

УДК 534-8

Измерение истинной толщины стенок ванн горячего цинкования ультразвуковым способом

Манаков Анатолий Сергеевич^(*)

smasheralchemist@gmail.com

Теплякова Александра Викторовна

smaest@mail.ru

Бунаков Антон

anton_bunakov@mail.ru

Паврос Кирилл Сергеевич

qnet@inbox.ru

Буракевич Дмитрий Алексеевич

burakevicdmitrij0@gmail.com

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается задача измерения толщины стенок ванн горячего цинкования без удаления расплавленного металла из ее объема. Показаны физические особенности объекта контроля, учитываемые при разработке специфичной методики неразрушающего контроля, включая толщину слоя гартцинк в точке измерения. Производится уточнение процесса измерений путем выбора пары эхо-сигналов из регистрируемых в данной точке. Приводятся результаты измерений толщины с помощью разработанного пьезоэлектрического преобразователя и методики контроля, а также результаты сравнения полученных данных с эталонными значениями толщины. Сделан вывод о возможности применения разработанной методики для диагностирования ванн горячего цинкования на действующих промышленных предприятиях.

Ключевые слова: толщинометрия, ванны горячего цинкования, двухслойные объекты, гартцинк

Method for ultrasonic measurement of the true wall thickness of hot-dip galvanizing baths

Manakov Anatoliy Sergeyevich^(*)

smasheralchemist@gmail.com

Teplyakova Aleksandra Viktorovna

smaest@mail.ru

Bunakov Anton

anton_bunakov@mail.ru

Pavros Kirill Sergeyevich

qnet@inbox.ru

Burakevich Dmitry Alekseevich

burakevicdmitrij0@gmail.com

ETU "LETI", Saint-Petersburg, Russia

Abstract. This paper considers the problem of measuring the thickness of hot-dip galvanizing bath walls without removing molten metal from its volume. The physical characteristics of the object under inspection are shown, which are taken into account when developing a specific non-destructive testing methodology, including the thickness of the zinc layer at the measurement point. The measurement process is refined by selecting a pair of echo signals from those recorded at a given point. The results of thickness measurements using the developed piezoelectric transducer and inspection methodology are presented, as well as the results of comparing the obtained data with reference thickness values. A conclusion is

made about the possibility of applying the developed method for diagnosing hot-dip galvanizing baths at operating production facilities.

Keywords: thickness measurement, hot-dip galvanizing baths, double-layer objects, hard zinc

Введение. Диагностирование состояния ванн горячего цинкования остается актуальным вопросом данной сферы производства ввиду отсутствия принципиально новых решений, направленных на снижение интенсивности разрушения этих ванн при осуществлении технологического процесса цинкования изделий. Фактическая толщина стенок ванн является основной величиной, используемой для оценки остаточной механической прочности данных сосудов, на основании которой принимается решение о необходимости выведения из эксплуатации или возможности дальнейшей эксплуатации ванны [1–3].

В настоящий момент существует несколько подходов к осуществлению толщинометрии стенок ванн горячего цинкования, среди которых наиболее известны визуально-измерительный контроль ванн с удаленным жидким цинком при комнатной температуре, а также использование обычных толщиномеров в этих условиях; расчет толщины стенок на основании известных температур ее участков [4]; и ультразвуковая толщинометрия с использованием высокотемпературного датчика без опустошения ванны [5].

Явными недостатками для первой группы вышеперечисленных способов являются повышенные временные и финансовые затраты, связанные с перемещением и хранением цинка вне ванны, повышенная опасность возникновения новых дефектов из-за охлаждения и нагревания сосуда и необходимость частичного или полного удаления термоизоляции ванны для осуществления.

Для реализации расчетного способа определения остаточной толщины стенок требуется использование ряда температурных датчиков, отсутствующих на большинстве предприятий горячего цинкования. Кроме этого, наличие слоя гартцинка на внутренней поверхности стенок ванн вносит свои осложнения в процесс измерения толщины — при опустошении ванны или проведении контроля с помощью высокотемпературных датчиков по существующей методике этот слой необходимо полностью удалять, что влечет за собой дополнительные трудозатраты и опасность повреждения самой ванны в процессе механической обработки поверхности ее стенок, а для расчетов толщины на основе температуры ванны присутствие данного слоя обуславливает дополнительную погрешность, требующую дальнейшего развития методологии с целью ее устранения.

В отличие от этих способов, измерение толщины стенок с использованием высокотемпературного ультразвукового преобразователя позволяет производить диагностирование ванн без значительных затрат со стороны предприятия, а методика неразрушающего контроля может быть разработана с учетом наличия слоя гартцинка с целью повышения точности измерений. Целью данной работы является разработка подобной методики измерений и ее испытание на реальных производственных объектах.

Материалы и методы. Разработка методики неразрушающего контроля была произведена на основе существующего высокотемпературного пьезоэлектрического преобразователя [6], работоспособность в реальных условиях которого была подтверждена предварительными испытаниями. При проведении измерений поверхность ванны сканируют в горизонтальном направлении на нескольких глубинах, шаг сканирования выбирают исходя из ожидаемого расположения дефектов толщины ванны, что в свою очередь обуславливается конструкцией ванны и системой ее нагрева. В то же время на поверхности стенок ванн всех подвидов встречаются участки, менее подверженные износу — для них использование малого шага сканирования нецелесообразно.

Предлагаемый способ измерения толщины представляет собой модифицированную реализацию эхо-импульсного метода ультразвукового контроля. В рассматриваемой задаче основной проблемой для существующих методов измерения толщины ультразвуковыми приборами является присутствие слоя гартцинка между контактной поверхностью ультразвукового преобразователя и стенкой ванны горячего цинкования — этот слой имеет переменную толщину, зависящую от ряда факторов, связанных с конструкцией и режимом обогрева сосуда, и величина толщины этого слоя не является пренебрежимо малой. С другой стороны, толщина слоя гартцинка не используется для оценки остаточной механической прочности ванны — для этого требуется истинная толщина стенок, однако расчет толщины на основании времени прихода сигнала, отраженного от донной поверхности объекта контроля, что является типичным принципом работы существующих толщиномеров, предоставит только совокупную толщину стенки и слоя гартцинка. Соответственно, для реализации предлагаемой методики необходимо рассмотрение отраженных сигналов, несущих в себе информацию об отдельных толщинах присутствующих сред. В общем случае в стенке ванны, на поверхности которой присутствует слой гартцинка, возможно наблюдение нескольких отраженных сигналов.

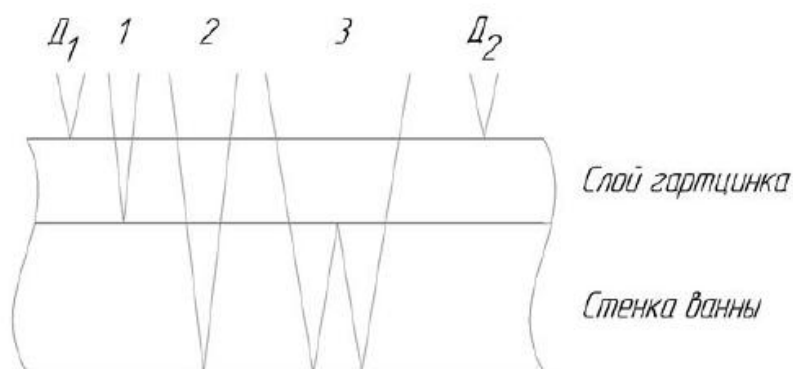


Рис. 1. Основные отраженные сигналы:

D_1 и D_2 — отражения от контактной поверхности внутри волновода преобразователя, 1 — отражение в слое гартцинка от его донной поверхности, 2 — отражение от донной поверхности стенки ванны, 3 — двукратное отражение от донной поверхности стенки с внутренним отражением от фронтальной поверхности стенки

Однако в реальных условиях в одной точке измерения на поверхности стенки регистрируется лишь часть из вышеописанных сигналов — это обуславливается толщиной слоя гартцинка в этой точке и равномерностью его поверхности. Из практики контроля было выявлено три основных случая, связанных с возможностью регистрации тех или иных отраженных сигналов — слой гартцинка малой толщины (приблизительно менее 2 мм), слой гартцинка большой толщины (приблизительно более 2 мм) с равномерной поверхностью и слой гартцинка большой толщины с присутствием локальных неравномерностей его толщины. В каждом из этих случаев для измерения толщины выбирается отраженный сигнал с самой большой амплитудой и соседний сигнал со второй по величине амплитудой. Измерив значения времени прихода каждого из двух сигналов, становится возможным вычислить искомую толщину стенки ванны.

В первых двух случаях — если слой гартцинка «тонкий» или «толстый и равномерный» — в качестве отраженных сигналов, несущих в себе искомую информацию о толщине стенки ванны, выступают сигнал, соответствующий однократному отражению от донной поверхности стенки (сигнал 2) и сигнал, соответствующий внутреннему отражению от фронтальной поверхности стенки с двукратным отражением от дна стенки (сигнал 3). Сигнал 2 несет в себе информацию о совокупной толщине двух слоев, а сигнал 3 — о толщине слоя гартцинка, поэтому вычитая время прихода этих двух сигналов с учетом траектории волны, дающей сигнал 3, становится возможным расчет истинной толщины стенки ванны. В случае «толстого и неравномерного» слоя гартцинка контакт между ним и пьезоэлектрическим преобразователем ухудшается, и в результате сигналы, которым соответствует относительно большая акустическая длина пути, т. е. претерпевающие многократные отражения в присутствующих слоях, начинают становиться неразличимыми на фоне шума. С другой стороны, увеличенная толщина гартцинка позволяет зарегистрировать сигнал 1, соответствующий отражению звуковой волны от донной поверхности слоя гартцинка — при малой толщине гартцинка этот сигнал неразличим на фоне внутреннего отражения от контактной части волновода преобразователя D_1 . С учетом вышеперечисленных положений, вычисление толщины стенки будет производиться по следующим формулам:

$$H_{\text{ст}} = c_{\text{ст}}(t_3 - t_2) \times \frac{1}{2}; \quad (1)$$

$$H_{\text{ст}} = c_{\text{ст}}(t_2 - t_1) \times \frac{1}{2}, \quad (2)$$

где $H_{\text{ст}}$ — истинная толщина стенки, м; $c_{\text{ст}}$ — скорость звука в материале стенки (стали), м/с; t_3 — время прихода сигнала 3, с; t_2 — время прихода сигнала 2, с; t_1 — время прихода сигнала 1, с.

Формула (1) применяется для случаев «тонкого» и «толстого и равномерного» слоя гартцинка, формула (2) применяется для случая «толстого и неравномерного» слоя гартцинка.

Результаты. Типичные результаты измерений с помощью высокотемпературного пьезоэлектрического преобразователя с прямым волноводом представлены на рис. 2–4.

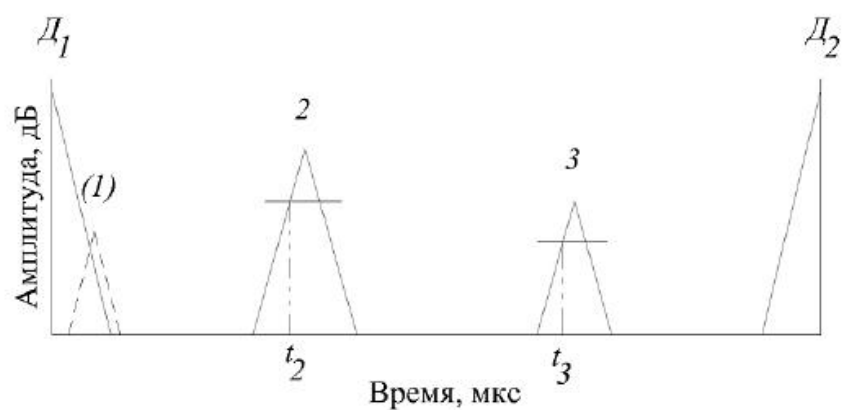


Рис. 2. А-развертка при измерении на слое гартцинка толщиной менее 2 мм

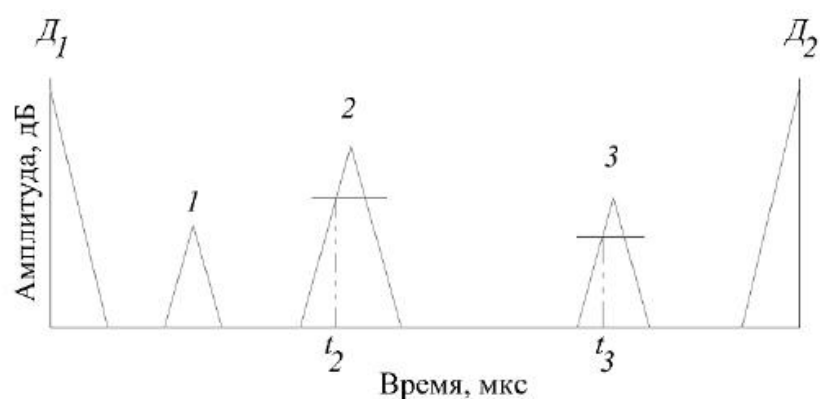


Рис. 3. А-развертка при измерении на ровном слое гартцинка толщиной более 2 мм

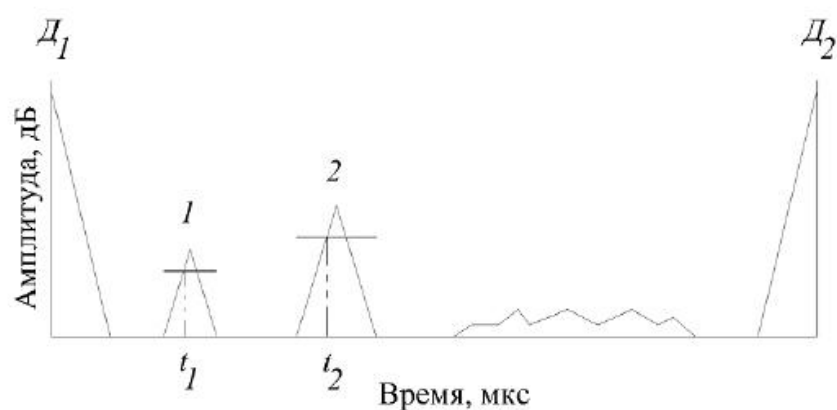


Рис. 4. А-развертка при измерении на неровном слое гартцинка толщиной более 2 мм

Длина развертки и смещение нуля развертки подобраны таким образом, чтобы на границах экрана располагался временной интервал между сигналами D_1 и D_2 , соответствующим отражениям звука от донной поверхности волновода пьезоэлектрического преобразователя. Как можно заметить, во всех случаях четко регистрируется однократно отраженная от донной поверхности стенки волна, и этот сигнал используется во всех случаях для вычисления искомой толщины. Однако при изменении толщины слоя гартцинка время прихода сигналов, соответствующих многократным отражениям от различных границ раздела сред либо неразличимы отдельно от донных сигналов для волновода, если слой гартцинка тонкий (рис. 2), либо разница времен прихода становится достаточно большой для отдельной их регистрации, если слой гартцинка достаточно толстый (рис. 3). Поскольку в обоих рассмотренных случаях также возможна четкая регистрация сигнала 3, соответствующая внутреннему отражению волны в стенке ванны, целесообразно использовать его для расчета искомой толщины по формуле (1). На рис. 4 показана развертка на экране дефектоскопа, полученная при измерении в точке, где внешняя поверхность гартцинка отличается неровностью, из-за чего сигналы во второй половине заданного интервала становятся неразличимыми на фоне шума, включая сигнал 3. Однако из-за большой толщины слоя гартцинка становится возможной регистрация сигнала 1, соответствующего отражению волны от границы раздела гартцинк-стенка, и тогда искомая истинная толщина стенки может быть рассчитана по формуле (2).

Обсуждение полученных результатов. Для оценки точности измерений с помощью разработанной методики на выведенных из эксплуатации ваннах горячего цинкования, с поверхности которых был удален слой гартцинка, были произведены дополнительные измерения толщины с использованием ультразвукового толщиномера A1211 Mini. Результаты приведены на рис. 5.

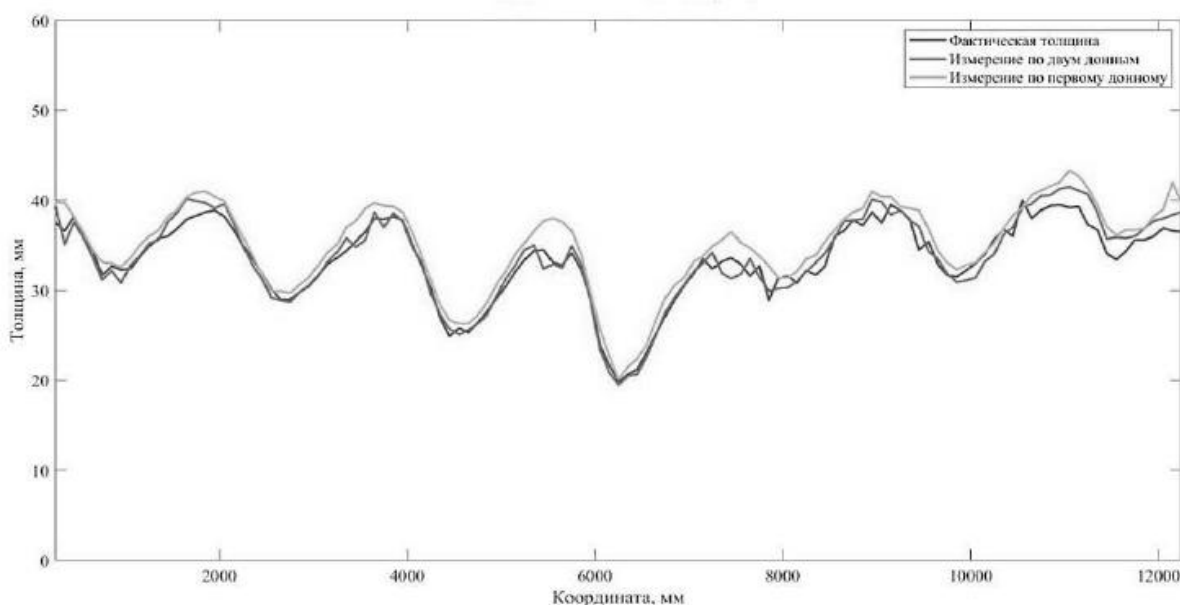


Рис. 5. Сравнение результатов измерения толщины несколькими способами

Из графика, представленного на рис. 5, отчетливо заметна ошибка измерения толщины по одному донному сигналу — эта величина включает в себя толщину слоя гартцинка, из-за чего ее нецелесообразно использовать для исходной задачи технической экспертизы. С другой стороны, полученные с помощью разработанной методики значения толщины лучше отражают реальное распределение истинной толщины стенки по ее длине и совпадают с референсными значениями с максимальным отклонением в отдельных точках до 2 мм. Исходя из этого можно сделать вывод, что представленная методика обеспечивает высокую точность измерений в контексте поставленной задачи неразрушающего контроля — диагностирования и оценки остаточной механической прочности ванн горячего цинкования.

Заключение. Контроль толщины стенок ванн горячего цинкования представляет собой нестандартную задачу неразрушающего контроля ввиду необходимости работы в среде расплавленного цинка, имеющего температуру до 500 °С, что обуславливает необходимость использования специализированного оборудования, сохраняющего работоспособность в агрессивных условиях рабочей среды. Кроме того, структура объекта контроля, в которой выделяется два слоя — материала ванны и гартцинка — обуславливает невозможность использования существующих методов толщинометрии для получения результатов с требуемой точностью. Основной задачей разработанной методики измерения являлся учет толщины слоя гартцинка при измерении истинной толщины стенки ванны, а не совокупной толщины стенки и слоя гартцинка, которая не может обеспечить корректную оценку остаточной прочности сосуда.

Список источников

- [1] ГОСТ 34233.1–2017. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования*. Москва, Стандартинформ, 2019, 38 с.
- [2] ГОСТ 14249–89. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность*. Москва, Стандартинформ, 2008, 56 с.
- [3] РД 10-249–98. *Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды*. Москва, ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010, 344 с.
- [4] Pinger T. Hot-dip galvanizing device and hot-dip galvanizing method. Patent no. US11795534B2 USA, Fontaine Holdings NV, 2023, 26 p.
- [5] Dr Ing Baersch W. Method for measuring the wall thickness of a zinc-plating (galvanising) bath. Patent no. DE3622106A1 Germany, ILGERS AG, 1988, 6 p.
- [6] Теплякова А.В., Мананов А.С., Бунаков А., Паврос К.С. *Ультразвуковой датчик для неразрушающего контроля толщины стенок ванн горячего цинкования*. Патент № RU238139U1 РФ, МПК G01B17/02, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025, 7 с.