

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЗОЛОТА



ПЕПЕЛЯЕВ Андрей Валентинович
ООО «ТЕХКОН», Москва

Рассмотрена интересная задача неразрушающего контроля — выявление инородных вставок в золотых изделиях. Это актуальная тема для финансовых учреждений, ломбардов и частных лиц. Одновременно затронуты некоторые вопросы методики контроля соединений из различных материалов, а также объектов сложной формы с малыми радиусами кривизны и небольшой толщиной.

Контролем золотых изделий люди заняты с древнейших времен. Позднее для этого стали применять и физические неразрушающие методы. Из последних достижений в данной области можно отметить рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Появилось много портативных анализаторов химического состава, реализующих этот метод, которые удобны в применении, позволяют быстро, точно и безопасно определить процентное содержание различных химических элементов, в том числе и золота.

Но большая проблема этого и многих других методов заключается в том, что они анализируют только тонкий поверхностный слой объекта. При этом существует проблема, когда внутри изделий из благородных металлов могут находиться инородные вставки. Обычно в подобных случаях для выявления внутренних несплошностей применяют два основных метода неразрушающего контроля — ультразвуковой (УЗК) и радиографический (РК).

Но оказывается, РК в данном случае не гарантирует нужного результата. Дело в том, что этот метод выявляет инородные включения, если они имеют плотность, отличную от основного материала. А у золота, даже с его очень высокой плотностью, есть «брат-близнец» — вольфрам с практически такой же плотностью.

Известный дефект сварных швов — вольфрамовое включение, когда в наплавленном металле шва остаются частицы электрода, изготовленного из этого тугоплавкого материала. Поскольку плотность вольфрама намного выше, чем, например, у

стали, то РК хорошо выявляет подобные дефекты, которые имеют на радиографических снимках характерные светлые индикации. Вольфрамовые вставки в золоте, особенно если они находятся с ним в плотном контакте без прослоек воздуха, обнаружены таким методом не будут. Поэтому выявлять такие несплошности рекомендуется методом УЗК.

Акустические характеристики некоторых металлов и сплавов, взятые из работ [1–3], приведены в таблице.

Как следует из представленных данных, скорость ультразвуковых волн c_L в вольфраме в 1,64 раза выше, чем в золоте, что уже дает возможность различить эти два металла.

Отличие в скорости ультразвуковых волн приводит к тому, что золото и вольфрам имеют разное волновое сопротивление z . Коэффициент отражения ультразвуковых волн от границы раздела материалов R , который тем больше, чем сильнее отличаются волновые сопротивления этих материалов, для пары золото—вольфрам составляет 0,24. Такое значение коэффициента отражения позволяет обнаружить в золоте вставку из вольфрама ультразвуковым эхометодом, даже если они находятся в плотном контакте друг с другом, без прослоек воздуха.

Например, есть опыт контроля деталей с соединением латунь—сталь, полученным диффузионной сваркой, с толщиной слоя латуни 1–3 мм. Для такой пары R равен 0,10, что в 2,4 раза меньше, чем для пары золото—вольфрам. При этом эхосигнал от

Акустические характеристики материалов

Материал	c_L , м/с	ρ , кг/м ³	z , 10^6 Па · с/м	R
Золото	3240	19320	62,60	0,00
Вольфрам	5320	19250	102,41	0,24
Бронза	3650	8500	31,03	–0,34
Олово	3320	7310	24,27	–0,44
Серебро	3650	10500	38,33	–0,24
Латунь	4500	8450	38,03	–0,24
Сталь 20	5900	7850	46,32	–0,15 / 0,10*

Примечания:

c_L – скорость продольных ультразвуковых волн в материале;

ρ – плотность материала;

z – волновое сопротивление материала, $z = \rho c_L$;

R – коэффициент отражения ультразвуковых волн по амплитуде от границы раздела материал 1 – материал 2 при падении волн из материала 1,

$R = (z_2 - z_1) / (z_1 + z_2)$, где z_1 и z_2 – волновое сопротивление материала 1 и материала 2 соответственно.

R определен для всех материалов при условии, что материалом 1 является золото. Отрицательное значение R указывает на изменение фазы (полярности) отраженной волны на противоположную относительно падающей волны;

* R для границы раздела латунь – сталь.

Акустические характеристики материалов зависят от их химического состава, включая примеси, а также способа получения и обработки материалов. Для бронзы и латуни, у которых c_L и ρ существенно зависят от химического состава, указаны средние арифметические значения c_L и ρ , полученные по минимальному и максимальному значениям этих величин.

границы раздела этих металлов регистрировался весьма надежно.

У соединений золото–вольфрам и латунь–сталь есть одно общее свойство, которое можно использовать при контроле. У них волновое сопротивление z_2 для второго материала выше, чем волновое сопротивление z_1 для первого. Поэтому коэффициент отражения R имеет положительное значение, т.е. полярность эхосигнала после отражения от границы раздела этих материалов не изменяется. По указанному признаку можно отличить данные соединения от таких, например, дефектов, как несплошности твердого тела, заполненные газом, для которых z_2 меньше z_1 , и полярность эхосигнала меняется на противоположную. Примеры эхосигналов различной полярности в зависимости от соотношения z_2 и z_1 показаны на рис. 1. Для наглядности максимальные амплитуды обоих сигналов выровнены. Начальная полярность сигнала, падающего на границу раздела, зависит в том числе от характеристик генератора указанного сигнала.

Понятно, что выявляемость инородных вставок зависит не только от акустических свойств материалов, но также от геометрической формы и размеров этих вставок. Есть данные, что в слитках золота могут быть вставки из вольфрама в форме ци-

линдрических стержней. По технологическим причинам диаметр таких стержней не должен быть слишком малым. Подобные цилиндрические отражатели достаточно хорошо выявляются эхометодом при условии, что их продольная ось параллельна поверхности ввода ультразвука.

Кроме того, выполняя контроль эхометодом с углом ввода 0° , всегда есть смысл одновременно применять зеркально-теневой метод, анализируя донный сигнал. Если от некоторых типов дефектов, например от скопления мелких несплошностей, не удалось получить эхосигнал, то их можно выявить по уменьшению амплитуды донного сигнала.

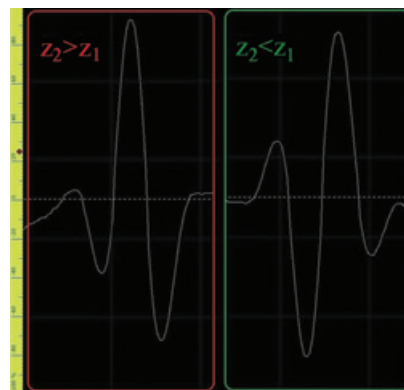


Рис. 1. Эхосигналы различной полярности от границы раздела материалов в зависимости от соотношения z_2 и z_1

Теперь подробнее рассмотрим контроль ювелирных изделий из золота. Такие изделия, в отличие от слитков, могут иметь сложную геометрическую форму, малые радиусы кривизны и небольшую толщину. Это задает определенные требования к средствам УЗК. Не подойдут самые простые модели толщиномеров, которые работают только с раздельно-совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями (РС ПЭП), имеют минимальные средства настройки и отображают на дисплее только измеренное значение толщины.

Для решения подобных задач нужен дефектоскоп или толщиномер с функционалом, близким к дефектоскопу, а именно: работа с совмещенными ПЭП, максимальная рабочая частота до 20 МГц, отображение А-скана (развертка с эхограммой или формой волны), система настраиваемых стробов и временной регулировки чувствительности (ВРЧ, или TCG), выделение на А-скане эхосигналов, по которым проводится измерение толщины или скорости ультразвуковых волн, поддержка режимов измерения толщины 2 и 3 в соответствии со стандартом [4]. Примером такого толщиномера является модель 38DL PLUS [5].

Для контроля объектов небольшой толщины, сложной формы и с малыми радиусами кривизны необходим также специализированный ПЭП. В свое время для подобных задач был разработан ПЭП V260, который получил собственное имя — Sonopen®, поскольку форма его корпуса напоминает пишущую ручку [6]. Наш опыт показывает, что среди специализированных ПЭП данный преобразователь является одним из самых востребованных. Его применяют, например, для контроля толщины стенки трубок гидравлических и пневматических систем различного назначения из стали, алюминиевых сплавов, титана и циркония, с минимальным наружным диаметром до 3 мм и толщиной стенки до 0,2 мм. Это прямой совмещенный ПЭП с рабочей частотой 15 МГц и сменной акустической задержкой в виде усеченного конуса, которая обеспечивает минимальный размер зоны акустического контакта диаметром 1,5 мм. Другой конструктивной особенностью данного ПЭП является фокусирующая акустическая линза, которая улучшает соотношение полезный сигнал/шум. Использование плоской пьезопластины без фокусирующей линзы приводит к возникновению помех из-за отражений сигнала от боковой поверхности конусовидной акустической задержки. Для удобства применения Sonopen® выпускают в трех модификациях — с углом между ручкой и акустической осью 0, 45 и 90°.

ПЭП примерно с такими характеристиками мы рекомендуем для контроля изделий из золота сложной формы. На рис. 2 и 3 показан пример контроля



Рис. 2. УЗК золотых изделий толщиномером 38DL PLUS



Рис. 3. УЗК кольца из золота преобразователем Sonopen®

золотого изделия — кольца с переменной толщиной от 1 до 3 мм ультразвуковым толщиномером 38DL PLUS и преобразователем Sonopen®.

На рис. 4 приведен характерный А-скан, зафиксированный при контроле указанного выше изделия из золота. По полученным результатам можно сказать следующее. На А-скане после интерфейсного сигнала (ИС, эхосигнал от границы раздела акустическая задержка — объект) идет последовательность донных сигналов (первый донный сиг-

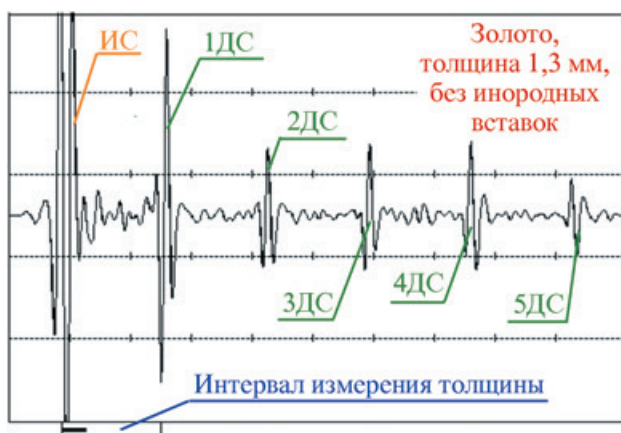


Рис. 4. Пример А-скана для изделий из золота без инородных вставок

нал 1ДС, второй донный сигнал 2ДС и т.д.), разделенных интервалами без сигналов (не считая шумов), длительность каждого ДС составляет 1,5–2 периода колебаний, он имеет 3–4 выраженных пика. Такая форма сигнала сохраняется для всех пяти ДС, отображенных на А-скане. Измерение толщины изделия выполнено по интервалу времени между ИС и 1ДС, что соответствует режиму измерения 2 согласно стандарту [4].

Толщина изделия, определенная ультразвуковым эхометром при настроенном значении скорости ультразвуковых волн в золоте c_L 3240 м/с, во всех контрольных точках совпала с результатами прямых измерений, выполненных штангенциркулем. Отсутствие между ИС и 1ДС других сигналов, кроме шумов, указывает на то, что инородные вставки в материале изделия не обнаружены.

При контроле объектов с малым радиусом кривизны, чтобы получить А-скан с четкими устойчивыми эхосигналами достаточно высокой амплитуды, как показано на рис. 4, нужно выполнить определенное позиционирование ПЭП на поверхности объекта. Это может занять некоторое время. Для ускорения контроля преобразователь Sonoren® рекомендуется применять вместе со специальным подпружиненным держателем, который имеет V-образные вырезы. Данный держатель обеспечивает центровку ПЭП и получение устойчивых эхосигналов при контроле объектов цилиндрической формы – трубок и тому подобного. Для надежного акустического контакта также необходима достаточно вязкая и при этом безвредная контактная жидкость, например глицерин или специальный гель для УЗК.

Добавим, что для ювелирных изделий идентификации материала только по скорости ультразвуковых волн c_L может быть недостаточно. Это связано с существенной погрешностью, которая иног-

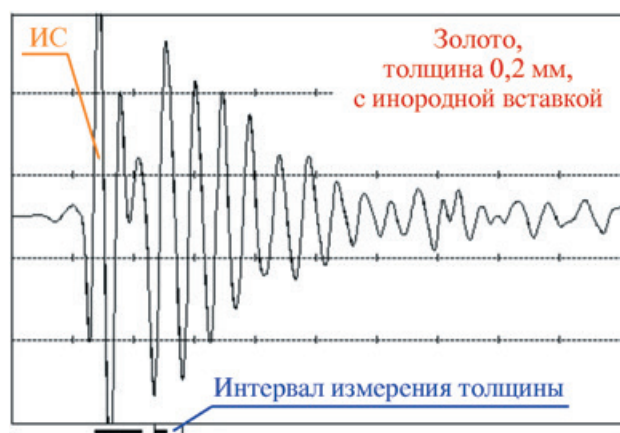


Рис. 5. Пример А-скана для изделий из золота с инородной вставкой

да возникает при измерениях толщины или скорости ультразвуковых волн на изделиях сложной формы и с малыми радиусами кривизны. При этом, как показано в таблице, скорости ультразвуковых волн в некоторых металлах и сплавах, таких как бронза, олово и серебро, достаточно близки к значениям скорости в золоте и отличаются от него не более чем на 13%. Поэтому первоначально лучше определить материал такого изделия, например, по его плотности. Затем методами УЗК можно продублировать определение материала уже по скорости ультразвуковых волн, а также провести контроль изделия на сплошность и наличие в нем инородных вставок.

Рассмотрим пример обнаружения такой инородной вставки в изделии из золота. Изделие – цепь из цилиндрических звеньев диаметром 3,7 мм по замерам штангенциркулем.

Если бы эти цилиндрические звенья не имели нарушений сплошности, то определенное ультразвуковым эхометром значение толщины составило бы для них также 3,7 мм, при этом 1ДС на А-скане находился бы примерно в той же зоне, где находится 3ДС на рис. 4. Других эхосигналов между ИС и 1ДС на А-скане бы не было.

Однако полученный при контроле цилиндрических звеньев А-скан, который представлен на рис. 5, существенно отличается от того, что приведен на рис. 4. На указанном А-скане отсутствуют отдельные ДС, вместо них имеется сплошной ряд пиков с попеременным изменением полярности.

Эксперименты показали, что эхосигналы подобной формы возникают при распространении в относительно тонкой стенке объекта, когда толщина такой стенки примерно равна или меньше, чем длина ультразвуковой волны в материале объекта (0,22 мм для золота и частоты ультразвуковых колебаний 15 МГц). Можно предположить, что при



Рис. 6. Золотое изделие с инородной вставкой, обнаруженной по результатам УЗК

этих условиях в стенке объекта возникает интерференция многократно переотраженных ДС, что и приводит в итоге к образованию сигналов указанной формы.

При экспериментах также установлено, что если стенка объекта слишком тонкая (начиная с толщины, которая примерно в 2–3 раза меньше длины ультразвуковой волны в материале объекта), то получить информативный А-скан, пригодный для измерения толщины стенки, не получается. Для большинства ультразвуковых дефектоскопов и толщиномеров максимальная рабочая частота не превышает 20–30 МГц. Поэтому минимальная толщина, которая может быть измерена данными средствами контроля, составляет приблизительно 0,1–0,2 мм.

Отсутствие информативного А-скана уже является признаком того, что объект имеет тонкую наружную стенку с дальнейшим нарушением сплошности. Если есть необходимость в измерениях таких малых толщин, то можно использовать высокочастотные ультразвуковые толщиномеры и преобразователи. Например, выпускается толщиномер 72DL PLUS и соответствующие ПЭП с рабочей частотой до 125 МГц, которые позволяют измерять толщины до 0,013 мм [7].

Вернемся к А-скану на рис. 5. В данном случае измерения толщины стенки объекта выполнены по интервалу времени между соседними пиками одинаковой полярности (режим измерения 3 согласно стандарту [4]), результат составил 0,2 мм.

Для подтверждения полученных данных несколько звеньев цепи было распилено. Золотое изделие после распила показано на рис. 6.

Цилиндрические звенья золотой цепи диаметром 3,7 мм оказались трубками с толщиной стенки всего лишь 0,2 мм. Внутренний объем этих трубок был заполнен инородными вставками в виде проволоки из металла высокой плотности. Таким образом, результаты неразрушающего контроля методом УЗК были полностью подтверждены.

В заключение благодарим коллег и деловых партнеров, которые предоставили для проведения экспериментов по контролю свои изделия из золота.

Библиографический список

1. **Ультразвук.** Маленькая энциклопедия / гл. ред. И.П. Голямина. М.: Сов. энцикл., 1979. 400 с.
2. **Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.** Ультразвуковой контроль // Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / под ред. В.В. Клюева. Т. 3. 2-е изд., доп. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
3. **Ермолов И.Н., Вopilкин А.Х., Бадалян В.Г.** Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. Крат. справочник. М.: НПЦ «ЭХО+», 2004. 108 с.
4. **ГОСТ Р ИСО 16809–2015.** Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины. М.: Стандартинформ, 2015. 36 с.
5. **38DL PLUS** – Ультразвуковой толщиномер: руководство по эксплуатации. DMTA-10004-01RU-Версия С. Olympus, 2016. 338 с.
6. **Ultrasonic Transducers** // Olympus NDT. Olympus, 2006. 40 с.
7. **Ультразвуковой толщиномер 72DL PLUS.** Olympus–Evident, 2022. 8 с.

ЖУРНАЛ «ТЕРРИТОРИЯ NDT»

*У нашей ТЕРРИТОРИИ нет границ – попасть на нее можно ИЗ ЛЮБОЙ ТОЧКИ МИРА.
Наша ТЕРРИТОРИЯ – это ОБЪЕМ и ПРОСТОР информации в области НК.*

В свободном доступе
НА САЙТЕ
www.tndt.idspektr.ru



СВЕЖИЙ НОМЕР журнала
[http://tndt.idspektr.ru/
index.php/current-issue](http://tndt.idspektr.ru/index.php/current-issue)



АРХИВЫ номеров за 10 лет
[http://tndt.idspektr.ru/
index.php/archive](http://tndt.idspektr.ru/index.php/archive)



Редакция: +7 (499) 393-30-25 • tndt@idspektr.ru