

УДК 621.002.56;621.658.562; 620.179. 16. 05

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

© В. П. Иванников, А. В. Кабакова¹

Статья поступила 23 декабря 2014 г.

Предложен метод исследования области сопряжения соединения с натягом посредством ультразвуковой томографии. Показана возможность получения полутонового изображения напряженно-деформированной области программными средствами — путем синтеза трехмерного образа области соединения (3D-томограммы) по круговым диаграммам «срезов» объекта (2D-томограммам), полученным многокурсным ультразвуковым зондированием. Подчеркнута возможность восстановления трехмерного образа исследуемой области объекта непосредственно по результатам измерений без какой-либо дополнительной математической обработки данных. Особое внимание уделено наглядности разработанного метода, расширению области его применения при автоматизации контроля качества соединений, оптимизации процесса исследования.

Ключевые слова: ультразвуковая томография; многокурсное ультразвуковое зондирование; область сопряжения соединения с натягом.

Возможность автоматизации процесса контроля применительно к ультразвуковой (УЗ) эхотомографии металлоконструкций с использованием эхоимпульсного зондирования ранее уже обсуждалась в литературе [1].

¹ Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия.

Принцип работы УЗ томографа [1] заключается в следующем. На поверхности исследуемого объекта (металла, пластмассы, керамики, жидкости и др.) возбуждается импульсное УЗ поле с помощью пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП). Ультразвук распро-

страняется в изделии, отражаясь от внутренних неоднородностей. Отраженные дефектами импульсы принимаются ПЭП и выводятся на экран (рис. 1, а, изображение А-типа, УЗ сканограмма). Если непрерывно перемещать ПЭП по поверхности изделия и использовать УЗ сканограмму для модуляции интенсивности сигнала по яркости, то можно получить на экране план сечения объекта с изображением неоднородностей (рис. 1, б, изображение В-типа). Неоднородности внутри объекта контроля будут отображены в виде точек различной градации яркости или цвета. Очевидно, что по сканограмме, так же как и по изображению В-типа, можно судить о размерах дефектной области и глубине ее залегания под поверхностью. Если перемещать ПЭП по поверхности изделия, захватывая различные сечения, то на экране можно наблюдать поперечную проекцию изображения дефектов (рис. 1, в, изображение С-типа), позволяющую определить их размеры и форму. Таким образом, полученное в данных исследованиях изображение (В- или С-типа) некоторого сечения исследуемого объекта (томоса) и считается томографическим, поскольку представляет собой 2D-томограмму. Собственно же томографическое изображение (3D-томограмму) можно получить только путем трехмерной реконструкции объекта исследования на основе синтеза изображений В- и С-типов, на что в работе [1] указано как на перспективы развития метода. И это действительно так, если учесть, что понятие «томография» впервые появилось в рентгенологии [2]. В частности, было показано, что томографический эффект достигается в трех случаях: 1) неподвижный объект и движущиеся источник и приемник излучения; 2) неподвижный источник и движущиеся объект и приемник; 3) неподвижный приемник и движущиеся объект и источник излучения. Таким способом осуществляются многоракурсное зондирование и регистрация данных об объекте в пересекающихся направлениях с последующим решением обратной задачи. Решение обратной задачи позволяет вначале синтезировать изображение слоя (2D-томограмму) в сечении объекта, подвергнутого многоракурсному зондированию, а далее путем трехмерной реконструкции объекта исследования на основе синтеза изображений отдельно взятых слоев — получить и трехмерное изображение (3D-томограмму).

К сожалению, в работе [1] отсутствуют данные о возможности применения предложенного способа исследования внутреннего строения изделий и материалов для получения количественных оценок каких-либо технологических параметров, характеризующих качество объекта исследования, а в исследованиях посадок с натягом он просто нереализуем. Однако это совсем не значит, что эхозондирование не может использоваться как метод УЗ томографии соединений с натягом (СсН), поскольку 2D- и 3D-томограммы — это в первую очередь двух- или трехмерное распределение некоторой физической характеристики, в том

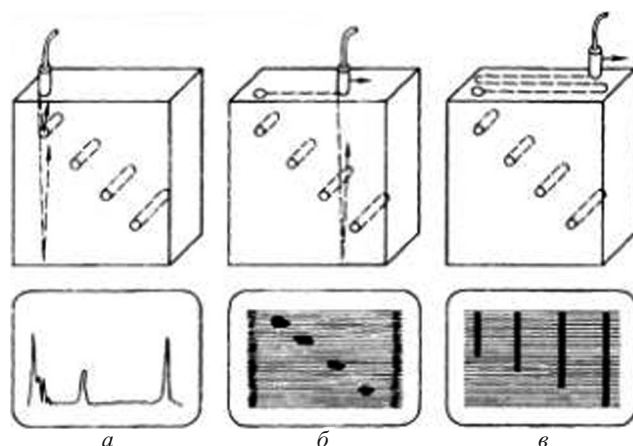


Рис. 1. Схемы построения томографических изображений при различных способах сканирования объекта контроля [1]

числе и тогда, когда существует возможность восстановления трехмерного образа исследуемой области объекта по точкам ослабления измеряемого сигнала без какой-либо дополнительной математической обработки данных, т.е. непосредственно по результатам измерения.

В наших исследованиях УЗ томографический эффект был реализован в точности по первому варианту, с той лишь разницей, что источник и приемник излучения неподвижны, а объект исследования мог вращаться и поступательно двигаться относительно источника и приемника.

Схема проведения эксперимента и анализа полученных данных измерений следующая: в каждом поперечном сечении объекта УЗ волну вводили через контактную жидкость в наружную боковую поверхность охватывающего кольца СсН по разным пересекающимся в центре объекта направлениям; в каждом поперечном сечении объекта осуществляли построение образа сопряжения СсН по точкам ослабления измеряемого отраженного сигнала по каждому направлению зондирования.

На рис. 2 приведены диаграммы затухания эхоимпульса по восьми сечениям, полученные для двух СсН (шаг — $22,5^\circ$). Подобные диаграммы ослабления акустического сигнала для разных сечений соединения как раз и представляют собой наборы многоракурсного исследования объекта в этих плоскостях — 2D-образы напряженно-деформированного состояния зоны сопряжения в заданном сечении (томосы).

Для получения трехмерного томографического образа области сопряжения (3D-томограммы) необходимость в какой-либо особой математической обработке данных измерений отсутствует, так как УЗ преобразователь посылает в объект УЗ волну, которая частично отражается от области сопряжения и возвращается к тому же УЗ преобразователю, где и регистрируется. Далее с помощью ЭВМ по отношению амплитуд 1-го и 2-го отражений от каждой точки исследуемой области сопряжения вычисляли показатели

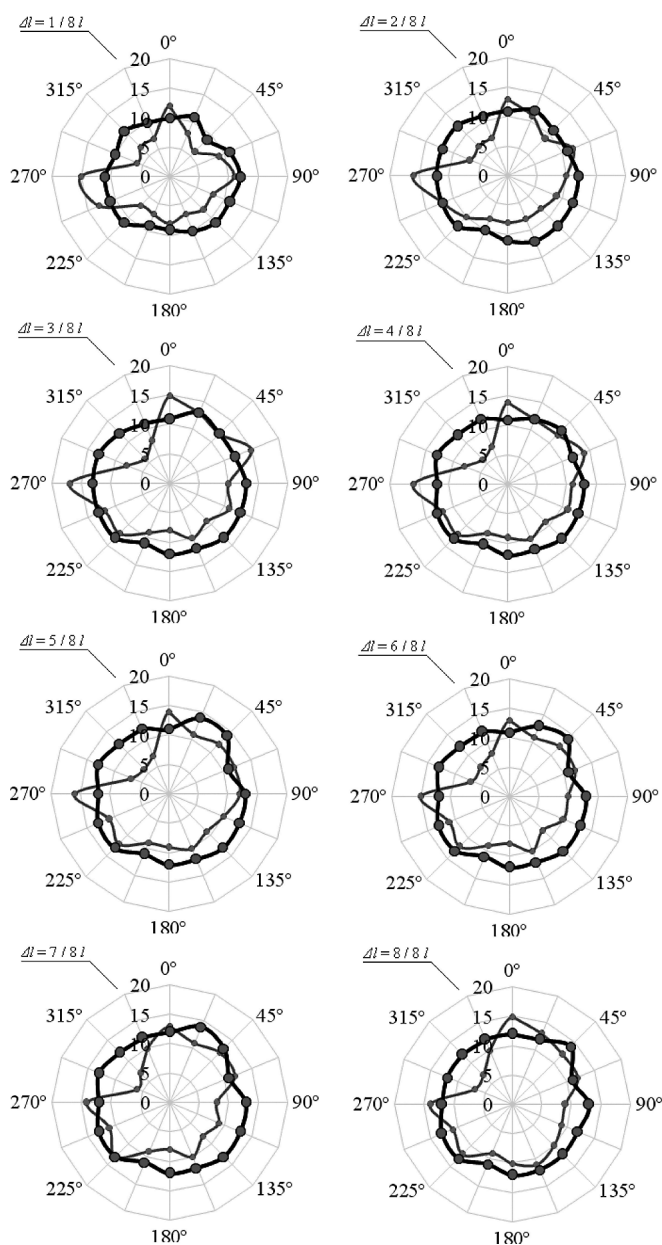


Рис. 2. Диаграммы затухания УЗ импульса по восьми сечениям: Δl — удаление от торца; l — длина сборки; \circ — натяг 140 мкм; \bullet — натяг 100 мкм

ослабления УЗ волны и выполняли математическую реконструкцию (строили трехмерный образ) поверхности сопряжения.

Поскольку разброс полученных в результате многокурсовой съемки в пересекающихся направлениях данных достаточно велик, а натяг, что вероятнее всего, изменяется относительно плавно, то экспериментальные данные целесообразно подвергнуть математическому усреднению. Для этого в первую очередь осуществляли нормирование по максимальному значению, что в последующем исключает контроль интерполированных данных по значению. Далее проводили линейную интерполяцию и выборку опорных точек (сетки) интерполяции, что обеспечивает корректные результаты преобразований. После этого по каждому

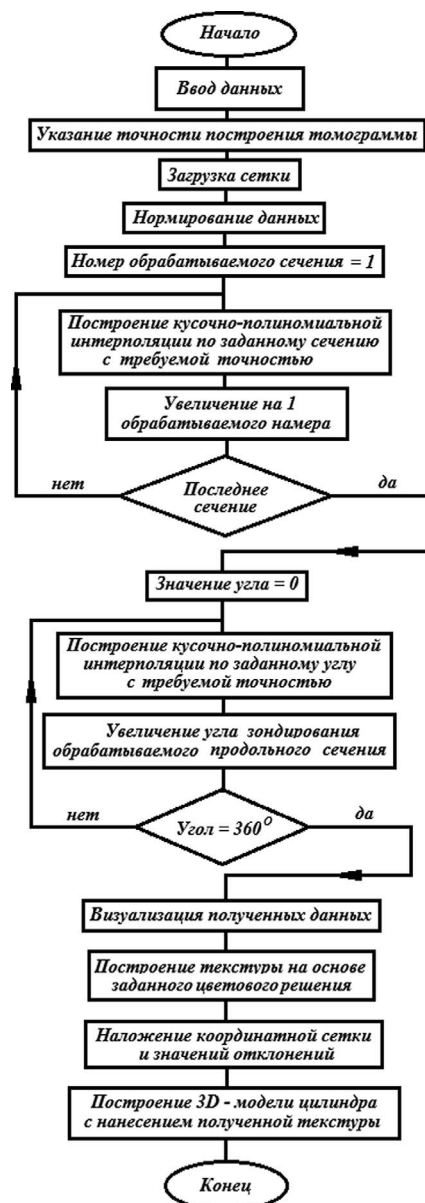


Рис. 3. Алгоритм расчета и построения УЗ томограммы СсН

из сечений осуществляли кусочно-полиномиальную интерполяцию с заданной точностью, а затем — интерполяцию по длине объекта контроля (ОК). После завершения интерполяции строили карту интенсивностей и накладывали полученную текстуру на трехмерный образ ОК. Описанный алгоритм представлен на рис. 3.

Данный алгоритм реализовали в той же среде, что и программу для расчета — в Delphi. Программа включает в себя два окна: первое — для ввода данных и указания сопутствующих настроек, второе — непосредственно для вывода полученной томограммы. Диалоговые окна программы показаны на рис. 4, а полученные с помощью программы томограммы СсН — на рис. 5.

Алгоритм реконструкции изображений получен на основе линейной интерполяции массива данных и

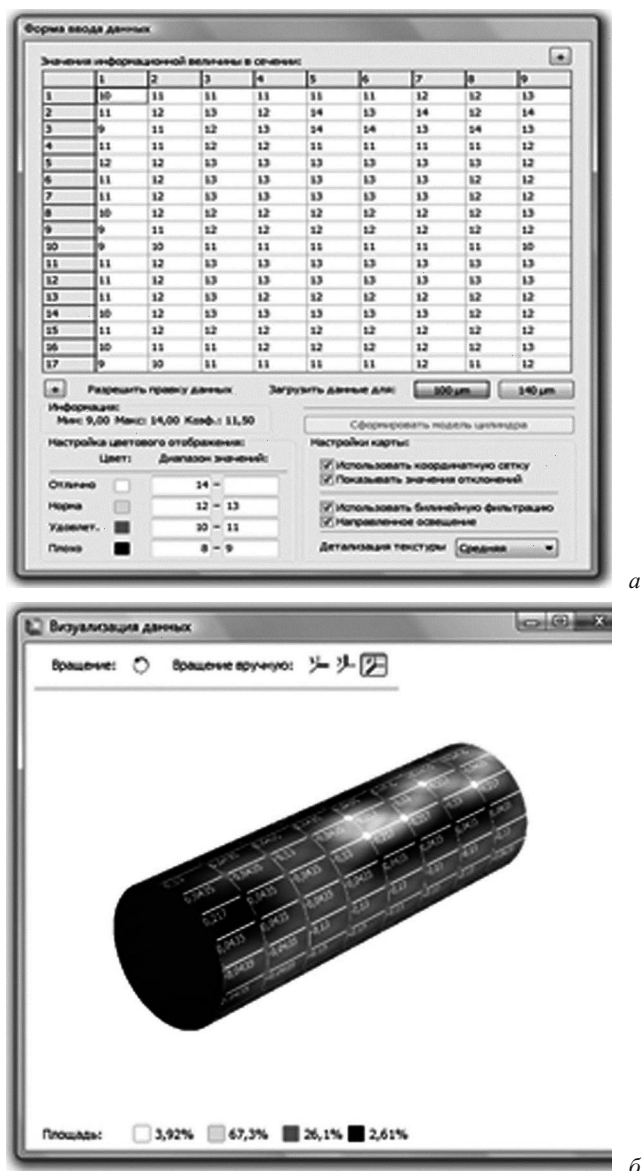


Рис. 4. Диалоговые окна программы построения томограмм: а — окно ввода данных; б — окно вывода томограмм

выбора опорных точек (сетки интерполяции) и позволяет решать задачу построения ультразвуковой 3D-томограммы при заданном взаимном перемещении источника и объекта измерений.

Пример трехмерной реконструкции структуры поля концентрации локальных напряжений в области натяга (см. рис. 4) соответствует случаю пошагового сканирования источника по окружности, охватывающей детали соединения. На основе полученных данных, характеризующих изменение от сечения к сечению двумерных УЗ диаграмм (проекций), с помощью указанного алгоритма обеспечивается реконструкция трехмерного изображения области сопряжения.

УЗ томография сочетает в себе безопасность, дешевизну, оперативность УЗ метода с высокой информативностью и достоверностью и позволяет не только визуализировать образ области сопряжения СсН, но и

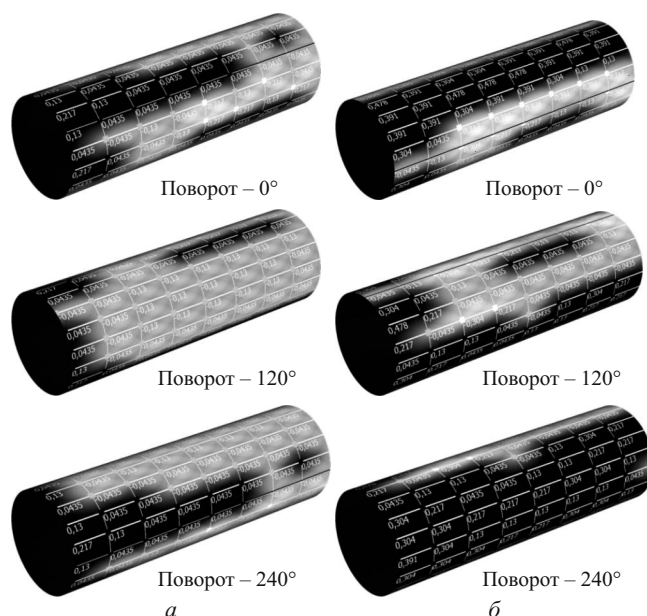


Рис. 5. Томограммы соединения с натягом 100 (а) и 140 мкм (б)

оценить реальное значение нагрузочной способности полученного соединения путем вычисления общей площади контактной поверхности соединения, на которой локальное давление соответствует заданной нагрузочной способности.

Для исключения механических перемещений УЗ излучателя и приемника можно использовать УЗ фазированную антенную решетку (ФАР), состоящую из набора независимо управляемых преобразователей. Это позволит управлять акустическим полем, излучаемым в контролируемое изделие, и «прозвучивать» его под необходимыми углами. Современные антенные решетки выполняются в виде упорядоченного набора прямоугольных элементов, как правило, из композитной пьезокерамики, которые устанавливаются либо непосредственно на контролируемое изделие (для работы на продольных волнах), либо на призму для углового ввода луча (для работы на поперечных волнах). Применение призмы ограничивает возможности ФАР из-за потерь УЗ энергии в материале призмы и на трансформацию волн на границе призма — контролируемый металл, а также ограничивает сектор сканирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самокрутов А. А., Шевальдыкин В. Г. Ультразвуковая эхотомография металлоконструкций. Состояние и тенденции / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 1. С. 50 – 59.
2. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. — М.: Мир, 1990. — 288 с.

REFERENCES

1. Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Ul'trazvukovaya ékhotomografiya metallokonstrukttsii. Sostoyaniye i tendentsii [Ultrasonic echo-tomography of metal structures. Situation and tendencies] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. No. 1. P. 50 – 59 [in Russian].
2. Natterer F. Matematicheskie aspekty komp'yuternoi tomografii [Mathematical aspects of computer tomography]. — Moscow: Mir, 1990. — 288 p. [Russian translation].