



NDT World, 2016, v. 19, no. 3, pp. 4–8  
DOI: 10.12737/21146

# Современные ультразвуковые методы измерения остаточной толщины стенок металлических изделий под защитными покрытиями

Статья посвящена сравнительному анализу современных методов измерения остаточной толщины металла под защитными покрытиями. Рассмотрены принципы реализации каждого из методов, их достоинства и недостатки, а также области использования. Указаны меры, позволяющие улучшить характеристики разрабатываемых приборов. Даны рекомендации по повышению достоверности результатов при проведении измерений через покрытие.

Submitted 19.07.16  
Accepted 1.08.16

A. S. Bulatov<sup>1</sup>, V. A. Syasko<sup>1</sup>

## Modern Ultrasonic Methods to Measure the Remaining Thickness of the Wall of Metal Products under the Protective Coatings

With an increasing amount of work on residual thickness measurements of various metal products (petrochemical industry products, marine and bridge structures, transport infrastructure objects, etc.) the task of improving measurement performance is getting increasingly urgent. While measuring the residual wall thickness  $H_{мет}$  of coated metal products with the traditional ultrasonic methods, for example, pulse-echo, a significant portion of time is spent to scrape a protective dielectric coating (most often paint) from the testing point and then to restore the coating after the measurements. In recent years the ultrasonic methods, which do not require the coating to be removed for measuring, are intensively developed. The optimal methods are the following: Echo-Echo, different Pulse-Echo Coating (including the TopCOAT) and combined.

The article describes in detail the physical basis of the methods, block diagrams of two – and four-element double crystal transducers, time charts and algorithms for  $H_{мет}$  computing, which together enable the coating thickness value to be eliminated from the measurement results. The analysis of every method's merits and demerits and the restrictions on its usage are given. The article also shows the ways to improve parameters of the equipment used for coated products testing as well as measures to increase the reliability of  $H_{мет}$  measurement results.

*Keywords: ultrasonic testing, coating, residual thickness, echo-echo-method*

**БУЛАТОВ  
Александр  
Сергеевич**

Зам. Генерального директора ООО «Константа».  
Научные интересы – разработка средств ультразвукового контроля металлов и пластиков.



**СЯСЬКО  
Владимир  
Александрович**

Профессор кафедры «Приборостроение» Национального минерального университета «Горный», Генеральный директор ООО «Константа» (Санкт-Петербург), д. т. н.  
Научные интересы: контроль физико-механических характеристик микро- и наноструктурированных материалов.



С учётом всё возрастающих объёмов работ по контролю остаточной толщины стенок металлических изделий объектов нефтехимической промышленности, судовых и мостовых конструкций, а также объектов транспортной инфраструктуры всё более актуальной становится задача повышения производительности измерений. При измерениях традиционными методами значительную часть времени составляют затраты на зачистку точек контроля от защитных диэлектрических (чаще всего лакокрасочных) покрытий и на восстановление нарушенного покрытия после проведения измерений. Наиболее распространённые ультра-

звуковые толщинометры общего назначения с отдельно-совмещёнными преобразователями (РС ПЭП) предназначены для измерения толщины металлов без защитного покрытия с использованием эхо-метода (в режиме **Зонд-Эхо**). Попытка измерить таким прибором толщину стенки металлического изделия через защитное диэлектрическое покрытие приводит к значительной дополнительной погрешности измерения (рис. 1).

Это объясняется тем, что при измерении толщины стенки изделия без покрытия эхо-методом информативным параметром является суммарное время  $t_{изм}$  прохождения ультразвуковой волны

в материале призм (линий задержки)  $t_{лз1} + t_{лз2}$  и в стенке изделия  $2t_{мет}$ :

$$t_{изм} = t_{лз1} + t_{лз2} + 2t_{мет} \quad (1)$$

а значение толщины  $H_{мет}$  прибор получает по формуле:

$$H_{мет} = 0,5C_{мет}(t_{изм} - t_{лз1} - t_{лз2}), \quad (2)$$

где  $C_{мет}$  — скорость ультразвука в металле.

При проведении измерения данным методом через покрытие

$$t_{изм} = t_{лз1} + t_{лз2} + 2(t_{мет} + t_{пок}). \quad (3)$$

Следует учесть, что скорость распространения ультразвуковых колебаний в большинстве диэлектрических покрытий обычно в 2,5–2,7 раза меньше, чем в металле, что вызовет дополнительную погрешность измерения при вычисле-

<sup>1</sup> CONSTANTA Ltd, St. Petersburg, Russia; 9334343@gmail.com

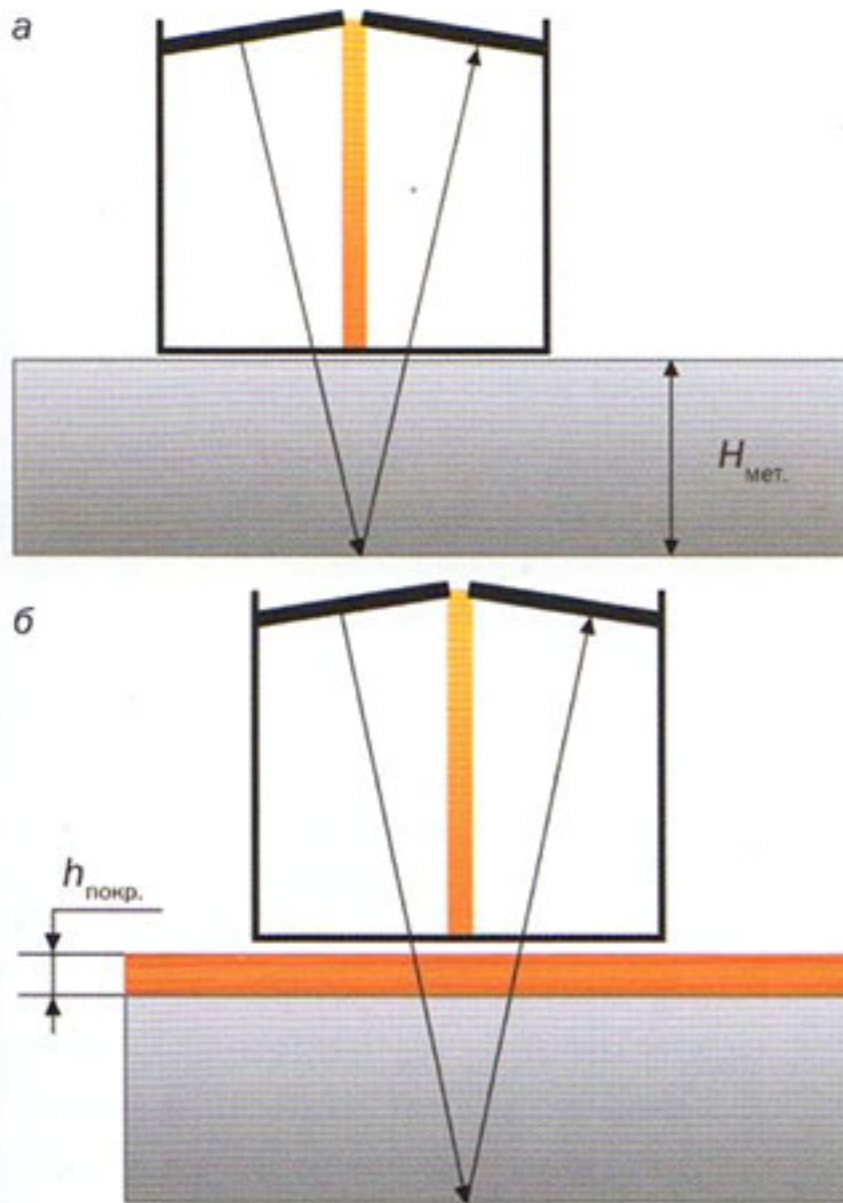


Рис. 1. Проведение измерений толщины стенки металлического изделия без покрытия (а) и с покрытием (б) эхо-методом

нии по (2). Например, покрытие толщиной 0,2 мм вызовет дополнительную погрешность приблизительно 0,5 мм.

В последние годы активно развивались ультразвуковые методы измерения остаточной толщины металла под диэлектрическими покрытиями. Рассмотрим и проанализируем основные из них.

На рис. 2 приведены наиболее распространенные современные методы НК, применяемые при измерении толщины изделия под защитными покрытиями.

**Метод Эхо-Эхо (Echo-Echo&MultiEcho)**

Это самый известный и часто применяемый метод измерения толщины стенки изделий под покрытием. На рис. 3 показана упрощенная диаграмма расположения отраженных эхо-сигналов на временной оси. Сигнал  $U_{зонд}$  соот-

ветствует импульсу возбуждения излучающей пьезопластины; Эхо 1 — первое донное отражение, Эхо 2 и Эхо 3 — второй и третий отраженные импульсы соответственно. Момент  $t_{э1}$  прихода сигнала Эхо 1 в случае работы с РС ПЭП может быть рассчитан по (3). Время прихода сигнала Эхо 2:

$$t_{э2} = t_{лз1} + t_{лз2} + 4t_{мет} + 2t_{покр}. \quad (4)$$

При работе по этому методу прибор после обнаружения и фиксации двух соседних отраженных импульсов (например, Эхо 1 и Эхо 2) вычисляет длительность временного интервала между ними:

$$t_{изм} = t_{э1} - t_{э2} = 2t_{мет} \quad (5)$$

и, соответственно,

$$H_{мет} = 0,5C_{мет} t_{изм}. \quad (6)$$

Разновидностью метода Echo-Echo является метод MultiEcho, когда для повышения достоверности результата измерения используют не два, а три и более отражений.

Достоинства метода:

- 1) достаточно простая реализация;
- 2) может использоваться при измерениях на высокотемпературных объектах (со специальными преобразователями).

Недостатки:

- 1) требует получения нескольких отраженных сигналов, что не всегда можно обеспечить, поэтому диапазон измерений уже, чем у других методов;
- 2) требует использования высокодемпфированных преобразователей, позволяющих получать короткие импульсы.

**Метод Зонд-Эхо-Покрытие (Pulse-Echo-Coating, Thru-Paint, TopCoat)**

Идея этого метода основана на том, что отдельно измеряется время прохождения волны через покрытие, а затем это время вычитается из общего времени прохождения волны через металл и покрытие. Существуют разные способы реализации этого метода. В каче-

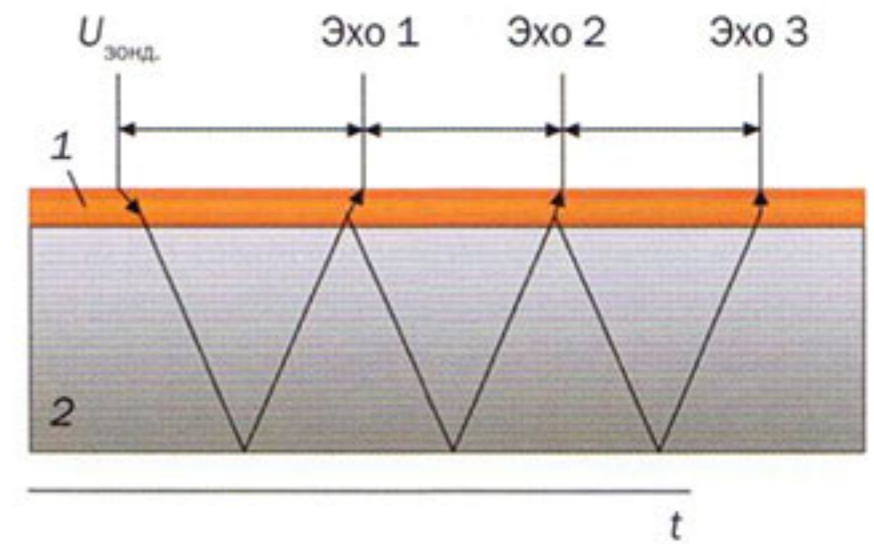


Рис. 3. Проведение измерений по методу Эхо-Эхо. Упрощенная диаграмма расположения отраженных эхо-сигналов на временной оси; 1 — покрытие; 2 — металл

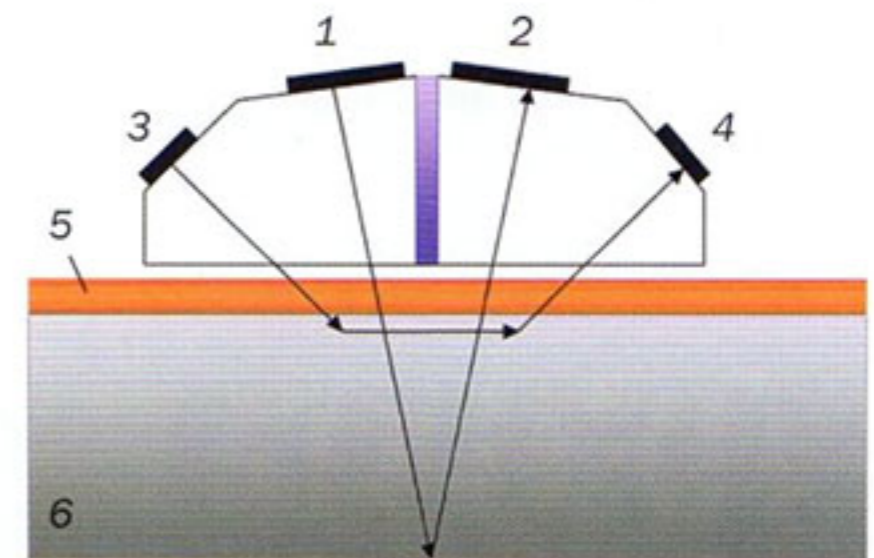


Рис. 4. Проведение измерений по методу TopCoat: 1, 2 — пьезопластины для измерения общего времени прохождения ультразвука через металл и покрытие; 3, 4 — пьезопластины для измерения времени прохождения ультразвука через покрытие; 5 — покрытие; 6 — металл

стве примера рассмотрим реализацию метода TopCoat, предложенную специалистами фирмы Krautkrämer [1], базирующуюся на использовании специальных многоэлементных РС ПЭП, содержащих две дополнительные пьезопластины для измерения времени прохождения ультразвука через покрытие (рис. 4).

Дополнительные пьезопластины установлены под большим углом, в результате чего продольная волна, сформированная излучающей пьезопластинкой 1, распространяется по поверхности металла и генерирует волну, проходящую через призму к пьезопластинке 4. Контроллер прибора вычисляет длительность временного интервала  $t_{покр}$  прохождения волны через покрытие. Тогда

$$t_{мет} = t_{изм} - 2t_{покр} - (t_{лз1} + t_{лз2}), \quad (7)$$

$$H_{мет} = C_{мет} t_{мет}. \quad (8)$$

Вычисление толщины покрытия проводится по формуле [2]:

$$h_{покр} = t_{покр} \cos \alpha / [2 (1/C_{покр} - \sin \alpha / C_{мет})]. \quad (9)$$

Достоинства метода:

1. Измерение толщины основного металла по одному донному отражению существенно расширяет диапазон контроля по выявлению питтинговой коррозии и измерению сильно корродированных изделий в сравнении с методом Echo-Echo.

**ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗУЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧЕРЕЗ ПОКРЫТИЕ**

ЭХО-ЭХО (ECHO-ECHO & MULTIECHO)

МЕТОД НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (EMAT TRANSDUCER)

ЗОНД-ЭХО-ПОКРЫТИЕ (PULSE-ECHO-COATING, THRU-PAINT, TOPCOAT)

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД (КОМБИНАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА)

Рис. 2. Основные методы НК, используемые для измерения остаточной толщины стенки металлических изделий под защитными диэлектрическими покрытиями

2. При известной скорости ультразвука в покрытии можно измерить и толщину покрытия.

Недостатки:

1. Измерение возможно только со специализированными преобразователями и приборами, предназначенными для работы с такими преобразователями.
2. Покрытие должно быть немагнитным.
3. Для корректного измерения толщины покрытия его минимальное значение должно быть больше 0,012–0,05 мм (зависит от характеристик прибора, преобразователя).
4. Поверхность покрытия должна быть достаточно гладкой.

**Вариант метода Зонд-Эхо-Покрытие, реализованный в приборе Булат 3 разработки ООО «КОНСТАНТА»**

Данный вариант реализации метода представлен на рис. 5. Суть его также основана на измерении времени прохождения ультразвука через покрытие, однако, в отличие от метода TopCoat, в этом варианте измерение  $t_{покр}$  прохождения волны через покрытие проводится без использования дополнительной пары пьезопластин;  $t_{покр}$  определяется в совмещённом режиме с использованием излучающей пьезопластины. Вначале в совмещённом режиме работы измеряется время прохождения волны через призму преобразователя на воздухе (без контакта с изделием):

$$t_{возд} = 2t_{лз1} + t_{лз2}, \quad (10)$$

а затем измеряется время прохождения волны до границы раздела покрытие/металл:

$$t_{изм1} = t_{возд} + 2t_{покр}; \quad (11)$$

$$t_{покр} = (t_{изм1} - t_{возд})/2. \quad (12)$$

Далее по (7), (8) вычисляются толщины металла  $H_{мет}$  и покрытия  $h_{покр} = C_{покр} t_{покр}$ .

Достоинства метода:

1. Стандартная конструкция раздельно-совмещённого преобразователя.
2. Диапазон контроля больше, чем для метода Echo-Echo.

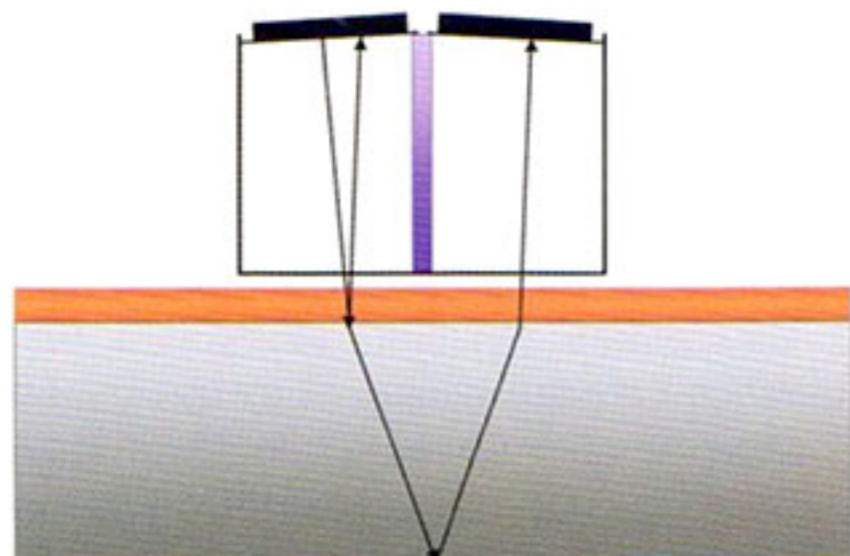


Рис. 5. Вариант метода Pulse-Echo-Coating, реализованный в толщиномере Булат 3

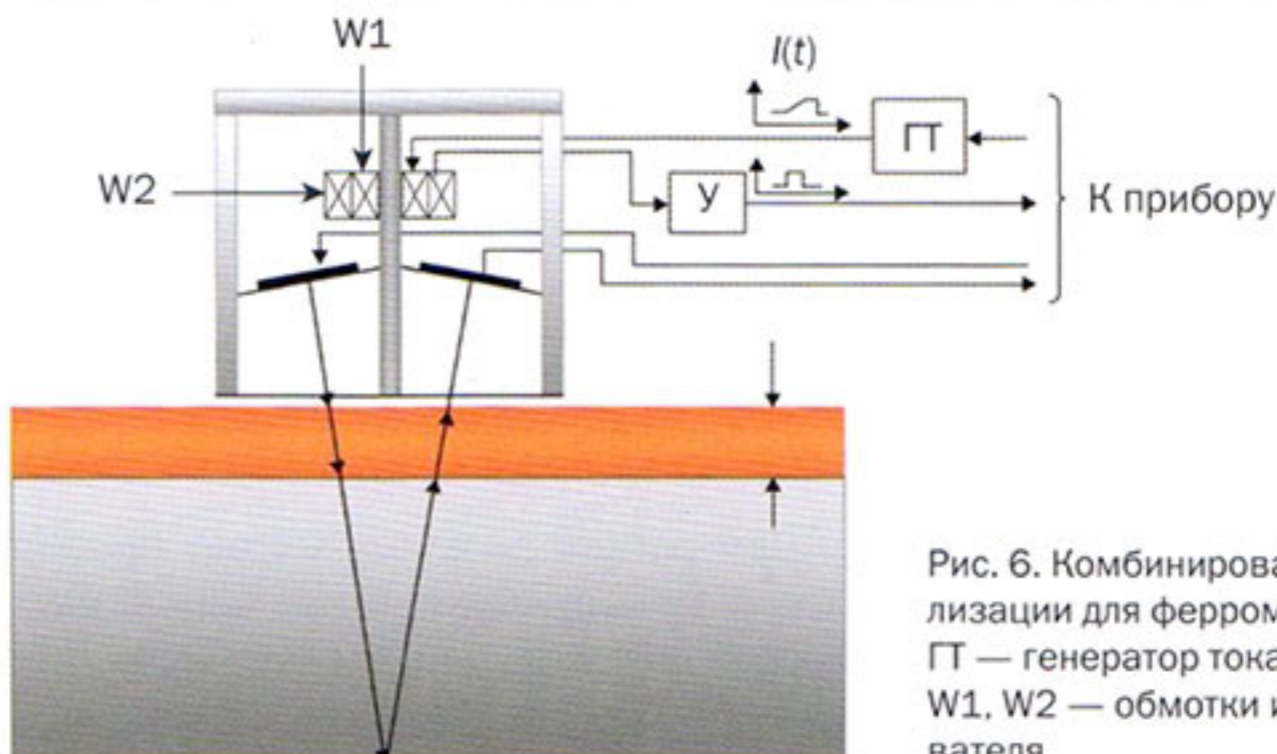


Рис. 6. Комбинированный метод (вариант реализации для ферромагнитных металлов): ГТ — генератор тока; У — усилитель; W1, W2 — обмотки индукционного преобразователя

3. Допускает использование некоторых типов<sup>1</sup> обычных преобразователей для толщин покрытий менее 0,3–0,5 мм.
4. Измерение толщины покрытия (при известной скорости ультразвука в покрытии).

Недостатки:

1. При измерениях через покрытия толщиной более 0,5 мм требуется использование специализированных преобразователей.
2. Измерение толщины металла под покрытием возможно только на приборе, предназначенном для работы с этими преобразователями.
3. Радиус кривизны контролируемой поверхности должен быть более 100 мм.

**Комбинированный метод**

Это метод основан на совместном использовании ультразвукового эхоимпульсного и электромагнитного методов измерения [3]. Он базируется на использовании специализированных преобразователей, содержащих в одном корпусе традиционный РС ПЭП для измерения времени прохождения ультразвука через металл и покрытие, и преобразователь магнитоиндукционный (для работы по ферромагнитным основаниям) или вихретоковый (для работы по цветным металлам) для измерения толщины покрытия. Для большинства типов немагнитных покрытий скорость ультразвука находится в пределах 2240–2340 м/с, что и позволяет достаточно корректно определять  $t_{покр}$ .

Конструкция комбинированного преобразователя для контроля ферромагнитных металлов приведена на рис. 6.

Чувствительный элемент магнитоиндукционного преобразователя состоит из ферритового стержня и намотанных

<sup>1</sup> Преобразователи для толщиномеров серии Булат на частоты 2,5 и 5 МГц со встроенной памятью и настройками для работы через покрытие с толщиномером Булат 3.

на него катушек (первичной W1 и вторичной W2). В результате изменения взаимной индукции между возбуждающей (W1) и приёмной (W2) катушками в зависимости от  $h_{покр}$  на ферромагнитном основании меняется величина ЭДС, наведённой на вторичной обмотке при питании первичной обмотки линейно нарастающим током. Площадь импульса ЭДС обратно пропорциональна толщине покрытия. Контроллер вычисляет площадь импульса с помощью встроенного АЦП и, используя таблицу, снятую при градуировке магнитоиндукционного преобразователя, вычисляет толщину покрытия  $h_{покр}$ . После этого по заданной скорости ультразвука в покрытии контроллер вычисляет время прохождения волны через покрытие:

$$t_{покр} = h_{покр} / C_{покр}. \quad (13)$$

Общее время прохождения волны через покрытие и металл измеряется аналогично обычному методу Зонд-Эхо и соответствует (3). Тогда  $t_{мет}$  вычисляется по формуле (7), а  $H_{мет}$  — по (8).

Достоинства метода:

- 1) диапазон контроля больше, чем у метода Эхо-Эхо (близок к диапазону метода Зонд-Эхо);
- 2) измерение толщины покрытия (при известной скорости ультразвука в покрытии);
- 3) позволяет вести контроль металла под металлическим немагнитным покрытием.

Недостатки:

- 1) скорость УЗ в реальном покрытии может отличаться от той, что задана в программе прибора, а это приводит к дополнительной погрешности (информация по скорости УЗ в конкретном покрытии в большинстве случаев отсутствует);
- 2) для измерения покрытий толщиной более 0,5 мм требуется увеличение габаритов преобразователя по сравнению со стандартными УЗ преобразователями, применяемыми для измерений без покрытия, что усложняет

или делает невозможным проведение контроля в труднодоступных местах.

Важность проведения контроля через покрытие, повышение требований к качеству выполняемых измерений послужили стимулом к разработке нового прибора и преобразователей, позволяющих решить эти задачи.

В ООО «Константа» был разработан ультразвуковой толщиномер Булат 3, который позволяет проводить контроль толщины изделий как традиционным методом (Зонд-Эхо), так и методами, используемыми для контроля через покрытие (Echo-Echo и Pulse-Echo-Coating). Для работы с этим прибором также была разработана новая серия преобразователей — серия Е. В этих преобразователях были использованы новые полимерные материалы, обеспечивающие хорошее согласование

с материалом покрытия, и композитная керамика, позволившая получить короткие импульсы, что особенно важно при работе в режиме Echo-Echo.

Высокопроизводительный контроллер, примененный в приборе, позволил реализовать сложные алгоритмы обработки сигнала и сделал простой и доступной работу в режимах контроля через покрытие любому оператору. Экран размером 2,4" позволяет эффективно использовать режим А-скан при контроле ответственных и сложных изделий.

#### Литература

1. Carodiskey T.J. Патент США. US 6035717 A. Method and apparatus for measuring the thickness of a coated material. Заявл. 12.05.98; опубл. 14.03.00; приоритет 12.05.98, US 09/076,612 (США).

2. Renzel P. Thickness Measurement with Ultrasound NOT Knowing the Sound Velocity. Док-

тупно: <http://www.ndt.net/forum/files/thickm-w-us-nksv-presentation.pdf> (accessed on 03 August 2016).

3. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. — СПб.: Гуманистика, 2009. — 904 с.

#### References

1. Carodiskey T.J., inventor. Krautkramer Branson, Inc., assignee. Method and apparatus for measuring the thickness of a coated material. USA Patent US 6,035,717. 2000 March 14.

2. Renzel P. Thickness Measurement with Ultrasound NOT Knowing the Sound Velocity. Available at: <http://www.ndt.net/forum/files/thickm-w-us-nksv-presentation.pdf> (accessed on 03.08.2016).

3. Potapov A.I., Syasko V.A. *Nerazrushayushchie metody i sredstva kontrolya tolshchiny pokrytiy i izdeliy* [Non-destructive methods and instruments for thickness measurements of coatings and products]. St. Petersburg, Gumanistika, 2009, 904 p. (in Russ.).

Статья получена 19 июля 2016 г.,  
в окончательной редакции — 1 августа

## Коротко

### НОВАЯ ТЕМАТИЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ «КОМПОЗИТЫ» «JEC GROUP» ОТКРЫВАЕТ КОНЕЧНЫМ ПОТРЕБИТЕЛЯМ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ДЕЛОВОГО СОТРУДНИЧЕСТВА, ИННОВАЦИЙ И ОБМЕНА ЗНАНИЯМИ

ПЕРВАЯ СЕССИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЕКЦИИ ПО ВОЛОКОННО-КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛАМ  
ПРОЙДЕТ 21-23 СЕНТЯБРЯ 2016 ГОДА В АУГСБУРГЕ (ГЕРМАНИЯ)

**Аугсбург, 14 июня 2016 г.** «JEC Group», крупнейшая в мире организация профессионалов по композитным материалам, совместно с одной из наиболее значимых выставочных площадок южной Германии «Messe Augsburg» и компанией «Carbon Composites e.V», входящей в немецкую торговую ассоциацию «Composites Germany» («Композиты Германии») и объединяющей производителей высококачественных волоконно-композитных материалов со всей южной Германии, учредили новую тематическую секцию «Композиты», на которой производители и конечные потребители смогут встретиться и найти решения для стоящих перед ними задач.

«Мы специально выбрали южную Германию в качестве площадки для новой секции, и не только потому, что здесь сконцентрированы высокотехнологичные волоконные производства, исследовательские центры и академии. Аугсбург находится в самом сердце впечатляющего рынка конечных потребителей, где рабо-

тают представители автомобильной, аэрокосмической промышленности, машиностроения», — поясняет Фредерика Мутель (Frederique Mutel), Президент и генеральный директор «JEC Group». — «Сессия «Высококачественные композиты и производство легковесных материалов» адресована представителям авиационной, автомобильной промышленности, энергетики, медицины, машиностроения.»

Действительно, место проведения встречи — один из ключевых моментов для привлечения тысяч посетителей и сотен брендов. «Мы гордимся, что можем рассчитывать на участие в работе секции крупных игроков, таких как «Bullmer», «Henkel», «Kuka», «Premium AEROTEC», «Polynt», «Schneider Electric» и «Siemens», не говоря уже о множестве менее крупных фирм, в целом представляющих весь кластер производства композитов», — добавляет Анне-Мануэле Герберт (Anne-Manuele Hebert), директор по продажам «JEC Group».

В течение трех дней участники смогут принять участие в следующих тематических конференциях:

- скоростная вулканизация с использованием ультрафиолетового излучения для автомобилестроения («BMW Group»);

- BladeMaker — технология серийного производства лопаток роторов турбин ветряных двигателей («Fraunhofer Institute»);

- обзор: использование углеродных волокон в медицине и спорте («Connectra Global»);

- сварка держателей из отверждаемого армированного углепластика («Airbus Group Innovations»);

- композиты в машиностроении («University of Applied Sciences», Augsburg).

Кроме того будут организованы посещения заводов компаний «Premium AEROTEC», «MT Aerospace» и «SGL Group», а также исследовательских центров «DLR/Fraunhofer», University of Augsburg, «University of Applied Sciences» (Augsburg) и «Aachen Institute for Technical Textiles».

**Тьерри-Алан Труонг**  
(Thierry-Alain Truong)  
«JEC Group»