

УДК 534.8: 539.3

**МАССОПЕРЕНОС В ЖИДКИХ СРЕДАХ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

*канд. техн. наук, доц. В.Л. ЛАНИН*

*(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Исследованы процессы массопереноса в жидких средах полярного типа и расплавах при совместном воздействии ультразвуковых и электрических полей и их влияние на свойства контактных соединений в изделиях электроники.*

**Введение**

Электрические и механические свойства контактных соединений в изделиях электроники во многом зависят от характера физико-химических процессов, протекающих при их формировании. Кинетика процессов смачивания, диффузии, поглощения энергии, физико-химического взаимодействия компонентов расплава и материалов усложняется при совместном воздействии энергии ультразвуковых (УЗ) и электрических полей. Ультразвуковая активация интенсифицирует удаление окисных пленок, ускоряет процессы смачивания и диффузии, увеличивает тепловую энергию системы в результате поглощения энергии и т.д. [1]. Воздействие энергии электрического поля ускоряет подвижность носителей заряда в жидких средах, процессы направленной диффузии реакционно-активных компонентов в соединении, достижение температуры пайки, увеличивает растекание припоя под действием пондеромоторных сил. Массоперенос в жидких средах обусловлен как за счет конвективной диффузии, так и за счет движения частиц в виде макро- и микропотоков под действием сил УЗ поля и направленной электродиффузии компонентов. Сложность протекающих процессов обуславливает необходимость теоретических и экспериментальных исследований явлений в жидких средах при совместном воздействии энергии УЗ и электрических полей.

**Методы исследований**

Массоперенос в жидких средах за счет конвективной диффузии в УЗ поле приобретает вид [1]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D' \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \tag{1}$$

где  $C$  – концентрация вещества,  $U$  – составляющая скорости конвективного движения по оси  $x$ ;  $D'$  – коэффициент диффузии

$$D' = D_0 \cdot e^{\frac{E - \Delta E}{k \cdot T}}, \tag{2}$$

здесь  $\Delta E$  – изменение энергии активации диффузии в ультразвуковом поле.

Направленное движение частиц в УЗ поле под действием силы  $F$  происходит со средней скоростью

$$U = \nu \cdot F, \tag{3}$$

где  $\nu$  – подвижность частиц.

Силовое воздействие ультразвукового поля зависит от частоты  $\omega$ , амплитуды колебаний  $A$ , акустического сопротивления среды  $\rho c$ :

$$F = \rho c \cdot \omega A \cdot S. \tag{4}$$

Суммарный массоперенос частиц в жидкой среде включает составляющую конвекционной диффузии и поток частиц, движущихся под действием силы ультразвуковых колебаний:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + UC \cos \beta, \tag{5}$$

где  $\beta$  – угол между вектором силы ультразвукового поля и градиентом диффузионного потока.

Подставляя выражение (3) и (5) в (4), получим:

$$J = -D' \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \nu \cdot \rho c \cdot \omega A \cdot SC \cos \beta. \tag{6}$$

Массоперенос в жидких средах под воздействием ультразвукового поля связан с проявлением электрокинетического эффекта, который заключается в том, что УЗ активация увеличивает подвижность

носителей заряда в жидкости, возникает их направленный массоперенос в направлении от излучателя под действием давления ультразвуковой волны. Поскольку в жидкой среде одновременно находятся заряженные частицы различной концентрации и подвижности, то суммарная плотность потока частиц в единицу времени составит

$$J_m = \sum_{i=1}^n B_{ii} \cdot C_{ii} \cdot F, \quad (7)$$

где  $B_{ii}$  – подвижность ионов;  $C_{ii}$  – концентрация ионов.

Величина тока в жидкой среде, обусловленная электрокинетическим эффектом

$$I = \sum_{i=1}^n B_{ii} \cdot C_{ii} \cdot Q_{ii} \cdot F \cdot S, \quad (8)$$

где  $Q_{ii}$  – заряд иона.

В процессе кавитации в жидкостях и расплавах возникают электрические импульсы малой длительности, которые обусловлены отрицательными электрическими зарядами кавитационных пузырьков [2]. Сложность исследования динамики захлопывания кавитационных полостей в жидкостях и расплавах обусловлена кратковременностью процесса кавитационных полостей и очень малыми размерами полостей. Для исследования динамики захлопывания кавитационных импульсов в жидкой среде  $I$  возбуждали продольные ультразвуковые колебания частотой 22 кГц и амплитудой 8... 15 мкм с помощью ступенчатого излучателя 3. Пьезоэлектрический преобразователь 4 состоял из двух пьезокерамических колец диаметром 30 мм и двух частотно-понижающих накладок, соединенных резьбовыми шпильками (рис. 1). Для регистрации динамических импульсов кавитации в жидкостях применен миниатюрный пьезодатчик 2 из биморфной пластины толщиной 0,1 мм, сигнал с которого подавался на усилитель с коэффициентом усиления 100 в диапазоне частот от 200 кГц до 10 МГц, а затем на фильтр низких частот. Усиленные и отфильтрованные импульсы регистрировались запоминающим осциллографом С8-19 с частотным диапазоном до 10 МГц.

Датчик располагали на расстоянии 1...5 мм от излучателя. Контроль амплитуды колебаний осуществляли с помощью пьезоэлектрического датчика 5, приклеенного к неизлучающей стороне частотно-понижающей обкладки и соединенного с виброметром.

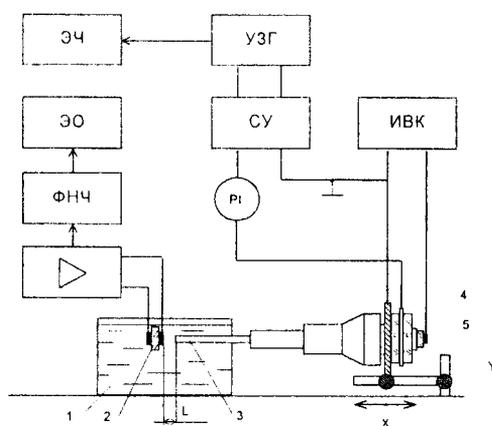


Рис. 1. Схема исследования кавитационных импульсов в жидких средах

Для исследования электрокинетического эффекта ультразвуковые колебания (частотой 22 кГц) возбуждались в жидкостях и расплавах амплитудой 10 мкм с помощью погружного излучателя поршневого типа. Величина постоянного тока, возникающего в жидкости, регистрировалась микроамперметром типа Ф116/1, подключенным между излучателем и электродом из нержавеющей стали и расположенным на дне емкости с исследуемой жидкостью.

Для исследования совместного воздействия энергии УЗ и электрических полей на расплавы и на прочность соединений установка дополнительно включала ванночку с расплавом, размещенную на нагревателе, температура которого стабилизировалась. Величину постоянного тока, пропускаемого через расплав, регулировали в пределах 0...15 А и контролировали прибором М2020, включенным в электрическую цепь с дополнительным шунтом. Ультразвуковые колебания в расплав подавались через 20...30 с после начала пропускания тока для устранения погрешности измерений из-за разогрева проводов и балансного резистора.

Результаты исследований и их обсуждение

Осциллограммы электрических импульсов (рис. 2) свидетельствуют о том, что при увеличении амплитуды ультразвуковых колебаний амплитуда импульсов также растет, а интервалы между ними уменьшаются. Процесс кавитации носит нестабильный характер и во многом зависит от процентного содержания примесей и структурных несовершенств расплавов. Время жизни импульсов не более 20 мкс. При принудительной подаче пузырьков воздуха средним диаметром 50 мкм амплитуда импульсов захлопывания пузырьков меньше в 2...2,5 раза, но время колебательного процесса больше в 2,5 раза, что позволяет сделать процесс кавитации более стабильным, так как зародышеобразование в жидкой среде становится управляемым.

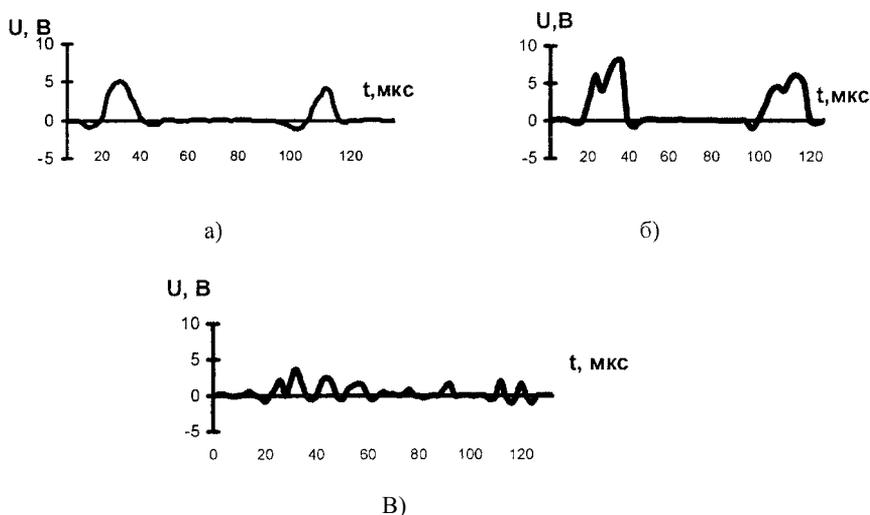


Рис. 2. Осциллограммы кавитационных импульсов при различной амплитуде ультразвуковых колебаний: а - 7,5 мкм; б - 10 мкм; в - 7,5 мкм и газовая активация

Исследование электрокинетического эффекта показало, что наибольшее увеличение величины тока массопереноса носителей заряда наблюдается у жидкостей с наименьшим электрическим сопротивлением и вязкостью (таблица). Время достижения равновесия тока в жидкостях пропорционально ее вязкости. Максимальный эффект увеличения тока отмечен при расстоянии от 5 до 7 мм между электродами, так как при этом вся зона между электродами занята кавитационными пузырьками (рис. 3). При меньших расстояниях между электродами вследствие микропотоков носители заряда частично выталкиваются из зоны. При расстояниях, больших 7 мм, электрокинетический эффект в жидкостях ослабевает, так как кавитационная область не захватывает всю зону между электродами [3]. Увеличение тока через жидкость можно объяснить тем, что при подаче ультразвуковых колебаний увеличивается подвижность носителей заряда в жидкости, возникает направленный массоперенос в направлении от излучателя, а при захлопывании кавитационных полостей генерируются дополнительные носители - отрицательно заряженные кавитационные пузырьки, которые также участвуют в массопереносе. Время достижения максимального тока и его величина зависит от амплитуды ультразвуковых колебаний и подвижности носителей заряда.

При амплитуде УЗ колебаний менее 5 мкм давление ультразвукового поля недостаточно для создания необходимой подвижности ионам, и процесс нарастания тока растянут по времени. При амплитуде 7 мкм время достижения максимального тока сокращается, а его значение увеличивается, так как растет количество ионов с максимальной подвижностью, участвующих в создании тока. При амплитудах УЗ колебаний более 10 мкм время достижения экстремума тока минимально, а амплитуда ионного тока падает. Это связано с большой подвижностью ионов и плохой направленностью потока ионов вследствие усиления кавитационных процессов и нарушения ближнего порядка в жидкой среде.

Изменение тока через жидкие среды при ультразвуковой активации

Исследуемая жидкость	Электросопротивление, Ом	Вязкость, Па·с	Изменение тока, мА	Время достижения равновесия, с
Масло минеральное	$10^{13}$	3,2...3,3	0,01	>100
Глицерин	$10^{12}$	1,5...1,6	0,06	70
Вода дистиллированная	$10^3$	0,32...0,33	0,6	50
Спирт этиловый	$10^4$	0,24...0,25	1,4	10
Кислота органическая	1...10	0,24...0,25	2,0...3,5	5...7
Электролит с ионами Cl	0,3...0,5	0,32...0,33	3,0...4,5	1...3

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. При положительном потенциале на сетчатом электроде величина тока возрастала в среднем в 3 раза, а при отрицательном - ток уменьшался и менял направление. Это объясняется тем, что в переносе зарядов участвовали в основном положительные ионы, находящиеся в жидкой среде.

Исследование воздействия ультразвукового поля на слабополярные жидкости (жидкое стекло) показало, что при подаче потенциала на излучатель значение тока увеличивается на 20 %, а максимум тока достигается за 130 с. После внесения микрочастиц цинка, которые в процессе ультразвуковой активации приобрели положительный заряд, амплитуда тока через жидкость возросла в 1,6 раза. В электролитах, содержащих отрицательные ионы ОН, начальный уровень тока ниже в 3 раза, однако амплитуда тока при этом имеет более выраженный экстремум [4].

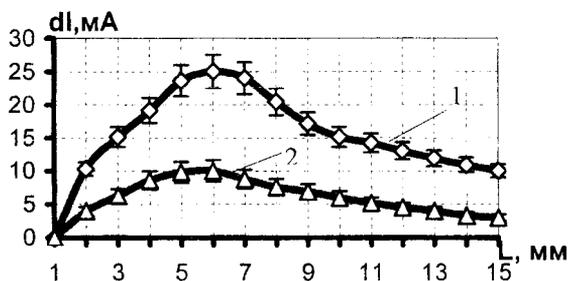


Рис. 3. Зависимости изменения тока в жидкости в ультразвуковом поле от расстояния между электродами:  
1 - вода с ионами хлора; 2 - органическая кислота

Анализ экспериментальных данных показывает, что заметное увеличение массопереноса за счет электрокинетического эффекта происходит при значительных амплитудах ультразвуковой активации в жидких средах полярного типа. Для управления процессами УЗ активации рационально использование электрических полей в жидких средах, создаваемых внешними источниками [5]. Под действием электрического тока в жидкости происходит перемещение ионов водорода, их восстановление 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 увеличивает 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 обрабатываемой поверхности под действием силовых линий тока.

В металлических расплавах ввиду высокой электропроводности и отсутствия свободных носителей заряда не удалось выявить электрокинетический эффект, однако зарегистрировано изменение тока. При величинах токов до 10 А за счет микротоков 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 электрическое поле упорядочивало перемещение носителей заряда между электродами амплитуде 15 мкм и увеличивало ток через расплав до 100 мА. При дальнейшем увеличении тока припой интенсивно разогревался, что приводило к увеличению его сопротивления, и следовательно к снижению изменения тока через расплав.

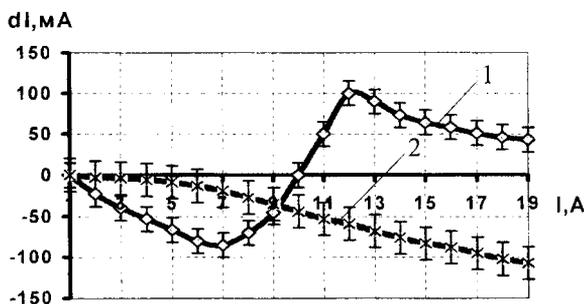


Рис. 4. Зависимости изменения тока в расплаве при ультразвуковой активации от величины тока и амплитуды колебаний:  
1 -  $A = 5$  мкм; 2 -  $A = 15$  мкм

Прочность соединений припоя ПОС 61 с алюминиевыми образцами зависела от величины постоянного тока, пропускаемого в направлении от излучателя к детали, при следующих параметрах: частоте 22 кГц, амплитуде 10 мкм, температуре 240 С°, времени 10 с. Наибольшее увеличение прочности соединений на 35 % отмечено для значений постоянного тока в диапазоне 10... 12 А. Вероятной причиной увеличения прочности является токовая стимуляция процесса диффузии компонентов припоя в материал детали, которая проявляется при плотностях тока, больших 1... 1,5 А/мм<sup>2</sup>. Увеличение тока свыше 15 А снижало прочность соединений вследствие перегрева припоя и роста окисных пленок.

Возникновение процесса электродиффузии обусловлено соотношением действующих на термически возбужденный ион металла сил, направленных навстречу электрическому потоку (действие 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 и, соответственно, прочность соединений.

Ширина диффузионной зоны, измеренная с помощью растрового электронного микроскопа, в этом случае составляла 4...5 мкм для припоев ПОЦ 10 и ПОС 61. Для припоя ПОЦ 10 диффузионная зона была несколько больше из-за наличия в расплаве электроподвижного цинка, который мигрировал к границе алюминий-припой и далее - вглубь алюминиевой детали, увеличивая ширину диффузионной зоны. При пропускании тока в обратном направлении прочность соединений с материалом основания практически не увеличивалась, так как олово и свинец, составляющие припой, не обладают такой подвижностью, как алюминий. Ширина диффузионной зоны при этом составляла около 2 мкм. Пропускание импульсов тока при ультразвуковой активации через зону формирования соединения в направлении от припоя к паяемому материалу повысило прочность в 1,25... 1,5 раза за счет увеличения ширины диффузионной зоны соединяемых материалов и электромиграции алюминия в припой.

### Выводы

Активация жидких сред, преимущественно полярного типа, может быть осуществлена совместным действием энергии ультразвуковых и электрических полей. За счет образования газовых зародышей кавитации в рабочей зоне при пропускании электрического тока через жидкую среду от излучателя ультразвука к детали ускоряются процессы очистки от загрязнений. Совместное воздействие ультразвуковых и электрических полей вызывает усиление процесса диффузии, что связано с массопереносом частиц диффузионно-подвижных металлов в расплавах при плотностях тока, больших 1... 1,5 А/мм<sup>2</sup>. Тем самым увеличивается прочность контактных соединений из химически разнородных материалов в изделиях электроники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. Т. 1 / С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский и др.; Под общ. ред. А.П. Достанко. - Мн.: Бестпринт, 2002. - С. 267 - 285.
2. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. - М.: Химия, 1986. - 288 с.
3. Румак Н.В., Бондарик В.М., Ланин В.Л. Электрические эффекты в жидкостях и расплавах под воздействием ультразвуковых колебаний // Докл. Академии наук Беларуси. - 1994. - Т. 38. - № 2. - С. 115-118.
4. Lanin V.L. Electrical phenomena's in liquids and melts by ultrasound processing // Proc. 3-rd Conf. on Applications o Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. - 13 -14 December 2001. - Paris, 2001.-S. 143 - 146.
5. Lanin V.L. Activation of Ultrasonic Clearing in the Liquid Environments // Proceedings 4th Conf. on Application of Power Ultrasound in Physical and Chemical Processing. 22 - 23 May, Besancon, France. - Besancon, 2003. - P. 210 - 213.