

# ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА НА ЖИДКИЕ СРЕДЫ

В.Л. Ланин

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)*

## Введение

Воздействие мощного ультразвука на жидкие среды вызывает в них ряд широко известных эффектов: акустическую кавитацию [1], связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков; ультразвуковой капиллярный эффект [2]; сонолюминесценцию [3]; вихревые эффекты в виде микро- и макропотоков [4]; ускорение процессов диффузии [5] и др. При интенсивностях ультразвука более  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> кинетическая энергия захлопывающихся пузырьков, сконцентрированная в ничтожно малом объеме, трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. В жидких средах при воздействии УЗ колебаний возникают также электрические явления в виде импульсов малой длительности, которые обусловлены отрицательными электрическими зарядами кавитационных пузырьков [3], а также электрокинетические явления, связанные с направленным движением заряженных частиц.

Электрокинетические явления наблюдаются в дисперсных системах и капиллярах и выражаются либо в возникновении движения одной из фаз по отношению к другой под действием внешнего электрического поля (электроосмос, электрофорез), либо в возникновении разности потенциалов в направлении относительного движения фаз, вызываемого механическими силами (эффект Дорна, потенциал течения).

Электрокинетические явления в жидких средах обусловлены увеличением подвижности носителей заряда и возникновением их направленного массопереноса в направлении от излучателя под действием давления УЗ волны. При захлопывании кавитационных полостей возможно образование дополнительных носителей – отрицательно заряженных кавитационных пузырьков, которые также участвуют в массопереносе.

## Методика эксперимента

Для обнаружения и исследования электрокинетических явлений второго вида в водных растворах УЗ колебания продольного типа возбуждались с помощью погружного излучателя поршневого типа. УЗ колебания частотой 22–44 кГц от генератора подавались на пьезоэлектрический преобразователь, который состоял из двух пьезокерамических колец диаметром 30 мм и двух частотно-понижающих накладок, соединенных резьбовыми шпильками. Контроль амплитуды колебаний осуществлялся с помощью датчика, расположенного вблизи колеблющейся поверхности волновода и соединенного с виброметром. Величина электрического тока, возникающего в жидкости в результате направленного движения ионов под воздействием УЗ поля, регистрировалась микроамперметром типа Ф116/1, подключенным между излучателем и электродом из нержавеющей стали, расположенным на дне емкости с исследуемой жидкостью (рис. 1).

Для проверки гипотезы о полярности ионов, участвующих в образовании тока, вблизи излучателя расположили третий электрод в виде сетки, на который подавали постоянное напряжение 400–500 мВ от внешнего источника.

Схемы исследования совместного воздействия УЗ и электрического полей на жидкие среды при обработке металлических (*a*) и неметаллических материалов (*б*) приведены на рис. 2. Образец *1* погружали в жидкость на расстояние *h* от дна ванны *2* и с помощью провода подключали к одному из полюсов внешнего источника тока *3*. Другой полюс источника соединяли с ванной. При подаче электрических колебаний от УЗ генератора на преобразователь *4* в нем возбуждались механические колебания, которые через излучатель *5* диафрагменного типа передавались в ванну. Под действием постоянного электрического тока в жидкости происходит перемещение ионов водорода в направлении от излучателя к образцу, их восстановление, образование газовых зародышей, что ускоряет процесс кавитации.

При локальном вводе УЗ колебаний в ванну образец *1* размещался в ванне *2* на расстоянии *h* от рабочего торца излучателя. Неметаллическая ванна *2* имеет в основании отверстие, в котором закреплен излучатель типа концентратор с помощью уплотнения *6*. Контактное кольцо *7* подключалось

к одному из полюсов внешнего источника 3, а другой полюс соединялся с излучателем 5. При возбуждении в преобразователе 4 механических колебаний они усиливались концентратором и передавались в жидкую среду. Это повышало интенсивность кавитационных явлений за счет осаждения зародышей кавитации на обрабатываемом образце и локального ввода УЗ колебаний.

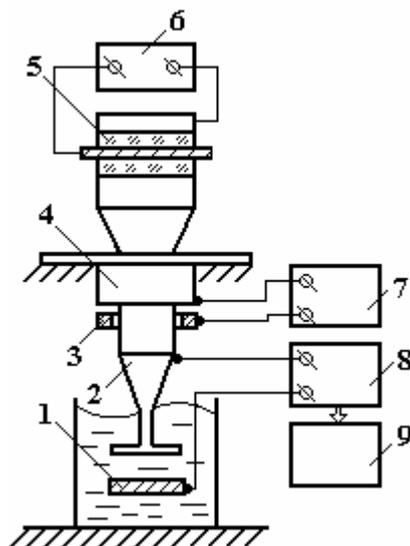


Рис. 1. Схема исследования электрокинетического эффекта в жидкой среде: 1 – электрод, 2 – излучатель, 3 – датчик амплитуды, 4 – волновод, 5 – преобразователь, 6 – УЗ генератор, 7 – виброметр, 8 – измеритель тока, 9 – самописец

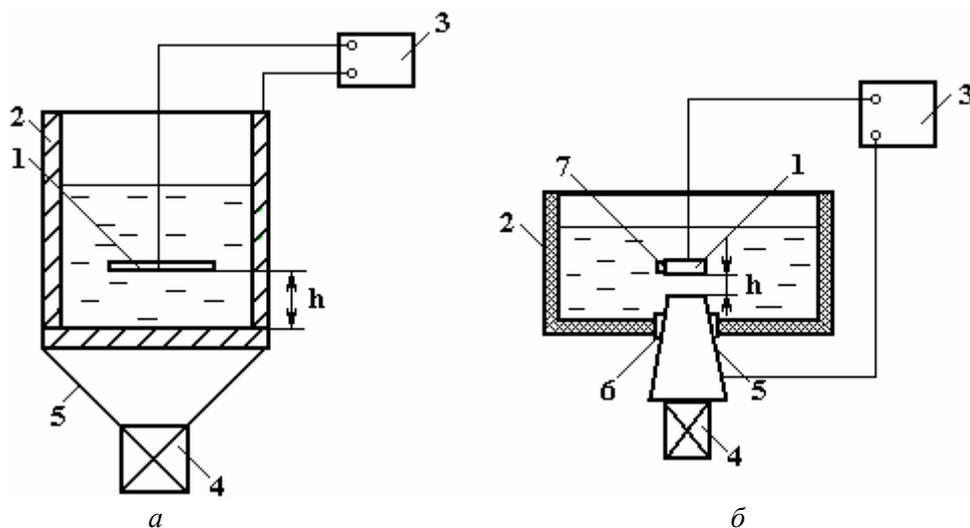


Рис. 2. Схемы исследования совместной активации энергией УЗ и электрических полей

При исследованиях электрокинетических явлений первого рода в результате совместного действия энергии УЗ поля и электрического тока на расплавы и на прочность формируемых соединений металлов величина постоянного тока, пропускаемого через расплав, изменялась в пределах 0–15 А и контролировалась прибором М2020 с точностью 0,5 мА, включенным в электрическую цепь с дополнительным шунтом. УЗ колебания в расплав подавали через 20–30 с после начала пропуска тока для устранения погрешности измерений из-за разогрева проводов и балластного резистора.

#### Результаты эксперимента и их обсуждение

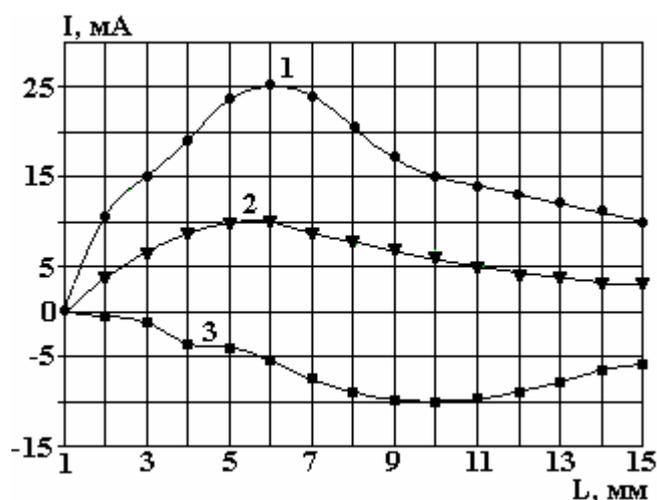
Анализ данных (см. таблицу) показывает, что наибольшее проявление электрокинетического явления второго рода в виде возникновения разности потенциалов и роста величины постоянного тока наблюдается у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью [6]. Время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости. Максимальный эффект увеличения тока отмечен при расстоянии 5 мм между электродами, так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными пузырьками. При меньших расстояниях между электродами

вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях больше 5 мм электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает, так как кавитационная область не захватывает всю зону между электродами.

Наибольший рост потенциала и связанное с этим увеличение постоянного тока наблюдались у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью, время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости (рис. 3).

*Характеристики электрокинетического эффекта в жидких средах*

Жидкая среда	Электросопротивление среды, Ом·м	Вязкость, Па·с	Изменение тока $\Delta I$ , мА	Время достижения равновесия, с
Масло минеральное	$10^{13}$	3,2–3,3	0	–
Глицерин	$10^{12}$	1,5–1,6	0,06	70
Вода дистиллированная	$10^4$	0,32–0,33	0,6	50
Вода водопроводная	$10^2$	0,32–0,33	1,0	10
Спирт этиловый	$10^4$	0,24–0,25	1,4	10
Кислота органическая	10	0,25–0,26	2,0	5
Вода с ионами Cl	0,3	0,32–0,33	3,4	3



*Рис. 3. Зависимости изменения тока в жидкости в УЗ поле от расстояния между электродами: 1 – вода с ионами хлора, 2 – органическая кислота, 3 – дистиллированная вода*

Максимальный рост тока отмечен при расстоянии 5 мм между электродами, так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными пузырьками. При меньших расстояниях между электродами вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях больше 7 мм электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает в связи с поглощением УЗ энергии и ослаблением потока массопереноса.

Появление разности потенциалов и увеличение тока через жидкость можно объяснить тем, что при подаче УЗ колебаний увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, возникает массоперенос в направлении от излучателя, а при захлопывании кавитационных полостей генерируются дополнительные носители – отрицательно заряженные кавитационные пузырьки. Время достижения максимальной величины тока зависит от амплитуды УЗ колебаний и полярности молекул жидкости. При амплитуде УЗ колебаний до 5 мкм образующиеся микропотоки недостаточны для создания необходимой подвижности ионов и процесс роста тока растянут по времени. При амплитуде 7–8 мкм время достижения максимума тока сокращается, а его значение увеличивается, так как максимальное количество ионов участвует в массопереносе. При амплитудах более 10 мкм время достижения экстремума тока минимально, а амплитуда его падает в связи с рассеивающим действием кавитационного облака на направленность потока ионов.

Характер изменения тока во времени в жидкой среде зависел также от потенциала сетчатого электрода между излучателем и основным электродом. При положительном потенциале на сетчатом электроде величина тока возрастала в среднем в 3 раза. При отрицательном потенциале ток менял направление и падал по амплитуде, что объясняется тем, что в переносе зарядов участвуют в основном положительные ионы, находящиеся в жидкой среде.

Исследование УЗ воздействия на слабо ионизированные жидкости (жидкое стекло) показало, что при подаче потенциала на излучатель увеличивается значение тока между электродами на 20%, а максимум тока достигается за время, равное 130 с. После внесения микрочастиц цинка, которые в процессе УЗ активации приобретают положительный заряд, амплитуда тока через жидкость возросла в 1,6 раза. При использовании муравьиного спирта, содержащего отрицательные ионы ОН, начальный уровень тока ниже в 3 раза, амплитуда тока при этом имеет более выраженный экстремум. В металлических расплавах ввиду высокой электропроводности и отсутствия свободных носителей заряда не удалось выявить электрокинетический эффект, однако зарегистрировано изменение тока.

Поскольку в жидкой среде одновременно находятся заряженные частицы различной концентрации и подвижности, то суммарная плотность потока частиц в единицу времени составит:

$$J_{\text{эн}} = \sum_{i=1}^n B_u \cdot C_u \cdot F, \quad (1)$$

где  $B_u$  – подвижность иона,  $C_u$  – концентрация ионов реакционно-активного компонента в расплаве,  $F$  – сила УЗ поля.

Величина тока, обусловленная возникновением электрического поля в жидкой среде,

$$I = \sum_{i=1}^n B_u \cdot C_u \cdot Q_u \cdot F \cdot S, \quad (2)$$

где  $Q_u$  – заряд иона,  $S$  – сечение потока.

Возникновение электрического поля в жидкой среде и активирующее действие УЗ поля оказывают воздействие на процессы массопереноса. К потоку диффузии, обусловленному градиентом концентрации диффундирующего вещества  $J_{\text{д}}$ , добавятся поток частиц, обусловленный действием давления УЗ поля  $J_{\text{уз}}$ , и поток ионов под действием сил электрического поля  $J_{\text{эл}}$ . Тогда полный поток частиц диффузанта будет равен:

$$J = J_{\text{д}} + J_{\text{уз}} + J_{\text{эн}} = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + UC_1 \cos \beta + \left( \sum_{i=1}^n B_u C_u \right) F, \quad (3)$$

где  $C_1$  – концентрация подвижных частиц,  $U$  – скорость движения частиц в УЗ поле,  $\beta$  – угол между векторами силы УЗ поля и диффузионного потока,  $\alpha$  – угол между векторами электрического поля и диффузионного потока.

Сила УЗ поля, воздействующая на поток частиц сечением  $S$ :

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в (3), получим

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \nu \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot S \cdot C_1 \cos \beta. \quad (5)$$

Совместное воздействие УЗ и электрических полей в случае совпадения векторов их действия интенсифицирует процессы диффузии реакционно-активных компонентов в жидкой среде. Однако ввиду невысокой напряженности возникающего в жидкой среде электрического поля токи электропереноса незначительны и не оказывают значительного активирующего воздействия на процессы массопереноса.

Для повышения интенсифицирующих факторов и увеличения интенсивности кавитационных процессов в жидкой среде предложено за счет внешнего электрического поля пропускать электрический ток плотностью 10–100 А/м<sup>2</sup> от УЗ излучателя к детали или контактному элементу на изделии [7]. Под действием постоянного электрического тока в полярной жидкости ускоряется массоперенос ионов, происходит восстановление ионов водорода в виде газовых пузырьков размером 50–100 мкм, которые являются зародышами кавитации. Непрерывное накопление зародышей кавитации в рабочей

зоне и их захлопывание под действием УЗ колебаний увеличивают интенсивность кавитационных процессов, что ускоряет процесс разрушения жировых пленок на поверхности детали и повышает качество очистки за счет более равномерного распределения зародышей кавитации по всей поверхности под действием силовых линий тока.

Для повышения локальности и производительности активации электрическое поле ориентируют таким образом, чтобы ионы водорода устремлялись к излучателю и восстанавливались в виде газовых пузырьков. Вблизи поверхности излучателя ввиду значительных амплитуд колебаний происходит быстрый рост пузырьков до критических размеров и их захлопывание, что сопровождается интенсивными кавитационными явлениями. Величина пропускаемого тока через жидкость зависит от степени ее полярности, размеров обрабатываемой детали. Наибольшее увеличение кавитационного давления в 2–2,5 раза, измеренного с помощью кавитометра, отмечено при оптимальной плотности тока 10–100 А/м<sup>2</sup>.

При совместном действии УЗ и электрических полей на расплавы возникновение процесса электродиффузии обусловлено соотношением действующих на термически возбужденный ион металла сил, навстречу электрическому потоку (действие приложенного внешнего поля) и по направлению электронного потока («электронный ветер»). Вследствие экранирующего влияния электронов влияние электрического поля невелико, поэтому преобладающей является сила «электронного ветра», которая возрастает с увеличением плотности тока. В результате возбужденные ионы имеют большую вероятность перейти в вакансию по движению электронов, чем против движения. Таким образом, вакансии перемещаются к отрицательному полюсу, а ионы металла – к положительному, увеличивая тем самым ширину диффузионной зоны

Направленная диффузия компонентов припоя или компонентов материалов соединения в припое за счет электромиграции частиц диффузионно-подвижных металлов при плотностях тока, больших 1–1,5 А/мм<sup>2</sup>, может приводить к увеличению ширины диффузионной зоны и прочности соединений [8].

При величинах токов до 10 А за счет микропотоков и кавитационных явлений в расплаве нарушался ближний порядок частиц, что увеличивало его сопротивление и соответственно уменьшало ток через расплав на 50–80 мА (рис. 4). При токе свыше 10 А возникал значительный массоперенос носителей заряда и начиналось их упорядоченное перемещение между электродами, что при амплитуде 15 мкм увеличивало ток через расплав до 100 мА. При величине тока более 12 А припой интенсивно разогревался, что приводило к увеличению его сопротивления и, следовательно, к снижению изменения тока через расплав.

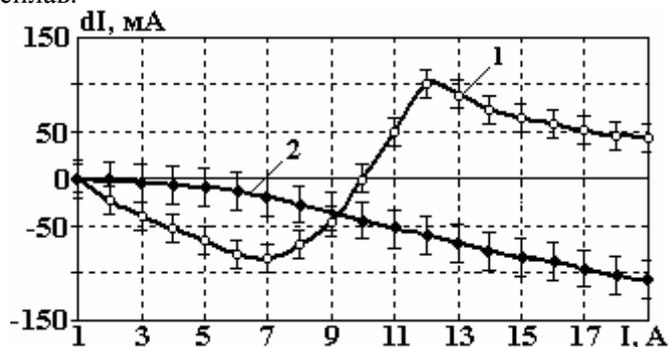


Рис. 4. Зависимости изменения тока в расплаве при УЗ активации от величины тока и амплитуды колебаний, А, мкм: 1 – 5, 2 – 15

Прочность соединений припоем ПОС 61 с алюминиевыми образцами от величины постоянного тока, пропускаемого в направлении от излучателя к детали при частоте 22 кГц, амплитуде 10 мкм, температуре 240°C, времени 10, увеличивается для значений тока, больших 10 А, и снижается при токах свыше 15 А [9].

Вероятной причиной увеличения прочности является электрическая стимуляция процесса диффузии компонентов припоя в материал детали, которая может быть связана с электропереносом в расплавах припоя при высоких плотностях тока [10].

Пропускание тока через зону взаимодействия в направлении от припоя к основанию повышает прочность соединений в 1,5–1,8 раза за счет увеличения ширины диффузионной зоны из-за электромиграции алюминия в припой. Ширина диффузионной зоны, измеренная с помощью растрового электронного микроскопа, в этом случае составляла около 4 мкм для припоев ПОЦ 10 и ПОС 61.

## Выводы

Воздействие интенсивного УЗ поля на полярные жидкие среды вызывает в них появление электрокинетических явлений второго рода вследствие увеличения подвижности носителей заряда и возникновения их направленного массопереноса от излучателя под действием давления УЗ волны. Совместное действие УЗ и электрического полей на жидкие среды вследствие действия электрокинетического эффекта первого рода и направленного движения зародышей кавитации создает условия для интенсификации процессов диффузии, растворения и эмульгирования в зоне обработки. Это позволяет ускорить процессы УЗ очистки поверхностей деталей в полярных жидких средах. Совместное воздействие УЗ и электрических полей на расплавы дает возможность повысить прочность паяных соединений за счет усиления диффузионных процессов на границе расплав–твердое тело.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Leighton T.G. *The Acoustic Bubble*. London: Academic Press, 1994. 611 p.
2. Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В., Коновалов Г.Е. *Ультразвуковой капиллярный эффект*. Минск: Наука и техника, 1981. 135 с.
3. Margulis M.A. *Sonochemistry and Cavitation*. London: Gordon & Breach, 1996. 543 p.
4. Abramov O.V. *High-intensity Ultrasonics: Theory and Industrial*. Amsterdam: OPA, 1998. 692 p.
5. Mason T.J., Lorimer J.P. *Applied Sonochemistry: Uses of Power Ultrasonnd in Chemistry and Processing*. N.Y.: Wiley&Sons, 2002. 314 p.
6. Румак Н.В., Бондарик В.М., Ланин В.Л. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний. *Доклады АН Беларуси*. 1994, **38**(2), 115–118.
7. Ануфриев Л.П., Ланин В.Л. *Способ ультразвуковой очистки*: патент 7318 Беларусь, МКИ 7 В 08 В 3/12. Опубл. 16.05. 2005. Афіцыйны бюлетэнь Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. 2005, **3**(46), 135.
8. Lanin V.L. Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing. *Proc. 3d Conf. on Applications of Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing*. 13–14 December 2001. Paris. 2001, p.143–146.
9. Lanin V.L. Activation of Soldered Connections in Process of Formation Using the Energy of Ultrasonic and Electric Fields. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008, **44**(3), 235–240.
10. Михайлов В.А., Богданова Д.Д. *Электроперенос в жидких металлах. Теория и приложения*. Новосибирск: Наука, 1978. 224 с.

Поступила 14.12.10

## Summary

Electrokinetic phenomena are experimentally investigated under the influence of ultrasound on aqueous solutions and melts of fusible metals. It is established that the joint action of ultrasonic and electric fields on liquid environments intensifies processes of diffusion and dissolution of substances. It allows to accelerate the processes of ultrasonic clearing in polar liquid environments and to raise durability of soldered connections.

---