХ материалов.

### **3. Ультразвуковой томограф UST2000**

Разработаны информационные технологии малоракурсной томографии для определения пространственного распределения свойств материалов в листовых изделиях при одностороннем доступе и зеркально-теневой схеме сбора данных, пригодные для практической реализации [6].

Этапным продуктом исследований в Физико-механическом институте НАН Украины стал экспериментальный образец ультразвукового томографа UST-2000 для оценки свойств материалов (рис. 1).

UST-2000 предназначенный для реконструкции методами ультразвуковой вычислительной томографии пространственного (в объеме изделия) распределения акустических материалов (скоростей распространения и затухания разных типов ультразвуковых волн) путем вычислительной обработки лучевых проекций, полученных в результате прозвучивания материала изделия, и численной реконструкции (на основе полученного распределения) ПР его механических характеристик: упругих (модули упругости, сдвига), структурных (размер зерна, степень междукристаллитной коррозии), прочностных, параметров НДС (тензор напряжений и его инварианты).

Основное информационное преимущество томографа состоит в том, что выявление и детальное изучение неоднородного ПР ФМХ материала в объеме изделия проводится оператором путем визуального анализа изображений разнообразных сечений реконструированной структуры ПР соответствующей ФМХ с возможностью количественной оценки исследуемого параметра в любой точке (локальной области) объема изделия.

Потенциально прибор такого класса может иметь разнообразные области применения. Непосредственно он лучше всего приспособлен для фундаментальных и прикладных материаловедческих исследований на листовых образцах с целью получения информации о пространственной неоднородности основных механических свойств, структуры, внутренних напряжений после соответствующих технологических процедур создания, обработки или деградации материала образца для оценки преддефектного со-

стояния материала, качества технологических процедур, влияния среды и т. п. Его можно использовать и в ультразвуковой дефектоскопии для восстановления ПР слабо-контрастных дефектов и их идентификации по форме, размерах, локализации.

Основные технические характеристики прибора следующие:

- *зондирование материала*: продольных, поперечными, поверхностными УЗ-волнами;
- *методы сбора данных*: теневой и зеркально-теневой;
- *измеренные параметры*: время распространения УЗ-импульса (time-of-flight) и затухание;
- *относительная погрешность оценки скорости*:  $10^{-6}$ ;
- *обработка данных*: 2D- и 3D-томографическая реконструкция;
- *представление результатов*: томографические (произвольные сечения) и ортографические (усредненные по толщине) изображения.

Физические и информационные технологии, заложенные в UST-2000, учитывают возможность нарушения (нестабильность) акустического контакта между поверхностью образца и акустическими преобразователями и необходимость достаточно высокой производительности и универсальность контроля. Первая особенность не вносит существенных погрешностей через информационную избыточность томографической процедуры. Для обеспечения второго требования разработана специальная структура информационной технологии ультразвуковой вычислительной томографии, которая учитывает априорную информацию о том, что важные для диагностики неоднородности материала встречаются в объеме изделия довольно редко. Суть реализованного в UST-2000 подхода, который отличается от обычно применяемого в рентгеновской вычислительной томографии, состоит в следующем:

- начальными для реконструкции являются результаты измерений (сбора данных) вдоль луча теневым или зеркально-теневым методами (лучевые проекции), что разрешает использовать методы ультразвуковой вычислительной томографии для контроля изделий разной формы;
- на первом этапе реконструкции выполняется операция обратного проектирования и полученное изображение (т. н. суммарное изображение) применяется для поиска аномальных областей (локальных неоднородностей) материала;
- на втором этапе искомая функция ПР свойств материала реконструируется фильтрацией суммарного изображения с помощью прямого и обратного проектирования.

Реализованные в UST-2000 информационные технологии позволяют исследовать две группы задач. Первая — это двумерные задачи, к которым можно отнести реконструкцию ПР ФМХ материала в тонколистовых изделиях или в поверхностном слое на основе связей между ними и параметрами УЗ-волн Лемба или поверхностных волн релеевского типа. К ним относятся задачи оценки термохимической обработки поверхности металлических изделий, картографирование адгезийной прочности защитных покрытий и др.

Вторая группа — это трехмерные задачи, к которым можно отнести восстановления ПР ФМХ в объеме изделия. Информация может быть представлена в виде 3D-, 2D-изображений отдельных сечений или ортографических изображений, которые представляют собою проекцию объемного распределения на поверхность сканирования. Особенность реконструкции трехмерного распределения, актуальной, например, для распространенных на практике толстолистовых изделий, состоит в том, что невозможно обеспечить полноту сбора проекционных данных через физические ограничения на углы ввода ультразвука в твердое тело, вследствие чего реконструкция искомого распределения возможна только с некоторыми погрешностями.

Распределение напряжений в объеме изделия есть одной из важнейших характеристик, которое определяет преддефектное состояние материала. Акустодиагностика его НДС базируется на эффекте акустоупругости, матричная теория которого [7] положена в основу инженерных расчетов, реализованных в соответствующих информационных технологиях и программах томографа UST-2000. Технологии сбора данных в UST-2000 предусматривают измерение относительных изменений времен распространения продольных и двух поперечных с разной поляризацией УЗ-волн. Учитывая тензорный характер поля напряжений, реализовано два подхода в разработке информационных технологий реконструкции. Один из них базируется на реконструкции ПР компонентов тензора напряжений. Второй учитывает то, что характеристики НДС материала можно определить через инварианты тензора напряжений. А реконструкцию ПР инвариантов в некоторых случаях (например, первый инвариант) можно свести к задаче реконструкции ПР скалярных величин, которая требует значительно меньшего количества расчетов по сравнению с реконструкцией ПР компонентов тензора напряжений.

#### **4. Экспериментальные результаты**

Новые уникальные возможности УЗ-томографа UST-2000 демонстрируют экспериментальные результаты исследований неоднородного ПР свойств материалов в объеме контрольных металлических образцов, изготовленных в виде плит. В первом образце с размерами 600×450×26 мм из конструкционной стали Ст.20 искусственная неоднородность материала наведена в центре термическим способом с использованием токов сверхвысокой частоты и точкового электрода. Учитывая температуру и продолжительность нагревания, можно допустить, что в результате термообработки структурные изменения материала не состоялись, а сформировалась зона остаточных напряжений в центральной области образца.

Второй образец из Ст.5 с размерами 600×450×28 мм, изготовленный из двух одинаковых заготовок из толстых листов постоянной толщины 40 мм путем их сваривания с следующим фрезерованием и шлифованием с обеих сторон (V-подобный шов в средней зоне). Сваривали вручную путем последовательного наложения многих пластов к полному заполнению V-промежутка. Для уменьшения продольных остаточных напряжений шов накладывали тремя отдельными участками со смещением их в направлении поперечной оси шва.

Экспериментальная реконструкция ПР некоторых ФМХ материала в объеме этих образцов проведена на базе томографа UST-2000. Использовались продольные и поперечные УЗ-волны, соответствующие 17-канальные томографические акустические преобразователи (рис. 1) и зеркально-теневой режим сбора лучевых проекций во время сканирования преобразователем вдоль поверхности плит. Рабочая частота 2.5 МГц. Реконструированные акустические изображения ПР ФМХ материала аналогичные тем, которые выводит оператор-исследователь на экран монитора в разных режимах рабочего окна при 2D- и 3D-реконструкции.

Алгоритм томографического восстановления позволяет представлять ПР ФМХ материала в объеме исследуемого образца: в виде послойных сечений, параллельных поверхности образца, или произвольных сечений, перпендикулярных к его поверхности.

На рис. 2 приведен пример представления информации о ПР относительного изменения твердости материала в рабочем окне томографа UST-2000 в режиме 3D-реконструкции. Первое (левое верхнее) — ортографическое изображение объемного распределения исследуемой характеристики на поверхность образца. Окно разрешает также выбрать те сечения, которые оператор хочет визуализировать в координатах XY (левое нижнее), XZ (правое верхнее), YZ (правое нижнее) и предоставляет необходимую текстовую информацию.

На рис. 3 представлено ортографическое изображение ПР относительного изменения модуля Юнга ( $\delta E$ , %) и модуля сдвига ( $\delta G$ , %) материала образца со сварным соединением.

Как видим, есть явная неоднородность распределения указанных характеристик в обеих зонах — в сварном соединении и в его окрестности. За пределами зоны шва ПР имеет несимметричный характер относительно оси шва. Модуль Юнга достигает минимального значения в зоне сварного шва и возрастает с отдалением от его оси. Приблизительно такой самый качественный характер имеет ПР относительного изменения модуля сдвига. Асимметрический характер ПР упругих характеристик в окрестности сварного соединения отображает тепловое поле за пределами сварного шва, которое сформировалось за счет конструкции теплоотвода. В сварном шве можно различить три локальных зоны вдоль шва, которые воссоздадут технологию последовательного наложения швов.

Результаты реконструкции ПР структурных и прочностных характеристик металла в образце представлены на рис. 4. Наблюдается повышение величины  $\sigma_v$  в зоне сварного соединения.

Приведенные результаты томографической реконструкции свидетельствуют, что ультразвуковой томограф UST 2000 дает возможность детально исследовать механические характеристики материала в разных областях объема изделия с одновременной количественной их оценкой, усредненной по объему и в каждой его точке.

## 5. Выводы

Обоснована целесообразность использования в технической диагностике информации о пространственном распределении физико-механических характеристик мате-

риала в объеме изделия, которая может быть использована для оценки преддефектного состояния материала и адекватно отображает изменения в материале, возникающие в процессе накопления в нем усталостных повреждений. Доказано, что объединение возможностей ультразвуковых методов неразрушающего контроля и информационных технологий компьютерной томографии позволяет создать качественно новые технологии ультразвукового контроля, решающие задачу реконструкции пространственного распределения свойств материала в объеме изделия. Приведена информация о новом диагностическом приборе – ультразвуковом томографе UST-2000 и проиллюстрированы его функциональные возможности в материаловедческих исследованиях.

1. Специальный выпуск, посвященный научным исследованиям и технологическим экспериментам, предложенным украинскими учеными и инженерами в рамках проекта “Международная Космическая Станция” // *Космическая наука и технология*, т. 6, 2000, № 4, 152 с.
2. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д. Томография ионосферы. – М.: Наука, 1991. – 177 с.
3. Трощенко В. Т. Прочность металлов при переменных нагрузках. – К.: Наук.думка, 1978.-174 с.
4. Методы акустического контроля металлов // Н. П. Алешин, В. В. Белый, А. Х. Вовилкин и др.; Под ред Н.П. Алешина.- М.: Машиностроение, 1989.-456 с.
5. Недосека А. Я. Основы расчета сварных конструкций.-К.: Выща школа.-1988.-263 с.
6. Кошовий В. В. Ультразвукова обчислювальна томографія плоскопаралельного шару // *Відбір і обробка інформації*, 2001, вип. 15 (91), с. 60-67.
7. Бобренко В. М., Вангели М. С., Кущенко А. М. Акустическая тензометрия.- Кишинев: Штиинца, 1991.-204 с.

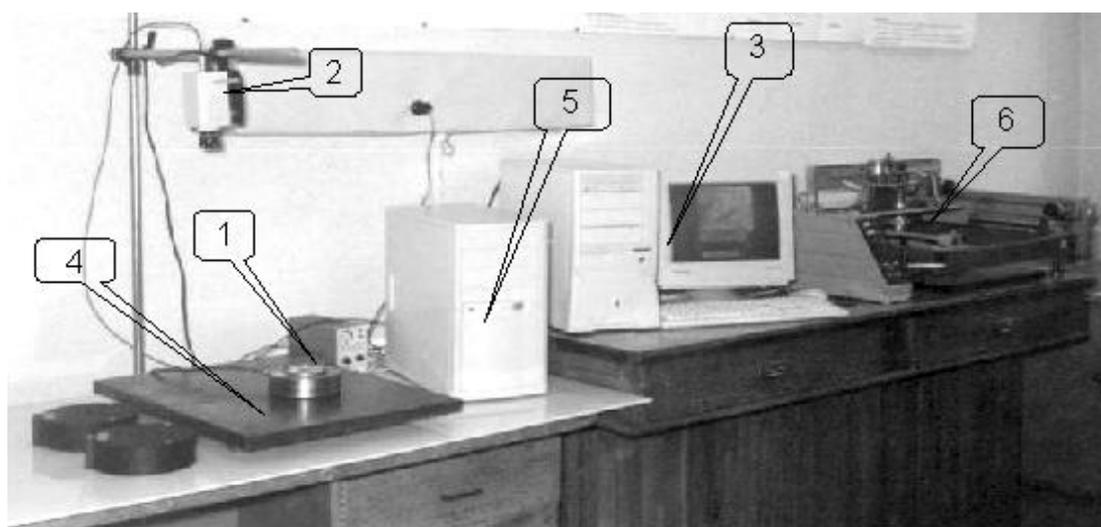


Рис. 1. Ультразвуковой томограф UST-2000 для оценки свойств материалов:  
1 – томографический акустический преобразователь, 2 – оптико-электронный измеритель координат,  
3 – управляющий компьютер, 4 – исследуемый образец, 5 – блок электроники,  
6 – механический сканер.

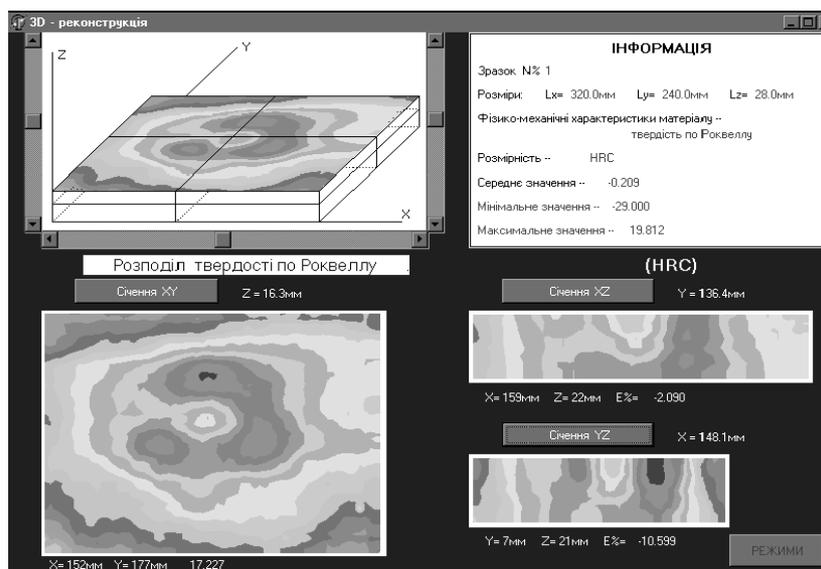


Рис. 2. Отображение результатов 3D-реконструкции твердости материала образца с термической неоднородностью в рабочем окне

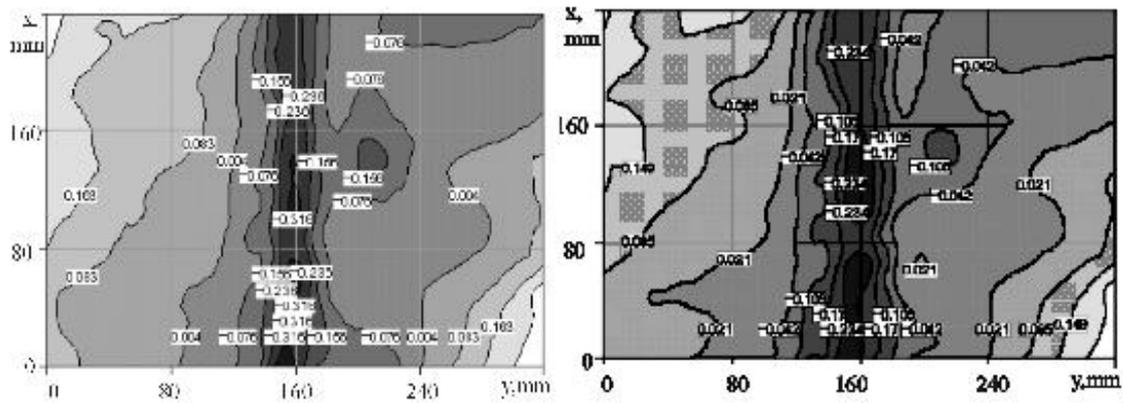


Рис. 3. Ортографические изображения в плоскости сканирования ( $z = 0$ ) объемных распределений упругих характеристик материала образца со сварным соединением: а —  $\delta E$ , %, б —  $\delta G$ , %

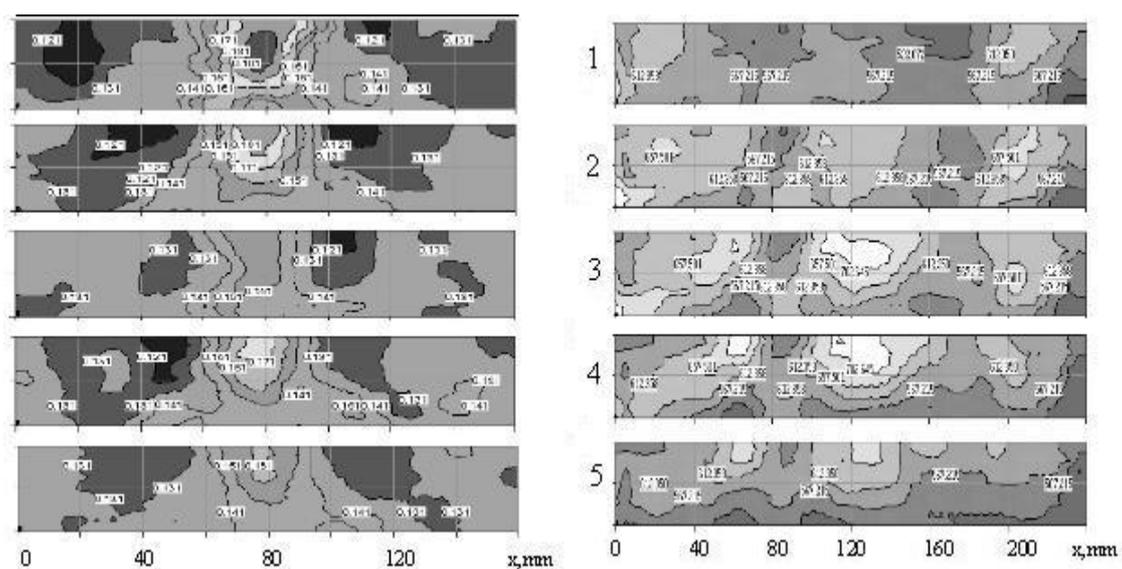


Рис. 4. Томографические изображения пространственных распределений в пяти вертикальных сечениях поперек шва размера зерна  $D$  (а) (расстояние между сечения 60 мм) и границы прочности  $\sigma_v$  (МПа) вдоль шва (б) (расстояние между сечениями 5 мм) в образце со сварным соединением