

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛА ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УЗ ТОМОГРАФА UST-2000

В. В. КОШЕВОЙ, О. Е. ЛЕВИЦКИЙ, А. Б. ЛОЗИНСКИЙ

Рассмотрен УЗ вычислительный томограф UST-2000, разработанный в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины, в основу процедуры восстановления изображений которого положены закономерные аналитические связи между соответствующими физико-механическими (ФМХ) и акустическими характеристиками материала. Предназначен для определения пространственного распределения ФМХ в контрольных металлических толстолистовых образцах.

UT computing tomograph UST-2000 is considered, which is developed at G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. In this instrument image restoration procedure is based on regular analytical links between the appropriate physico-mechanical (PMC) and measured acoustic characteristics of the material. The instrument is designed for determination of spatial distribution of PMC in the reference metallic plate samples.

Основой УЗ реконструктивной томографии являются закономерные аналитические связи между соответствующими физико-механическими и измеренными акустическими характеристиками материала (скорость распространения разных типов волн, коэффициент затухания) [1–3]. Собственно аналогичные измерения положены в основу процедуры УЗ томографического восстановления изображений в УЗ вычислительном томографе UST-2000, разработанном в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАНУ в рамках проекта НТЦУ (STCU) № 612. Этот томограф предназначен для определения пространственного распределения (ПР) ФМХ или остаточных напряжений в объеме материала в контрольных металлических толстолистовых образцах [4, 5].

Основой метода томографического восстановления изображений ПР ФМХ в исследуемых контрольных образцах (КО) материала путем регистрации лучевых проекций служит измерение времени распространения УЗ волны вдоль фиксированного пути L при прозвучивании этого образца УЗ колебаниями определенного типа фиксированной частоты под определенным ракурсом β (рис. 1) в разных точках его поверхности [6–8]. Здесь L — путь распространения УЗ волны; K — фиксированная база УЗ пары излучатель (И) — приемник (П), которая определяет максимум амплитуды принятого сигнала при данном угле ввода; β — вертикальный угол прозвучивания, или угол ввода.

Пусть ПР скорости распространения УЗ колебаний в двумерном сечении исследуемого КО описывается функцией $V(x, y)$ или адекватной функцией медленности УЗ колебаний $b(x, y)$, где $b = 1/V$. Тогда временная лучевая проекция определяется как

$$P_{\beta} = \int_L b(x, y) dL, \quad (1)$$

где β — угол, под которым получена проекция, отвечающий углу ввода УЗ колебаний в материал образца.

Для реконструкции внутренней структуры распределения ФМХ на основе лучевых проекций (1) необходимо знать полную систему лучевых проек-

ций для разных значений азимутального угла (угла поворота) положения пары И–П в плоскости поверхности сканирования в интервале $0 \dots 360^\circ$. Они представляют собою множество лучевых проекций, полученных при сканировании вдоль поверхности образца в заданном поле контроля с некоторым шагом при разных азимутальных углах.

В УЗ томографе UST-2000 УЗ блок прозвучивания представляет собою монолитную конструкцию, в которой по периметру круга равномерно размещены семнадцать УЗ пар с углом ввода 60° . Это обеспечивает прозвучивание образца в азимутальной плоскости с шагом 10° в интервале $0 \dots 360^\circ$ без применения системы механического поворота томографического блока прозвучивания.

Особенность соотношений, связывающих значения соответствующих ФМХ с измеренными скоростями УЗ волн, заключается в том, что для получения на их основании полезной информации нужна высокая точность определения скорости. В этом случае первоочередной интерес представляет измерение не столько абсолютной величины скорости УЗ волны, сколько ее изменений, причем чувствительность канала измерения должна быть достаточно высокой, поскольку возможные изменения скорости могут иметь порядок $0,1\%$ и менее ($0,01\%$), если речь идет о восстановлении пространственной структуры распределения остаточных напряжений [9].

В данной работе рассматриваются канал высокоточного измерения временных проекций УЗ томографа UST-2000, реализованного по принципу измерителя временных интервалов (ИВИ) методом автоциркуляции [10], и результаты его экспериментальных исследований в составе электронного блока томографа. Цель исследований — получение

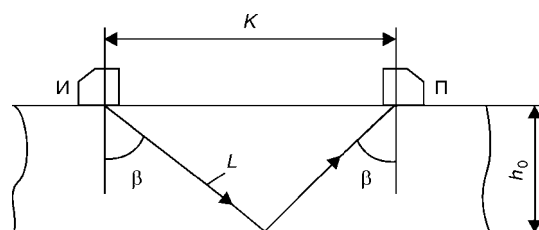


Рис. 1. Схема прозвучивания контрольного образца (обозначения см. в тексте)

реальной оценки точности и чувствительности сверху в реальных условиях проведения временных измерений.

Технические требования к блоку измерения временных интервалов. Оценим в абсолютных единицах минимальный временной дискрет, который должен фиксировать ИВИ. Это позволяет получить еще одну аналитическую оценку, помимо чувствительности, суммарной погрешности и временной нестабильности ИВИ, которые необходимо обеспечить аппаратно.

Рассмотрим геометрию распространения УЗ волны через зону неоднородности ΔL , в которой скорость V_2 отличается от скорости V_0 в основной зоне материала (рис. 2). При отсутствии неоднородности время пробега УЗ волны будет

$$T_0 = L/V_0, \quad (2)$$

а при учете неоднородности соответственно

$$T_{\Sigma} = \frac{L - \Delta L}{V_0} + \frac{\Delta L}{V_2} = \frac{L + \Delta L(V_0/V_2 - 1)}{V_0}. \quad (3)$$

Представим скорость V_2 относительно V_0 как

$$V_2 = V_0(1 \pm \delta_V), \quad (4)$$

где δ_V — относительное изменение скорости в зоне неоднородности. С учетом (4) соотношение (3) запишем в следующем виде:

$$T_{\Sigma} = \frac{L}{V_0}(1 \pm \frac{\Delta L}{L} \delta_V). \quad (5)$$

Отсюда относительное изменение времени распространения за счет неоднородности

$$\delta T_0 = \pm \frac{\Delta L}{L} \delta_V, \quad (6)$$

или в абсолютных единицах времени

$$|\Delta T| = T_0 \frac{\Delta L}{L} \delta_V = \frac{\Delta L}{V_0} \delta_V. \quad (7)$$

Видно, что абсолютное значение изменения времени распространения, которое нужно фиксировать, зависит от длины зоны неоднородности вдоль пути распространения УЗ волны и от относительного изменения скорости в этой зоне. Соотношения (6) и (7) позволяют получить оценку относительной и абсолютной чувствительности ИВИ при заданных величинах L_{\max} , L_{\min} и δV_{\min} .

При $L_{\min} = 5$ и $\delta V_{\min} = 0,01\%$ ($\delta V_{\min} = 10^{-4}$) необходимая чувствительность тракта ИВИ в абсолютных единицах времени для случая распространения поперечных УЗ волн ($V_{0r} = 3,2$ мм/мкс), согласно формуле (7), составляет ≈ 156 пс.

Суммарная погрешность тракта ИВИ, значение которой должно быть хотя бы в несколько раз меньше значения абсолютной чувствительности, составляет

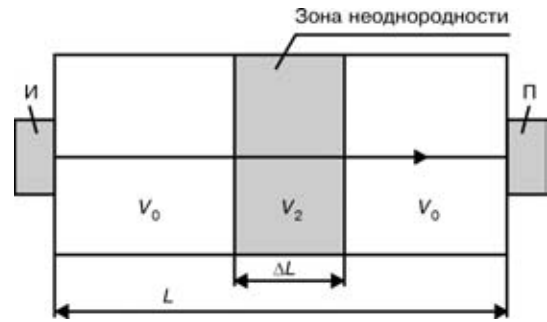


Рис. 2. Геометрия распространения УЗ волны (обозначения см. в тексте)

$$\Delta T \leq \frac{156}{3...4} = 39...52 \text{ пс.}$$

Метрологический анализ канала измерения временных интервалов. Для измерения временных интервалов в УЗ томографе UST-2000 используется метод автоциркуляции (рис. 3).

Ультразвуковой генератор генерирует короткий импульс, который возбуждает излучающий УЗ преобразователь (УЗП). Сигнал с приемного УЗП после усиления каналным услителем подается на компаратор, с помощью которого выделяется передний фронт принятого УЗ сигнала и формируется сигнал повторного перезапуска генератора возбуждения с некоторой задержкой, определяемой калиброванной УЗ линией задержки. Этот процесс непрерывно повторяется до тех пор, пока реверсивный счетчик количества циклов не установится на нуле. В состав канала измерения входит также формирователь измерительного строба. Последний формирует импульс с продолжительностью, равной продолжительности полного периода автоциркуляции, т. е. интервала времени между первым импульсом возбуждения излучающего УЗП и импульсом из компаратора, формирующимся в момент приема эхо-сигнала приемным УЗП в последнем цикле перезапуска.

Таким образом, длина временного интервала T , измеряемая собственно модулем ИВИ, состоит из числа циклов прохождения УЗ колебаний через исследуемый образец, числа циклов формирования

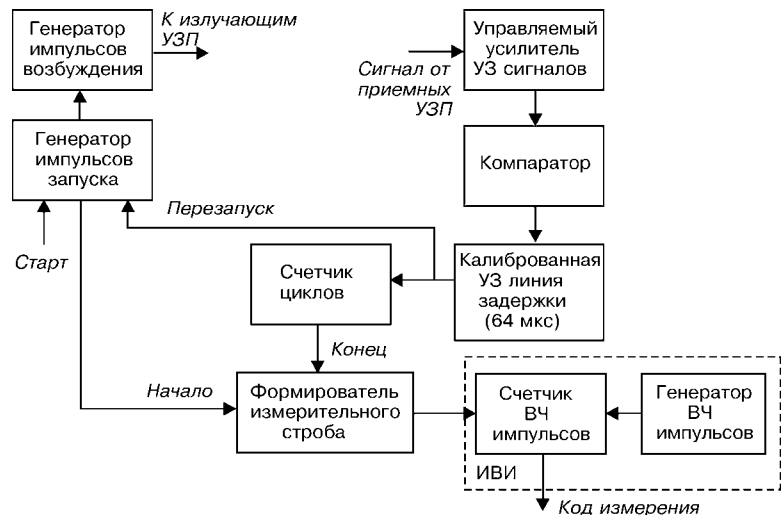


Рис. 3. Структурная схема канала измерения



рабочей паузы (калиброванная задержка) и суммарного времени задержек, вызванных прохождением эхо-сигнала в УЗП и электронном тракте:

$$T = N\tau + N\tau_{к.з} + N(\tau_{пр} + \tau_{тр}),$$

где τ — время распространения УЗ волны в материале образца; $\tau_{к.з}$ — продолжительность рабочей паузы; $\tau_{пр}$, $\tau_{тр}$ — время задержки соответственно в призме и электронном тракте; N — число циклов автоциркуляции.

Отсюда искомая величина τ определяется как

$$\tau = T/N. \quad (8)$$

Соответствующие изменения скорости распространения УЗ волн вычисляются по отклонениям измеренного интервала времени относительно некоторого номинального значения (например, среднего по полю контроля). Если учесть, что величины $\tau_{к.з}$ и $\tau_{пр}$ являются постоянными и в процессе измерений практически не изменяются (их девиации являются величинами 2- и 3-го порядков), а также то, что частотно-фазовая характеристика канала усиления в рабочей полосе линейна и стабильна, то влиянием этих временных параметров на точность определения изменения скорости распространения УЗ волн можно пренебречь. Таким образом, основная погрешность при вычислении изменений скорости фактически будет зависеть от того, с какой точностью система автоциркуляции формирует временной интервал τ , определяемый интервалом между двумя повторными запусками за исключением интервала рабочей паузы плюс время пробега УЗ волны в призмах. Поэтому любые девиации момента повторного запуска, не связанные с изменением скорости распространения УЗ волны, приводят к соответствующей девиации измеренной величины τ . Поскольку стабильность момента повторного запуска в значительной мере зависит от стабильности амплитуды эхо-сигнала и стабильности порогового напряжения на входе компаратора [11], то любые нерегулярные изменения амплитуды эхо-сигнала с приемника УЗП и локальная нестабильность источника опорного напряжения приводят к случайным изменениям величины τ и тем самым — к формированию нерегулярной погрешности при определении фактического времени распространения УЗ волны в образце.

Что касается предельной чувствительности измерений, то согласно алгоритму процедуры измерений автоциркуляционным методом она определяется методической погрешностью собственно ИВИ, в состав которого входят только генератор ВЧ периодической импульсной последовательности и счетчик импульсов (см. рис. 3). Абсолютное значение методической погрешности собственно блока ИВИ определяется из соотношения [10, 11]

$$|\Delta T| = \frac{0,5}{NF_0}, \quad (9)$$

где F_0 — частота ВЧ импульсной последовательности, которой «заполняется» измерительный строб-импульс, отвечающий измеренному интер-

валу времени; N — количество циклов перезапуска.

С целью повышения точности и чувствительности измерения временных интервалов, уменьшения суммарного канального времени измерений, т. е. уменьшения общего времени на проведение измерений в поле контроля, с одной стороны, а также устранения нагрева канальных УЗП томографического блока прозвучивания, с другой, в УЗ томографе UST-2000 частота высокочастотного заполнения была увеличена до 360 МГц. Это позволило при 30 циклах автоциркуляции обеспечить погрешность собственно блока ИВИ, т. е. методическую погрешность без учета влияния канала усиления, на уровне ≤ 50 пс, что соответствует относительной чувствительности измерений изменения скорости распространения УЗ волн порядка $\leq 0,01$ %.

Экспериментальное исследование канала измерения временных интервалов. Как следует из приведенного выше, предельная чувствительность метода автоциркуляции может быть реализована при условии высокой стабильности всей электронной части схемы, отвечающей за формирование сигнала временного интервала (измерительного временного строба-ворот). Сюда входят: канал формирования и приема измерительного УЗ сигнала; канал усиления измерительного УЗ сигнала; схема формирования постоянной (калиброванной) задержки сигнала повторного запуска импульсного генератора возбуждения канальных УЗП; собственно блок ИВИ.

Основная задача исследований состояла в первую очередь в экспериментальной оценке суммарной погрешности измерения времени распространения УЗ волны в тестовом образце и выявлении основных факторов, существенно влияющих на точность измерений.

Метрологические исследования проводили на контрольном плоскопараллельном толстолистовом образце толщиной 28 мм, изготовленном из стали марки Ст5.

При этом УЗ томографический блок прозвучивания размещали стационарно на его поверхности в некоторой выбранной точке поля контроля (рис. 1), т. е. измерение по все парам УЗП (каналам) проводили без сканирования поля контроля (режим сканирование отключен). Чтобы обеспечить достаточную статистику измерений, временные измерения по всем каналам прозвучивания выполняли при следующих условиях:

амплитуду первого положительного вступления принятого УЗ сигнала устанавливали порядка 2,5 В;

поканальные измерения проводили по каждому из установленных порогов компарации (нижнему и верхнему) $U_{ref1} = 0,5$ В и $U_{ref2} = 1,0$ В;

количество измерений по каждому из каналов принимали равным 100;

измерения в каждой канальной серии повторяли для разных значений временной паузы между двумя последовательными измерениями;

временную паузу между повторными измерениями в каждой канальной серии устанавливали соответственно равной 1; 10; 100 мс.



В томографической системе UST-2000 процессы проведения метрологических измерений и регистрации данных измерений полностью автоматизированы и осуществляются под управлением компьютера с помощью специальной программы «MEASURE TEST», входящей в состав программного пакета виртуальной панели управления аппаратурного блока [5].

Эта программа обеспечивает трансляцию массива управляющих сигналов на шину управления канальными коммутаторами, ИВИ и канала усиления, а также последовательность выполнения циклов измерения. В соответствии с программой управления происходит подключение заданной пары УЗП соответственно к каналам возбуждения и приема эхо-сигнала и установление необходимых кодов, определяющих основные параметры режима измерения.

Результаты экспериментальных исследований. В результате проведенных измерений были получены протоколы серий измерений по каждой из 17 томографических пар УЗП для разных временных значений паузы между двумя последовательными измерениями. Каждая серия включала 100 измерений по двум порогам компарации. По данным измерений каждой серии вычисляли отклонение относительно среднего значения по каждому из порогов. По результатам обработки данной серии для каждого тестируемого канала было сформировано 6 расчетных таблиц (для 2 порогов и 3 значений паузы по каждому порогу). Далее по данным из полученных таблиц построили графическую зависимость отклонения относительно среднего значения в серии от номера измерения в серии.

Все необходимые расчеты, построение исходных таблиц и соответствующих графических зависимостей осуществляли с помощью программного пакета «Excel for Windows 95».

На рис. 4 приведены характерные поканальные (для каналов 1, 3 и 7) суммарные (наложенные один на другой) графики профиля временной погрешности относительно ее среднего значения в серии для выбранных дискретных значений паузы соответственно для двух порогов 1 и 2. Порог 1 (нижний) соответствует уровню компарации 0,5 В,

а 2 (верхний) — 1,0 В. Для серий (1'-3') на любом графике дискретные значения временной паузы выбраны соответственно 1; 10; 100 мс.

В таблицах представлены рассчитанные оценки основных статистических характеристик по каждому графику серии в зависимости от номера канала и порога компарации: стандартного отклонения — в табл. 1, а соответственные максимальные и минимальные значения абсолютного отклонения от среднего — в табл. 2.

Анализ приведенного графического материала позволяет отметить следующее:

1) разброс временных отклонений в серии носит случайный характер;

2) ширина «шумовой дорожки» в серии заметно превышает двойное значение необходимого номинального значения абсолютной погрешности согласно расчету 100 пс, что отвечает номинальному значению погрешности $\leq \pm 50$ пс при количестве циклов автоциркуляции $N = 30$. При этом максимальное значение локальных временных отклонений может достигать порядка 500...700 пс, что значительно превышает расчетное номинальное значение абсолютной погрешности измерения при $N = 30$ (см. табл. 2).

3) при увеличении временной паузы наблюдается тенденция некоторого уменьшения максимальных локальных временных отклонений, хотя в среднем эти отклонения превышают необходимое номинальное значение абсолютной погрешности измерения (см. табл. 2).

Как показали в дальнейшем проведенные уточняющие метрологические исследования полного тракта ИВИ, отмеченная выше нестабильность временных измерений обусловлена в первую очередь нестабильностью моментов формирования импульсов перезапуска генератора возбуждения канальных УЗП в полном цикле автоциркуляции. Последнее приводит к девиации продолжительности временного интервала, который отвечает одному циклу автоциркуляции, а тем самым — к нестабильности суммарного временного интервала, соответствующего полному циклу автоциркуляции (временная нестабильность заднего фронта измеренного временного окна). Накопленная нестабильность (дисперсия) заднего фронта измеренного вре-

Таблица 1. Статистическая оценка стандартных отклонений

Канал	Порог	Временная пауза, мс		
		1	10	100
1	1	0,166376	0,276113	0,142645
	2	0,115798	0,171635	0,054643
3	1	0,191356	0,149599	0,09121
	2	0,130155	0,131426	0,159785
7	1	0,171373	0,131794	0,06532
	2	0,077824	0,085847	0,156979
9	1	0,161746	0,158945	0,057525
	2	0,165889	0,149071	0,079137
13	1	0,079874	0,132969	0,09355
	2	0,124604	0,152007	0,142404
17	1	0,084537	0,152607	0,125831
	2	0,154082	0,16112	0,101921

Таблица 2. Статистическая оценка абсолютных (max/min) отклонений от среднего значения

Канал	Порог	Временная пауза, мс		
		1	10	100
1	1	0,714 / -0,286	0,718 / -0,382	0,484 / -0,316
	2	0,377 / -0,123	0,806 / -0,194	0,262 / -0,038
3	1	0,743 / -0,157	0,438 / -0,362	0,142 / -0,058
	2	0,573 / -0,127	0,47 / -0,13	0,238 / -0,262
7	1	0,55 / -0,15	0,6 / -0,2	0,18 / -0,02
	2	0,2 / -0,2	0,15 / -0,05	0,4 / -0,2
9	1	0,63 / -0,27	0,533 / 0,367	0,182 / -0,018
	2	0,566 / -0,234	0,34 / -0,26	0,44 / -0,06
13	1	0,58 / -0,02	0,54 / -0,16	0,46 / -0,04
	2	0,28 / -0,22	0,71 / -0,19	0,52 / -0,28
17	1	0,57 / -0,13	0,41 / -0,39	0,3 / -0,2
	2	0,35 / -0,25	0,25 / -0,25	0,35 / -0,05

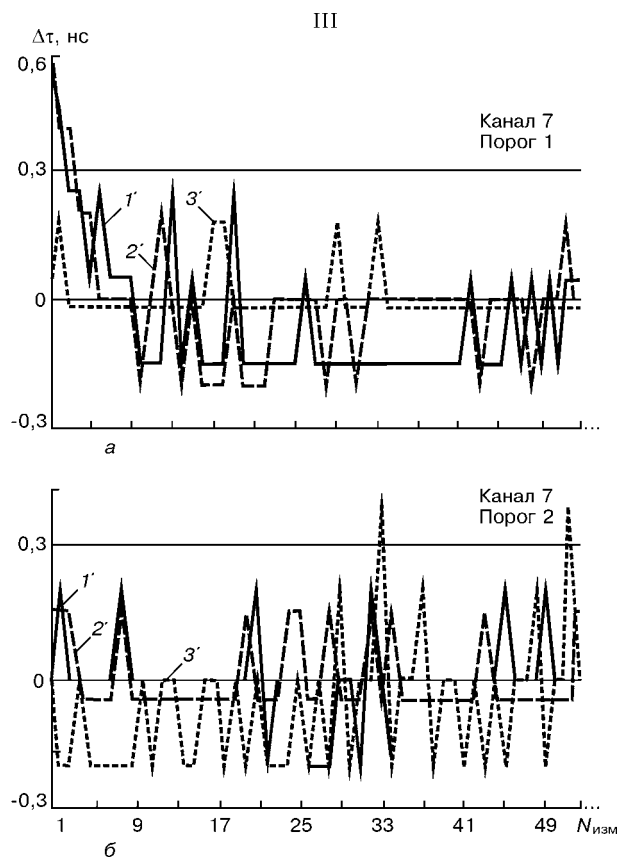
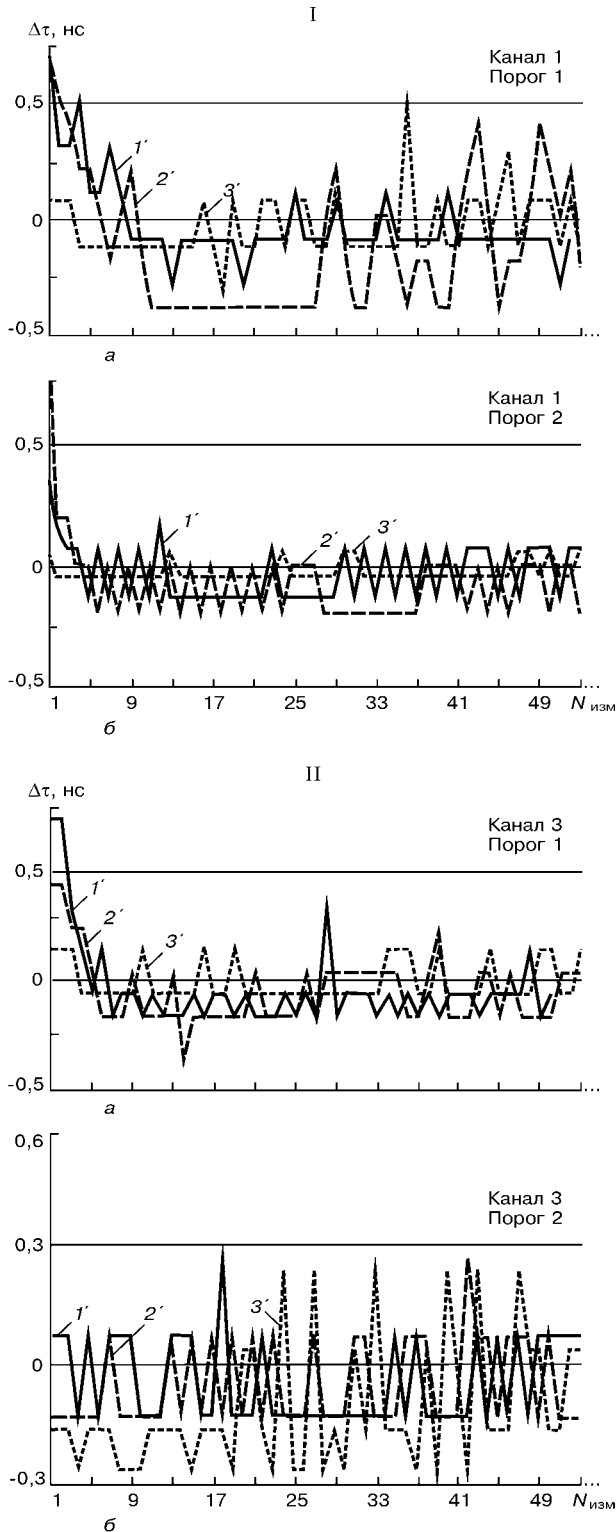


Рис. 4. Зависимости разброса погрешности измерения от часовой паузы между двумя последовательными измерениями для каналов 1 (I), 3 (II) и 7 (III) для порогов компарации 1 (a) и 2 (б): 1'-3' — серии измерений

«хвоста» от зондирующего сигнала за счет его проникновения во входные цепи канала усиления (эффект электрически наведенного сигнала).

Второй фактор — это прогрев излучаемых УЗП на начальных измерениях стационарной (равновесной) температуры. Он проявляется в том, что первые измерения в серии имеют заметно повышенную девиацию относительно среднего значения в серии. В особенности это проявляется при измерениях по порогу 1 (измерения всегда начинаются с нижнего порога) при относительно малых значениях временной паузы между текущими измерениями (см. рис. 4).

Ясно, что увеличение числа циклов автоциркуляции ИВИ не приводит к заметному уменьшению ширины «шумовой дорожки» разброса погрешности измерений при многократных измерениях (рис. 5). На приведенных графиках одно большое деление на временной шкале (по горизонтали) соответствует 1 нс. Можно заметить, что увеличение числа циклов приводит к заметному тренду за счет интенсивного нагрева УЗП.

Описание усовершенствованного алгоритма процедуры временных измерений. Для получения желательной точности временных измерений необходимо повысить временную стабильность канала ИВИ при многократных измерениях. Решение этой задачи возможно двумя путями: применением дополнительных схемно-конструктивных мероприятий (подбором активных элементов канала усиле-

менного окна во временном выражении заметно превышает шаг квантования ИВИ (период частоты ВЧ импульсной последовательности заполнения временного окна $T_{\text{ВЧ}} = 2,778 \text{ нс}$).

Эта нестабильность обусловлена прежде всего двумя факторами. Первый — это влияние суммарного шума канала, накладывающегося на принятый каналный УЗ сигнал. Можно выделить две причины, обуславливающие каналный шум: собственный шум канала усиления и наложение на принятый каналный УЗ сигнал мешающего сигнала

ния с меньшими собственными шумами, тщательным электромагнитным экранированием звеньев передачи сигнала с приемных УЗП на вход канала усиления, дополнительным термостатированием УЗ томографического блока и канала усиления и т. п.) или применением эффективной процедуры обработки многократных измерений в одной точке.

Первый путь, по своей эффективности являющийся локальной мерой, касается отдельных конструктивных и схемных элементов канала ИВИ, а главное, не радикален с точки зрения получения стойких результатов. На наш взгляд, более радикальной мерой является применение алгоритмического метода, базирующегося на процедуре статистической обработки многократных измерений, т. е. такого алгоритма обработки, который позволяет эффективно использовать статистические свойства самых измерений.

Напомним, что фактическое время распространения $\tau_{распр}$ УЗ волны определяется как временной интервал от момента ее возбуждения (момента подачи импульса возбуждения на излучаемый каналный УЗП) до момента появления первой положительной полуволны УЗ сигнала на приемном УЗП (рис. 6).

Для определения величины $\tau_{распр}$ используются данные автоциркуляционных измерений временных интервалов τ_1 и τ_2 по двум порогам (рис. 6, в). На основе значений τ_1 и τ_2 по соответствующему соотношению вычисляется фактическое значение величины $\tau_{распр}$, что отвечает моменту перехода сигнала через нуль [6, 10].

В то же время, как показала экспериментальная проверка, форма принятого УЗ сигнала не совсем точно описывается синусоидальной функцией переменной амплитуды. При этом было замечено, что первая положительная полуволна, по которой собственно проходит компарация, от нуля до уровня порядка 0,6 амплитудного значения имеет линейный характер нарастания (коэффициент нелинейности аппроксимации на уровне $0,6U_m$ порядка 1%). Это позволяет для определения момента перехода сигнала через нулевой уровень применить метод линейной регрессии на основе статистики значений временных измерений по дискретной сетке порогов компарации.

Линейная регрессия предполагает линейную связь между двумя случайными величинами (y, x) [12]. При такой форме связи $\bar{y}(x)$ является линейной функцией от x , т. е.

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1x, \tag{10}$$

где a_0, a_1 — коэффициенты регрессии; x — независимая случайная переменная.

Коэффициенты регрессии определяются по методу наименьших квадратов. Для этого за истинное значение переменной y принимается значение $\bar{y}(x)$, вычисляемое по соотношению (10), т. е. ищется такая прямая, сумма квадратов отклонений измеренных значений от которой была бы минимальна. Это требование формализуется в виде условия Лезандра

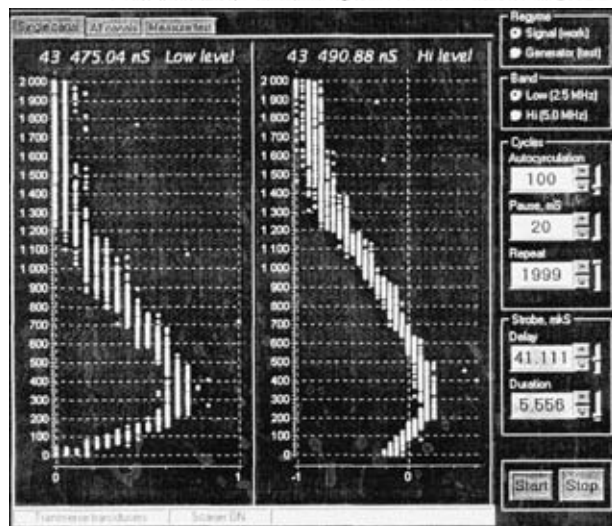


Рис. 5. Временной разброс измерений в стационарной точке поля контроля при многократных измерениях по каналу 1 (число циклов 100; длительность паузы 20 мс)

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}(x)]^2 = Q_{\min}. \tag{11}$$

Как известно, условию минимума функции отвечает условие равенства нулю его первой производной. Если теперь подставить в (11) соотношение (10), вычислить частные производные по a_0 и a_1 и приравнять их к нулю, то в результате получим систему нормальных уравнений относительно искомых коэффициентов регрессии a_0 и a_1 . Решив эту систему, получим следующие соотношения для расчета коэффициентов регрессии:

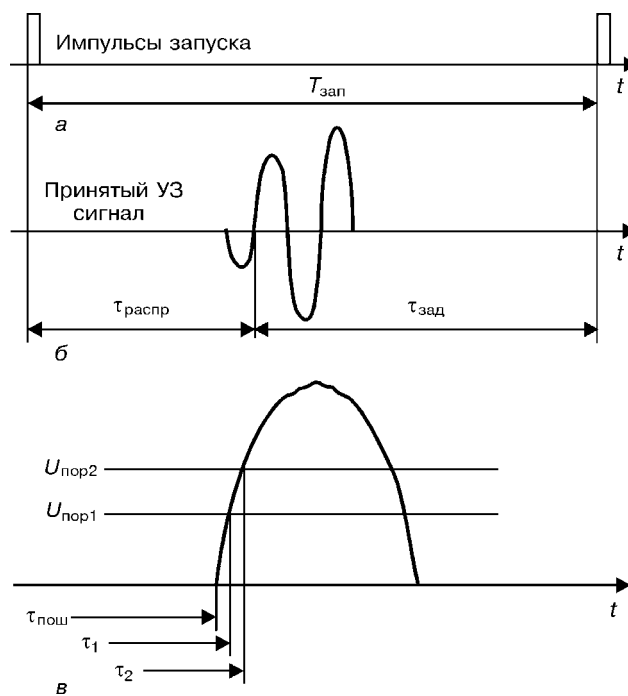


Рис. 6. Временные эпюры сигналов при проведении измерений по двум порогам: а — импульсного сигнала возбуждения; б — принятого УЗ сигнала на выходе канала усиления; в — процедуры компарации



$$a_0 = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum yx}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{n \sum yx - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}.$$

Здесь для упрощения записи индексы при переменных опущены.

Рассмотрим коротко алгоритм процедуры многократных измерений на основе применения линейной регрессии. Он состоит из трех этапов: 1-й — оценки прямой линейной регрессии; 2-й — уточнения прямой линейной регрессии; 3-й — проведения рабочих измерений, определения временного интервала относительно нулевого уровня сигнала.

1-й этап

Шаг 1. Выбирают последовательно канал за каналом и по каждому из них проводят калибровку коэффициента усиления таким образом, чтобы амплитуда U_m^+ первой положительной полуволны УЗ сигнала была порядка 2,5 В.

Шаг 2. По эпоре сигнала, визуализирующейся в сигнальном окне панели управления на экране монитора, определяют значения нижнего и верхнего уровней компарации. Значение нижнего порога выбирают из условия превышения амплитуды шумов, попадающих в строб разрешения компарации (строб выбора зоны УЗ сигнала, в которой разрешены измерения; на данном этапе он широкий, его продолжительность устанавливается программно шириной 5,556 мкс). Значение верхнего порога устанавливается равным 1,02 В, что отвечает уровню, несколько меньшему $0,5U_m^+$.

Шаг 3. Разбивают выбранный интервал компарации равномерно на n дискретных уровней (рабочее значение $n = 10$). Полученные значения дискретных уровней компарации присваиваются всем каналам.

Шаг 4. Выбирают текущий номер канала и проводят последовательно одиночные измерения временных интервалов по установленному дискретному ряду пороговых уровней. Получают оценочную серию временных измерений.

Шаг 5. По полученной серии определяют коэффициенты регрессии a_0 , a_1 и прямую регрессии вида $\tau_n = a_0 + a_1 U_{ni}$.

2-й этап

Шаг 1. Получают для измеренных в серии данных оценку стандартного отклонения s_0 относительно прямой регрессии.

Шаг 2. Определяют по каждому порогу абсолютное значение отклонения Δ_n полученных временных измерений от прямой регрессии. Измерения, для которых выполняется условие $\Delta_n > 2s_0$, отбрасывают.

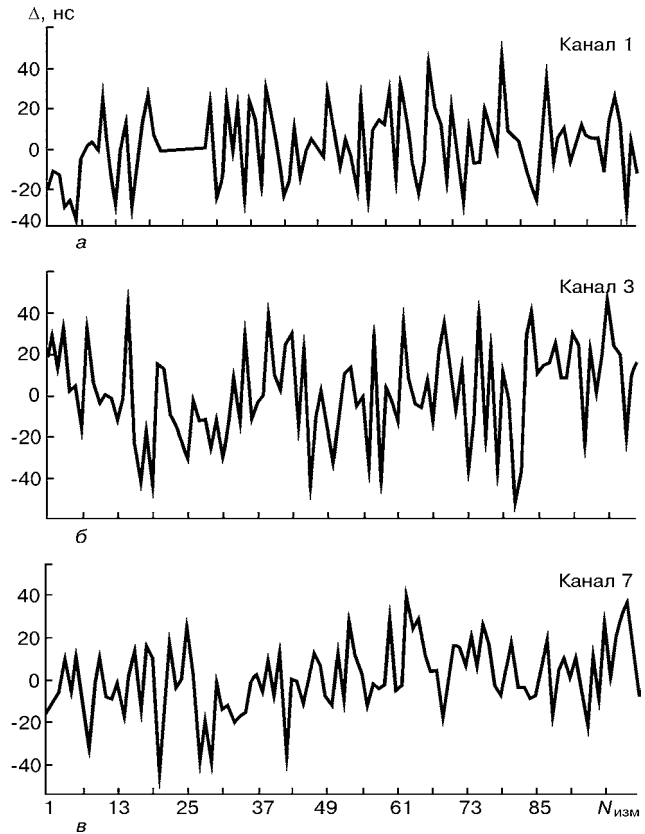


Рис. 7. График отклонения от среднего значения погрешности измерения времени распространения в соответствии с алгоритмом линейной регрессии для каналов 1 (а), 3 (б) и 7 (в)

Шаг 3. По полученной новой серии повторно определяют коэффициенты регрессии a_0 , a_1 и уточняют прямую регрессии.

Шаг 4. Вычисляют оценку времени распространения τ_n , которая отвечает моменту пересечения уточненной прямой регрессии с нулевым уровнем (см. рис. 6, б). Здесь n — текущий номер канала.

3-й этап

Шаг 1. По полученной оценке $\hat{\tau}_n$ вычисляют параметры порога строба выбора зоны УЗ сигнала: $\tau_{зад n} = \tau_n - 90$ нс; $\tau_{стр n} = \tau_n + 90$ нс.

Шаг 2. Повторяют серию измерений по дискретному ряду порогов. Отличие от предыдущего алгоритма измерений состоит в следующем: при проведении измерения на текущем значении порога проводится проверка условия $\Delta_n > 2s_0$. При этом в случае выполнения этого условия измерения на данном пороге снова повторяются. При двукратном выполнении данного условия значения измерения отбрасываются и проводится измерение по следующему порогу.

Шаг 3. Выполняют шаги 3 и 4 предыдущего этапа. Их результат — фактическое значение времени распространения УЗ волны — записывается в файл данных.

Далее алгоритм повторяется на последующем канале УЗ томографического блока прозвучивания.

Данный алгоритм реализуется соответствующей программой, которая входит в пакет рабочей программы сбора данных «UST coll.exe».

На рис. 7 приведены графики разброса погрешности измерения времени распространения согласно алгоритму линейной регрессии для тех же характерных каналов 1, 3, 7, которые представлены на рис. 4. Отметим, что данный алгоритм процедуры измерений при многократных измерениях в заданной точке поля контроля контрольного образца обеспечивает временную стабильность не хуже 50 пс.

1. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996.
2. Зуев Л. Б., Семухов Б. С., Бушмелева К. И. Зависимость скорости ультразвука от действующего напряжения при пластическом течении поликристаллов // Журн. техн. физики. — 1999. — 69, № 12. — С. 100–101.
3. Зуев Л. Б., Семухов Б. С., Бушмелева К. И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // Там же. — 2000. — 70, № 1. — С. 52–56.
4. Томография листовых изделий / В. В. Кошевой, Д. Э. Кривин, Э. В. Кривин, И. М. Романишин // Дефектоскопия. — 1998. — № 9. — С. 20–28.
5. Ультразвукова комп'ютеризована томографічна система для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу в об'ємі виробу UST-2000 // З. Т. Назарчук, В. В. Кошовий, Є. В. Кривін, О. Е. Левицький та ін. // 36. наук. праць «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів». — Київ-Львів, 2001. — С. 12–17.
6. Разработка ультразвуковых томографических методов и средств определения объемного распределения физико-механических характеристик материалов: (Заключит. отчет)

- / Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. — № ГР 0197V003372. — Львов, 1998. — 148 с.
7. Z. T. Nazarchuk, V. V. Koshovy, E. V. Krivin, I. M. Romaniushyn. Ultrasonic tomography technologies for NDT and monitoring of material degradation // Proc. of the Joint EC-IAEA Specialists Meeting, Petten, Netherlands, March 10-12, 1999 / Ed. U. von Estorff, L. M. Davies, P. Trampus. — Luxemburg, 1999. — P. 79–89.
 8. Назарчук З. Т., Кошовий В. В., Кривин Є. В., Романишин І. М. Визначення просторового розподілу фізико-механічних характеристик матеріалу методами ультразвукової обчислювальної томографії // Мет. та прилади контро. якості. — 2000. — Вип. 5. — С. 7–10.
 9. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Физические основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах // Прикл. механика. — 2000. — 36, № 39. — С. 3–34.
 10. Кошевой В. В., Кривин Э. В., Левицкий О. Е. Измеритель временных интервалов с повышенной точностью для задач измерения скорости УЗ волн в конструкционных материалах // Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования», Харьков, 16–19 марта 1998 г. — Харьков, 1998. — С. 309–317.
 11. Кошевой В. В., Кривин Э. В., Левицкий О. Е. К вопросу анализа точности измерения временных интервалов методом автоциркуляции // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 4. — С. 49–56.
 12. Математическая статистика / Под ред. А. М. Длинна. — М.: Высш. шк., 1975. — 398 с.

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,
Львов

Поступила в редакцию
22.05.2002

НОВАЯ КНИГА

Троицкий В. А. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс. — 2002. — 300 с.

Рассмотрены элементы теории и практические вопросы магнитопорошкового контроля, происхождение различного рода ошибок. Освещены вопросы технологии контроля, выбора эталонов, подбора режимов намагничивания, организации работ.

Приведены примеры контроля различных металлоконструкций, трубопроводов и резервуаров, теплообменных установок и деталей машин.

Теоретический раздел книги относится ко всем магнитным методам. Здесь показаны пути уменьшения влияния размагничивающего фактора, эффективного намагничивания деталей сложной геометрии. Рассмотрены процессы перемещения детали как разветвленной магнитной цепи.

Рассчитана на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и может быть полезна студентам вузов.



По вопросу приобретения книги обращайтесь по адресу:
03680, Украина, г. Киев-150, ул. Боженко, 11,
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ.
Тел. (044) 227-26-66.