

МЕТОД БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО КОНТАКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА В ИММЕРСИОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ЖИДКИХ СРЕДАХ

© 2022 г. О. Шаповалов*

Brandenburg University of Technology, Cottbus, Germany

*e-mail: oleg.shapovalov@b-tu.de

Поступила в редакцию 13.07.2021 г.

После доработки 07.10.2021 г.

Принята к публикации 08.10.2021 г.

Представлены концепция и тестирование новой модификации изобретенного ранее ультразвукового преобразователя для толщинометрии в высокотемпературных иммерсионных средах. Суть модификации заключается в удалении нижнего электрода пьезоэлемента и использовании электропроводности окружающей жидкости для передачи электрического заряда на контактирующую с жидкостью поверхность пьезоэлемента. Благодаря отсутствию заземляющего электрода разработанная технология обеспечивает заметное повышение точности прибора, а также значительное улучшение отношения сигнал/шум. Кроме того, предложенная модификация позволяет снизить нижнюю границу измеряемой толщины. Это обеспечивается за счет укорочения посылаемого ультразвукового импульса благодаря минимизации рассеяния излучаемого сигнала, обусловленного в исходном варианте нижним электродом. Таким образом, несмотря на некоторые отдельные сложности, которые могут возникнуть при применении модифицированного преобразователя, представленная концепция обеспечивает заметное улучшение качества измерения.

DOI: 10.31857/S0032816222010220

1. ВВЕДЕНИЕ

Некоторые области промышленной обработки металла при высоких температурах требуют постоянного ультразвукового мониторинга состояния функциональных частей и оборудования (например, измерение остаточной толщины стенок ванны цинкования, обсужденное в работе [1]). В преобразователях, предназначенных для таких применений (например, в запатентованной технологии [2]), водонепроницаемый корпус часто изготавливается из нержавеющей стали, что позволяет обеспечить не только защиту внутренних составляющих прибора от окружающей высокотемпературной жидкости, но и перенос электрического сигнала на нижнюю поверхность пьезоэлемента. Таким образом, нижний электрод, являющийся частью корпуса и находящийся непосредственно на пути прохождения ультразвукового сигнала при измерении, дополнительно ослабляет и рассеивает передаваемый сигнал, что отрицательно сказывается на качестве измерения.

Однако большинство промышленных высокотемпературных жидкостей, таких как гальванические растворы или расплавы солей (как было ис-

следовано в работе [3]), обладает хорошей электропроводностью, что позволяет потенциально заменить нижний электрод на проводящую иммерсионную жидкость.

Цель данной работы – разработка метода безэлектродного контактирования пьезоэлемента, а также проверка влияния предложенного метода на измерительные характеристики прибора.

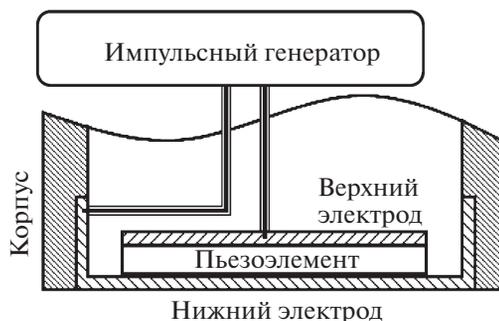


Рис. 1. Общий принцип контактирования пьезоэлемента в ультразвуковом преобразователе.

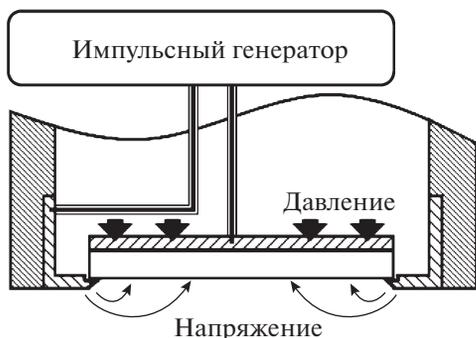


Рис. 2. Принцип безэлектродного контактирования пьезоэлемента.

2. ПРИНЦИП БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО КОНТАКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА

При ультразвуковом исследовании акустический сигнал, как правило, генерируется механической вибрацией пьезоэлектрического элемента. Для создания необходимого сигнала к поверхности пьезоматериала равномерно прикладывается электрическое напряжение. Это может быть достигнуто, например, с помощью токопроводящего покрытия пьезоэлемента (посредством, к примеру, металлизации) или же с помощью плоских электродов (рис. 1).

При иммерсионном ультразвуковом анализе заземляющий электрод часто является составной частью водонепроницаемого корпуса прибора. Поэтому (поскольку заземляющий электрод расположен непосредственно на пути сигнала во время измерений) использование этого электрода приводит к дополнительному ослаблению и

рассеянию передаваемого сигнала, что отрицательно сказывается на качестве измерений.

Однако если иммерсионная среда имеет хорошую электропроводность, то описанная проблема может быть решена путем удаления заземляющего электрода (рис. 2). В этом случае жидкость может служить электродом, обеспечивая перенос напряжения с заземляющего электрода на открытую поверхность пьезоэлемента через электрическое возбуждение среды (см. длинные стрелки на рис. 2). Необходимыми условиями для этого, помимо проводимости, являются смачиваемость пьезоматериала и его физико-химическая стабильность по отношению к жидкости.

3. МАТЕРИАЛЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Для реализации описанной выше идеи безэлектродного контактирования был использован прототип ультразвукового преобразователя для применения в высокотемпературном иммерсионном цинковом расплаве с целью измерения остаточной толщины стенок ванн цинкования, изобретенный Бершем с соавторами в 1994 г. [2]. Фото прототипа и исходная схема устройства изображены на рис. 3.

Согласно описанию устройства данного преобразователя, один из проводников импульсного генератора подключен к металлическому демпферу преобразователя (красный штрихпунктирный контур на рис. 3б), установленному на верхней поверхности пьезокристалла и служащему, таким образом, верхним электродом. При этом второй проводник подключен к стальному токопроводящему корпусу, который переносит заряд на нижнюю поверхность пьезоэлемента через нижний электрод, являющийся составной частью

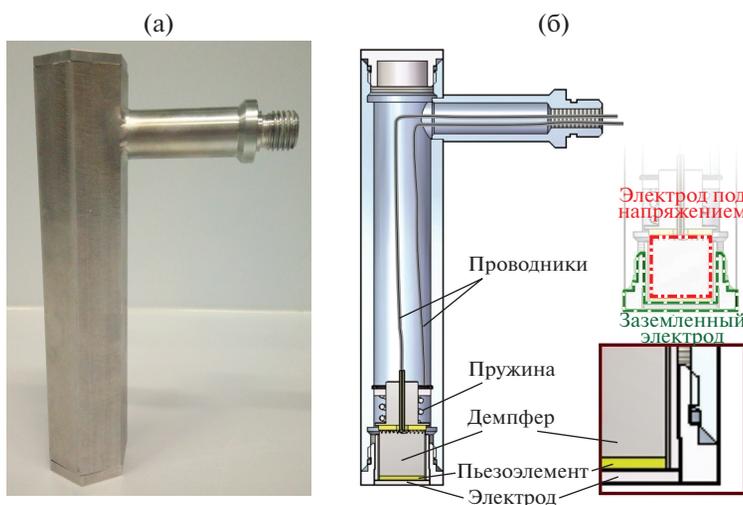


Рис. 3. Ультразвуковой иммерсионный преобразователь для толщинометрии в высокотемпературных средах: а – внешний вид, б – исходная схема его устройства.

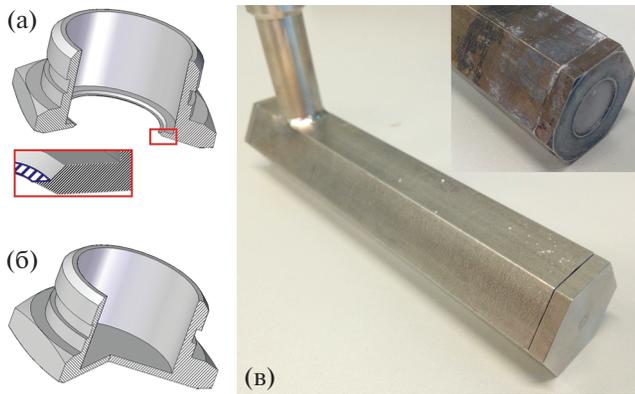


Рис. 4. Крышка корпуса высокотемпературного преобразователя в ее модифицированном (а) и исходном (б) вариантах (вид в разрезе); а также их фото (в).

крышки преобразователя (зеленый штриховой контур на рис. 3б). Для переноса электрического и акустического сигналов от пьезоэлемента к нижнему электроду используется слой на основе смеси легкоплавких стекол. Поскольку при помещении прибора в высокотемпературную среду и полном расплавлении связующего слоя внутренние функциональные элементы оказываются связанными через жидкое вещество, для их “скрепления” используется пружина сжатия, приложенная сверху к демпферу.

Для реализации и проверки предложенной идеи безэлектродного контактирования были изготовлены два прототипа описанного ультразвукового преобразователя: первый – описанной конструкции, а второй – с удаленным (посредством вырезания круглого отверстия в нижней крышке корпуса преобразователя) нижним электродом. Исходная форма нижней крышки, отмеченная на рис. 3б зеленым штриховым контуром, представлена на рис. 4б в трехмерном виде. Рис. 4а, в свою очередь, отображает ее модифицированный вариант.

Во втором прототипе преобразователя край выполненной прорези имеет ступенчатую форму: внутренний диаметр опорной поверхности для пьезоэлемента (отмечена крупной синей штриховкой на рис. 4а) на 1 мм меньше размера самого пьезокристалла, а внешний диаметр на 0.4 мм больше, чтобы пьезоэлемент можно было плотно поместить на изготовленный профиль прорези (рис. 5).

Нижняя поверхность прорези выполнена в виде фаски с углом 45° , чтобы минимизировать ее влияние на распространение акустического сигнала и облегчить отведение воздушных полостей (“пузырей”), которые могут быть захвачены при погружении преобразователя в иммерсионную среду.

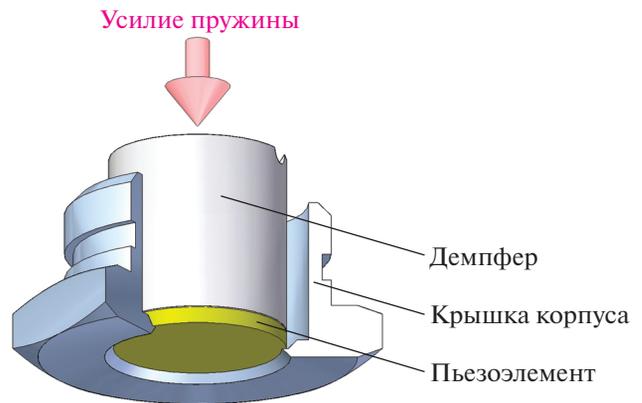


Рис. 5. Расположение пьезоэлемента на опорной поверхности прорези (вид в разрезе).

Непроницаемость конструкции, несмотря на отсутствие уплотнительного слоя на опорной поверхности, достигается посредством основательной подготовки и высокой точности изготовления поверхностей как пьезокристалла, так и прорези в сочетании с достаточным внутренним усилием пружины, приложенной к демпферу сверху и прижимающей пьезокристалл к опорной поверхности. Сила напряжения пружины сжатия должна при этом превышать силу гидростатического давления, действующего со стороны иммерсионной жидкости. Следовательно, необходимое усилие пружины F_{spring}^{min} (расположение пружины такое же, как в стандартной конструкции, см. рис. 1), прижимающее пьезокристалл к опорной поверхности, должно соответствовать максимальному гидростатическому давлению жидкости P_{hydr}^{max} (зависящему, в свою очередь, от наибольшей применяемой глубины погружения h_{max} и плотности жидкости ρ_{liq}):

$$F_{spring}^{min} = P_{hydr}^{max} a_{piez-liq}, \quad (1)$$

$$P_{hydr}^{max} = \rho_{liq} g h_{max}, \quad (2)$$

где $a_{piez-liq}$ – площадь открытой поверхности пьезоэлемента, контактирующей с жидкостью.

В нашем случае при сборке преобразователей была использована пружина, напряженная до 40 Н, что немного выше рассчитанной максимальной гидростатической силы $P_{hydr}^{max} = 37$ Н (для погружения на глубину до $h_{max} = 2$ м в жидкий цинк плотностью $\rho_{liq} = 6620$ кг/м³ [4] с диаметром открытой поверхности пьезоэлемента 19 мм).

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕСТ И АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для оценки влияния безэлектродного контактирования на измерительные характеристики высоко-

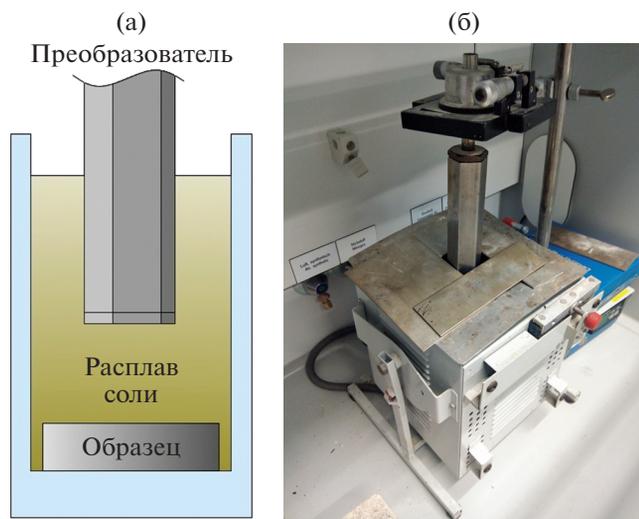


Рис. 6. Схема (а) и фото (б) установки для сравнительных испытаний.

температурного ультразвукового преобразователя мы в качестве теста провели высокотемпературную иммерсионную толщинометрию с использованием преобразователей как стандартной, так и модифицированной конструкции. Тестовый образец представлял собой пластину из нержавеющей стали (толщина 15 мм), помещенную в ванну с расплавом соли при 500°C. Схема и фото экспериментальной установки представлены на рис. 6.

Результаты проведенного тестирования представлены в виде распределения эхосигналов на рис. 7.

На обоих изображениях можно отчетливо различить от трех до четырех интенсивных входных эхосигналов, удаленных друг от друга в зависимости от расстояния между датчиком и тестовой пластиной, за которыми следуют в свою очередь

множественные эхосигналы, отраженные от задней стенки тестовой пластины и характеризующие ее толщину.

Для лучшего представления эхосигналов задней стенки (которые были относительно слабыми по сравнению с первым входным эхосигналом) мы применили усиление (указанное в правом верхнем углу каждого изображения) на основе величины второго входного эхосигнала.

Согласно рис. 7, модифицированный преобразователь по сравнению с преобразователем традиционной конструкции (с присутствующим нижним электродом) показывает гораздо более высокую чувствительность во время теста. Величина второго входного эхосигнала, принятая преобразователем с безэлектродным контактированием пьезоэлемента, примерно на 6 дБ превышает амплитуду сигнала, отображенную преобразователем традиционной конструкции. Кроме того, благодаря отсутствию рассеяния сигнала удаленным электродом, профили эхосигналов стали значительно короче при одновременно заметно более низком уровне шума. Это дает значительные преимущества при применении в толщинометрии, позволяя не только повысить точность измерения, но и снизить нижнюю границу измеряемой толщины [5]. Полуширина профиля сигнала, а также отношение сигнал/шум, измеренные на втором входном эхосигнале, приведены в табл. 1.

Помимо повышения качества измерительных характеристик, изобретение обеспечивает существенные конструктивные и производственные упрощения. Безэлектродное контактирование позволяет сократить процесс изготовления преобразователя на несколько этапов: помимо отсутствия самого связующего слоя между электродом и пьезоматериалом, нет необходимости в дорогостоящей и сложной защите поверхности электро-

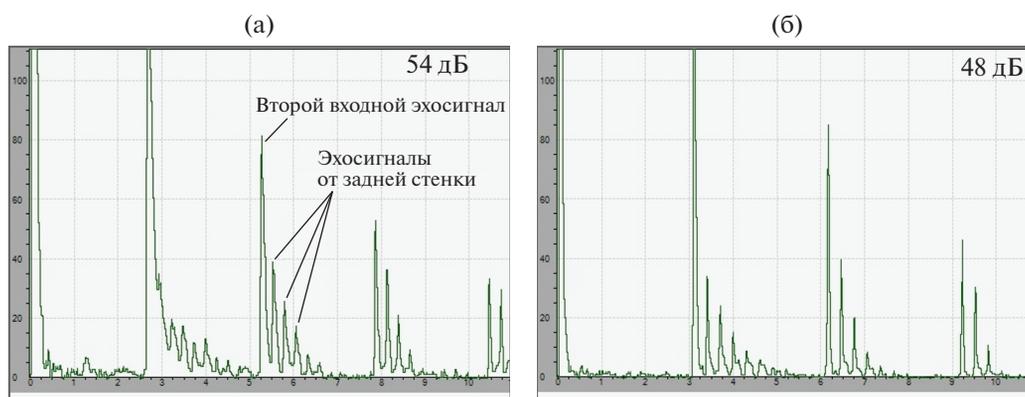


Рис. 7. Сравнительные измерения на стальном образце в солевом расплаве, выполненные преобразователем стандартной конструкции (а) и модифицированной (б). Изображения получены с помощью ультразвукового дефектоскопа ЕРОСН 1000i; передаваемое напряжение 200 В; прямоугольный импульс; собственная частота пьезоэлемента 2 МГц.

Таблица 1. Сравнение эхосигналов преобразователей традиционной и модифицированной конструкций

Вариант конструкции	Полуширина сигнала, мкс	Сигнал/шум, дБ
Традиционный	2.6	39
Модифицированный	1.2	48

да от коррозии, обусловленной агрессивным воздействием высокотемпературного расплава стекла, составляющего основу связующего слоя [3].

Тем не менее, стоит указать, что реализация предложенной безэлектродной конструкции ультразвукового преобразователя может ограничить его применение в некоторых отдельных случаях (например, если поверхность использованного пьезоэлектрического материала плохо смачивается иммерсионной жидкостью или же не является достаточно химически устойчивой для контакта с данной средой). Кроме того, удаление заземляющего электрода делает поверхность пьезоэлемента

механически незащищенной, что может потребовать использования определенных защитных конструкций в случае, если присутствует риск повреждения его поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hecht A., Neumann E.* // Metall. 1986. V. 40. P. 238.
2. *Bärsch W., Blasius D., Kanngiesser P., Podgorski J., Matthies K., Mrasek H., Beyer R.* Patent EP 0459431 B1. European Patent Office, 1994.
3. *Bloom H., Knaggs I.W., Molloy J.J., Welch D.* Molten salt mixtures. Part 1. Electrical conductivities, activation energies of ionic migration and molar volumes of molten binary halide mixtures. Transaction of the Faraday Society, 1953. V. 49. P. 1460.
4. *Richards G.G., Dreisinger D., Peters. E., Brimacombe J.K.* // Proc. of the International Symposium on Computer Software in Chemical and Extractive Metallurgy. Vancouver, B.C., Canada: The University of British Columbia, 1989. P. 245.
5. *Kenneth A.F., Gerry M.E., Karen A.S., Thomas J.N.* // Journal of British Institute of Non-Destructive Testing. 1997. V. 2. № 10. P. 5.