

## Разработка ультразвукового метода измерения состояния электролита при плазменно-электролитном процессе

И.Х.А.Аль Умари<sup>1</sup>, В.Г. Саиткулов<sup>2</sup>, Н.Ф.Кашанов<sup>1</sup>, Р.Н. Кашанов<sup>1</sup>,  
В.П.Иванов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань

<sup>3</sup>ФГУП Государственный институт прикладной оптики, Казань

**Аннотация:** В настоящей статье рассматривается создание ультразвукового метода измерения состояния электролита в процессе горения разряда с электролитическим электродом. У традиционных электрохимических, электроэрозионных, электротермических и электромеханических методов электрического воздействия на поверхность металлов есть недостатки. К ним относятся: а) большой расход энергии; б) загрязнение экологии; в) проблема утилизации побочных продуктов; г) сложность получения необходимого профиля поверхности в нужных масштабах. В связи с этим важной является проблема создания и исследования новых энергосберегающих, экологически чистых и экономически выгодных методов. В настоящий момент в многофазных средах не проводят экспериментальные исследования разряда. Условия зажигания разряда с электролитическим катодом также не исследованы. Физические процессы на границе раздела плазмы и жидкости не изучены. Отсутствует механизм влияния разряда в парогазовом пузырьке на поверхность металлов. Перечисленные выше причины замедляют создание технологии плазменно-электролитного формирования микрорельефа поверхности. Цель работы: измерить и оптимизировать ультразвуковой сигнал; рассчитать спектр частот отраженных колебаний ультразвука от большого количества отражателей (пузырьков электролита); разработать математическое моделирование процесса отражения ультразвука от пузырьков электролита.

**Ключевые слова:** ультразвук, электролит, методика, горение разряда, измерение.

Технологий обработки материалов множество, и одним из современных методов обработки поверхности металлов является плазменно-электролитный процесс. Он осуществляется подачей напряжения на электроды, помещенные в раствор электролита. В итоге вокруг активного электрода можно увидеть горение парогазового разряда. Особенностью этого разряда является то, что горит он между жидким и твердым электродом. Анод или катод может быть активным электродом. В процессе горения разряда на катоде происходит процесс очистки и полировки изделия, подвергаемого обработке. Помимо этого, в определенных условиях можно

---

наносить покрытия. В случае с анодным процессом на «вентильных» металлах происходит анодное оксидирование вместе с горением микродуг. Этот процесс называется микродуговым оксидированием. На металлах, которые не обладают «вентильным эффектом», можно наблюдать эрозионное разрушение металла и его анодное растворение [1, с. 245].

В настоящее время нет систематических экспериментальных исследований разряда в многофазных средах. Не исследованы условия зажигания разряда с электролитическим катодом. Не изучены физические процессы на границе раздела плазмы и жидкости. Отсутствует механизм влияния разряда в парогазовом пузырьке на поверхность металлов. Перечисленные выше причины замедляют разработку технологии плазменно-электролитного формирования микрорельефа поверхности.

Так как пузырьки в электролите сферической формы, то расчет зависимости амплитуды сигнала от ее объема проводится с использованием теории отражения ультразвука от сферы, что описано в работе Ермолова «Теория и практика ультразвукового контроля» [2, с. 480-485].

Расстояние между приемником и дефектом, вид дефекта (сфера, отверстие, имеющее сферическое дно, отверстие с плоским дном, плоскость, боковое отверстие цилиндрической формы), заполнение дефекта (воздух или другой газ) влияют на амплитуду отражения сигнала ультразвука от дефекта. Они оказывают большее влияние на силу отражения амплитуды сигнала.

Расчет амплитуд эхосигналов для отражения от сферы или отверстия со сферическим дном диаметром  $d$  проводится следующим образом:

$$\frac{A'}{A_0} = \frac{S_d}{4\lambda r^2} e^{-2\delta r}, \quad (1)$$

где:  $A_0$  и  $A'$  – амплитуды излученного и принятого преобразователем сигналов;  $S$  – площадь пьезоэлемента преобразователя;  $r$  – расстояние от преобразователя до отражателя;  $\lambda$  – длина волны.

Ослабление сигнала  $A'/A_0$ , которое определяется приведенными формулами, называется дифракционным. Дополнительное ослабление отношения  $A'/A_0$  приводит к тому, что ультразвук ослабевает. Чтобы учесть это, все формулы умножают на  $\exp(-2\delta r)$ , где  $\delta$  является коэффициентом затухания ультразвука. Показатель степени имеет цифру 2, так как ультразвук проходит до отражателя и обратно. Формулы актуальны в том случае, если диаметры диска, сферы или цилиндра больше, чем половина длины волны. Если они меньше ее половины, то амплитуда отражения с уменьшением диаметра, как правило, при дифракционном огибании дефекта волнами будет убывать быстрее. Учитывая это, считается, что дефекты, которые меньше длины волны, сложно выявить. Для отражения от отверстия с плоским дном или отверстия, имеющего сферическое дно, формулы остаются актуальными, даже если их диаметры меньше, чем длина волны, так как боковые стенки являются препятствием огибанию [3, с. 56].

Работа ультразвуковых анализаторов основана на излучении колебаний ультразвука в электролите с пузырьками и твердыми частицами, которые имеют различные физико-химические свойства, и приеме импульсов ультразвука, отраженных от них. Определение характера отражения колебаний ультразвука от отражателей, которые обладают такими свойствами, дает возможность формулировать основные параметры приемопередающего блока, создавать алгоритм обработки отраженного сигнала, что позволяет получать данные о массовом содержании. Существенно отраженные колебания можно будет наблюдать, если размер отражателя соизмерим с длиной волны и больше [4, с. 256].

Из ультразвуковой дефектоскопии каждая точка в сфере считается вторичным излучателем ультразвука. Так как пузырек в электролите обладает сферическим типом дефекта, то ультразвуковое отражение можно представить в виде уравнения:

---

$$\frac{P^1}{P_0} = \frac{\lambda^2}{S_0} I^2 A_c, \quad (2)$$

Если диаметр сферы имеет существенно меньшую длину волны:

$$\left| \frac{P^1}{P_0} \right| = \frac{\lambda^2}{S_0} \left| \frac{S_0}{\lambda x} \right|^2 \frac{4,3d^3}{\lambda^3} = \frac{4,3S_0d^3}{\lambda^3 x^2}, \quad (3)$$

Умножением числителя и знаменателя выражения (3) на  $4\pi/3$  получаем:

$$\left| \frac{P^1}{P_0} \right| = \frac{4,3 \cdot S_0 8 \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{4}{3} \pi \lambda^3 x^2}, \quad (4)$$

выражение приобретает вид:

$$\left| \frac{P^1}{P_0} \right| = \frac{25,8 \cdot S_0}{\pi \lambda^3 x^2} V, \quad (5)$$

В процессе излучения ультразвукового зондирующего сигнала, представляющего собой непрерывную синусоиду, и приеме отраженных от пузырьков импульсов, следует устранить наведенный сигнал на приемном преобразователе.

На практике это сделать невозможно. Один из способов решения данной проблемы – возбуждение сигналом импульса передающего преобразователя. Отраженные импульсы следует принимать через некоторое время, исходя из того, что в момент времени их прихода амплитуда наведенного сигнала от зондирующего импульса будет очень мала. Предлагаем реализовать этот сигнал как произведение единичной функции, синусоиды и экспоненты [5]. При этом использован такой коэффициент затухания экспоненциальной составляющей  $\tau$ , чтобы обеспечить минимальный уровень шума от зондирующего сигнала во время прихода импульсов, которые отражены от пузырьков:

$$f(t) = \gamma(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (6)$$

Чтобы реализовать ультразвуковой контроль, был рассмотрен вариант с применением более низких частот, при котором наблюдается несущественное затухание ультразвука в воде на расстояниях 50-100 мм.

С другой стороны, если частота ультразвука будет слишком низкой, то показатель амплитуды отраженного сигнала приблизится к нулю.

Попробуем рассмотреть представленную установку (рис. 1).

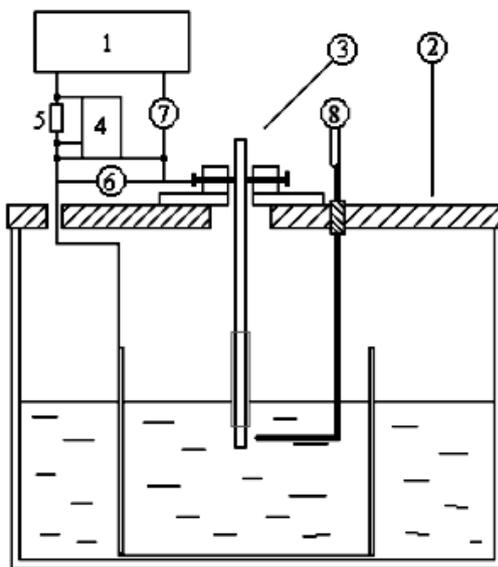


Рис. 1. – Установка.

В нее входит: источник тока 1, электролитическая ванна 2, электродная система 3, осциллограф 4, добавочное сопротивление 5, вольтметр 6, амперметра 7, термопары 8. При помощи источника питания 1 осуществляется подача регулируемого постоянного напряжения на электродную систему 3 по токоподводам. Глубину погружения анода в раствор электролита контролировали электродной системой. Используя осциллограф 4, осуществлялся контроль формы подаваемого напряжения и тока. Напряжение и ток разряда измеряли вольтметром и амперметром.

1) Нагрев электролита, циркулирующего через зону разряда, начинался после зажигания разряда. Спустя 30 с нагрева изменение температуры прекращается и наступает тепловое равновесие.

2) Измерения начинались через 40 с после зажигания разряда. В лабораторную литровую колбу для сбора воды опускался сливной шланг. Термометр, который показывает температуру воды в реальном времени, омывался стекающей водой. При помощи секундомера фиксировали время начала и завершения отбора воды. Определение точного объема воды, которая собралась в колбе, осуществлялось при помощи мерного лабораторного цилиндра, его емкость 0,25 литров.

3) Значение напряжения, тока разряда, показания термометра, секундомера, которые были получены при этих параметрах разряда, количество собранной воды фиксировали в рабочем журнале. Чтобы усреднить полученные значения, калориметрические измерения для каждого значения мощности разряда 10 раз повторяли калориметрические измерения.

Таким образом, ультразвуковой метод дает возможность повысить точность измерения, оперативно получить результаты, обеспечивая при этом полностью автоматизированный процесс, который отличается такой особенностью, как работа на относительно не высоких частотах, при которых ультразвук в воде затухает достаточно медленно [6]. В данном случае этому способствует новый алгоритм цифровой обработки сигнала и использование высокоэффективного акустического экрана в конструкции ультразвукового преобразователя.

### Литература

1. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении — Изд-во «Свен» Санкт-Петербург, 2011, 305 с.



2. Кеун Дж. Электронное моделирование в OrCAD: переводное издание / Дж. Кеун. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 628 с
  3. Дзюба С.А. Основы магнитного резонанса. Ч. I: Спектры магнитного резонанса: Учеб. пособие / Новосиб. ун-г. Новосибирск, 2009. – 108 с.
  4. Шестеркин А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10: научно-популярная литература / А. Н. Шестеркин. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 360 с.
  5. Багаутдинова, Л.Н. Многоканальный разряд в проводящей жидкости при атмосферном давлении // Л. Н. Багаутдинова, Ф. М. Гайсин / Теплофизика высоких температур – 2010. - Т. 48, № 1. - С. 135-138.
  6. Кашапов, Р.Н. О влиянии коэффициента пульсации напряжения на плазменно-электролитный процесс / Р.Н. Кашапов // Сборник статей II Республиканской научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», Казань – 2011. С. 175-183.
  7. Решетов А.А. Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов: Учеб. пособие. — Изд-во Чувашского университета, 2010, 470 с.
  8. Nondestructive Testing Handbook. Second Edition, v. 7. Ultrasonic Testing // American Society for Nondestructive Testing, 1991. P.313
  9. Synthesis and characterization of hard metal coating by electro-plasma technology 1594. / P. Gupta, E.O. Daigle, P.J. Schilling // Surface and coating Technology, 2005. P. 200.
  10. А.В. Угольков Применение многоэлементных пьезопреобразователей при скоростной ультразвуковой дефектоскопии рельсов железнодорожного пути // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1579.
-



11. Тарасов С.П., Тимошенко В.И., Воронин В.А., Кириченко И.А., Пивнев П.П., Солдатов Г.В., Волощенко А.П., Эсси-Эзинг А.С., Обыденная В.А., Франчук Д.А. Измерение фазочастотной характеристики приемной антенны многолучевого эхолота в условиях гидроакустического бассейна // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 1) URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227).

### R

1. Kretov E. F. Ul'trazvukovaya defektoskopiya v energomashinostroenii [Ultrasonic inspection in engineering]. Sven, Saint-Petersburg, 2011. 305 p.

2. Keown George. Elektronnoe modelirovanie v OrCAD: perevodnoe izdanie [Electronic modeling in OrCAD: translated edition]. Moscow: DMK Press, 2010. 628 p.

3. Dzyuba S. A. Osnovy magnitnogo rezonansa. Ch. I: Spektry magnitnogo rezonansa: Ucheb. posobie. [Fundamentals of magnetic resonance. Part I: magnetic resonance Spectra: Study guide]. Novosib. Un.: Novosibirsk, 2009. 108 p.

4. Shesterkin, A. N. Sistema modelirovaniya i issledovaniya radioelektronnykh ustroystv Multisim 10: nauchno-populyarnaya literatura [Electronic devices simulation and study Multisim 10 system: popular-scientific literature]. Moscow: DMK Press, 2012. 360 p.

5. Bagautdinova, L. N., Gaisin F. M. Thermophysics of high temperatures. 2010. Vol. 48, № 1. pp. 135-138.

6. Kashapov, R. N. O vliyaniy koeffitsienta pul'satsii napryazheniya na plazmenno-elektrolitnyy protsess. Sbornik statey II Respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nizkotemperaturnaya plazma v protsessakh naneseniya funktsional'nykh pokrytij» [On the influence of the ratio of the ripple voltage on the plasma-electrolytic process. Collection of articles of the II Republican scientific-technical conference "Low-temperature plasma in the processes of deposition of functional coatings"]. Kazan, 2011. pp. 175-183.



7. Reshetov A. A. Nerazrushayushchiy kontrol' i tekhnicheskaya diagnostika energeticheskikh ob'ektov: Ucheb. posobie. [Non-Destructive testing and technical diagnostics of energy facilities: Study guide] Chuvash University publishing house, 2010. 470 p.

8. Nondestructive Testing Handbook. Second Edition, v. 7. Ultrasonic Testing. American Society for Nondestructive Testing, 1991. P. 313.

9. Gupta P., Daigle E.O., Schilling P.J. Synthesis and characterization of hard metal coating by electro-plasma technology 1594. Surface and coating Technology, 2005. P. 200.

10. A.V. Ugolkov. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1579](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1579).

11. Tarasov S.P., Timoshenko V.I., Voronin V.A., Kirichenko I.A., Pivnev P.P., Soldatov G.V., Voloschenko A.P., Essi-Ezing A.S., Obydennaya V.A., Franchuk D.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (part 1). URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227).