

**МАТЕРИАЛЫ**

УДК 621.3.049.77

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
СОЕДИНЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ**

В.Л. ЛАНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 18 апреля 2004*

Рассмотрено моделирование динамического воздействия концентрированных потоков энергии ультразвукового поля на расплавы с целью управления процессами кавитации, интенсификации процессов массообмена в жидких средах, формирования микроволн припоя, локализации зоны активации в процессах прецизионной пайки изделий электроники на керамических микроплатах.

*Ключевые слова:* моделирование, соединения, расплавы, ультразвук.

**Введение**

Воздействие ультразвуковых (УЗ) полей интенсивностью  $(8-10) \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> на жидкие среды вызывает в них процесс кавитации, сопровождающийся ударными волнами, давления в которых могут достигать  $(1-5) \cdot 10^8$  Па. Такие микроудары разрушают оксидные пленки и загрязнения на обрабатываемой поверхности, которая затем хорошо смачивается жидкой фазой. Появляющиеся в кавитационной области микро- и макропотоки уносят частицы оксидов и загрязнений, перемешивают жидкую фазу, а микроудары способствуют абразивному воздействию частиц твердой фазы, находящихся во взвешенном состоянии [1]. Кавитация в жидкости вызывает такие эффекты, как ускорение химических реакций, эрозию, звуколюминесценцию [2]. Одновременно вблизи излучающей поверхности инструмента появляются вторичные эффекты, такие как микро- и макропотоки, которые способствуют удалению окисных пленок и ускорению процесса смачивания поверхности. Высокие температуры захлопывающихся кавитационных пузырьков (до 1000°С) увеличивают температуру в зоне воздействия УЗ, химическую активность соединяемых материалов и интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия между ними [3].

Обусловленные кавитацией динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, подъем жидкости по капиллярам определяют интенсификацию процесса под действием УЗ поля и способствуют существенному повышению качества паяных соединений, а именно увеличению их прочности, достижению равномерности смачивания и растекания припоя [4]. Однако для рационального выбора параметров процесса УЗ активации необходимы математические модели динамического воздействия энергии УЗ поля на расплавы припоев.

**Модели динамического воздействия ультразвуковой энергии на расплавы**

Динамика кавитационной полости в жидкости описывается уравнениями Нолтинга–Непайраса, Херринга–Флинна, Кирквуда–Бете, которые являются нелинейными дифференци-

альными уравнениями и решаются методами численного интегрирования. Особенностью расплавов припоев, используемых для УЗ пайки и металлизации, являются значительно большие плотность и вязкость по сравнению с водой (примерно на порядок), необходимость учета гидростатического давления столба расплава припоя, а также различие в начальных размерах кавитационных полостей. Гидростатическое давление  $P_0$  с учетом давления столба расплавленного припоя высотой  $h$  в ванне составляет:

$$P_0 = P_{\text{атм}} + h\rho g. \quad (1)$$

Динамика кавитационных полостей в расплавах припоев описывается уравнением [1]

$$P_{\ddot{a}} + P_p + P_{\dot{a}i} - P_i(R) = 0, \quad (2)$$

где  $P_{\ddot{a}} = \frac{3}{2}\rho\left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2$  — динамическое давление потока,  $P_p = \rho R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}$  — равнодействующее давление,  $P_{\dot{a}i} = P_0 + P_A \sin \omega t$  — внешнее давление,  $P_i(R) = \left(P_0 - P_i + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + P_i - \frac{2\sigma}{R}$  — давление парогазовой смеси в кавитационной полости.

С учетом вязкости расплава уравнение (2) можно записать в виде

$$\rho \left( R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + 4\eta \frac{\partial R}{\partial t} \right) + P_0 - P_A \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - P_i - \left( P_0 - P_i + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 = 0. \quad (3)$$

Физический смысл данного уравнения состоит в том, что сумма действующих на любой элементарный объем расплава давлений равна нулю, т.е. кавитационная полость находится в состоянии динамического равновесия в каждый рассматриваемый промежуток времени.

При возбуждении продольных колебаний на границах раздела сред УЗ волна частично отражается, интерферируя с падающей волной, частично проникает во вторую среду. Давления для падающей, проходящей и отраженной волн вдоль оси равны:

$$P_1 = \rho_1 c_1 v_1, \quad P_2 = \rho_2 c_2 v_2, \quad P_3 = -\rho_1 c_1 v_3, \quad (4)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — плотности сред,  $c_1, c_2$  — скорости распространения ультразвука в средах,  $v_1, v_2, v_3$  — скорости падающей, проходящей и отраженной волн соответственно.

Учитывая, что коэффициенты отражения  $K_{\text{отр}}$  и прохождения  $K_{\text{пр}}$  по давлению равны :

$$K_{\text{ид}} = \frac{P_3}{P_1}; \quad K_{\text{пр}} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (5)$$

а  $Z_1 = \rho_1 c_1$ ;  $Z_2 = \rho_2 c_2$ , то при  $x=0$  справедливо выражение:

$$P_1 + P_3 = P_2, \quad \frac{(P_1 - P_3)}{Z_1} = \frac{P_2}{Z_2}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получим

$$K_{\text{ид}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad K_{\text{пр}} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (7)$$

Анализ выражения (7) показал, что коэффициенты прохождения и отражения существенно зависят от акустических свойств сред. При  $Z_1=Z_2$  коэффициент отражения равен нулю и граница раздела акустически прозрачна. Поскольку  $Z_1 \gg Z_2$ , т.е. удельные волновые сопротивления излучателей ультразвука выше удельных волновых сопротивлений жидких сред, то через границу излучатель–припой в случае колебаний нормально к поверхности,

только 20–25 % энергии УЗ поля проникает в жидкую фазу, а при параллельных — 54 % энергии ( $K_{пр}=0,54$ ), которая активизирует процессы кавитации, микро- и макропотоки.

Интенсивность продольных колебаний нелинейно убывает при увеличении расстояния от излучателя, что заставляет поддерживать величину зазора в пределах 0,2–2,0 мм. Это также исключает появление макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов за счет ударного воздействия на них УЗ волны, направленной нормально к поверхности. Снижения динамического воздействия на паяемый материал достигают путем изменения угла введения колебаний в припой с  $90^\circ$  до  $30\text{--}40^\circ$ .

В процессах УЗ активации жидких сред важно сформировать микро- и макропотоки таким образом, чтобы они обеспечивали массоперенос микрообъемов адгезионно-активных компонентов к поверхности и ускоряли тем самым протекание реакций химического взаимодействия соединяемых материалов. Использование колебаний, параллельных обрабатываемой поверхности, предпочтительно не только с энергетической точки зрения, но с точки зрения формирования направленных микропотоков.

Увеличение угла наклона боковой излучающей поверхности к оси излучателя  $\alpha$  от  $20$  до  $45^\circ$  должно вызывать появление в жидкости и расплаве сформированного макропотока в направлении от излучающей поверхности к обрабатываемой детали, а зона его действия определяется амплитудой колебаний. В данном случае падающая УЗ волна частично отражается от границы раздела излучающая поверхность–жидкая среда, частично передается в последнюю в направлении вектора амплитуды колебаний  $A_2$ . В результате равнодействующая векторов  $A_1$  и  $A_2\text{--}A_3$  формирует макропоток в жидкости в направлении к обрабатываемой поверхности (рис. 1).

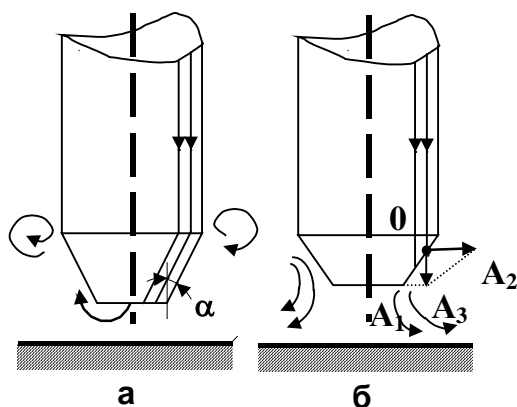


Рис. 1. Формирование микропотоков в жидких средах

При распространении УЗ колебаний на границе припой–воздух однонаправленное УЗ давление от излучателя создает вспучивание поверхности жидкой фазы в виде микроволны. Высоту микроволны  $h$  (рис. 2), образованную воздействием энергии УЗ поля, определили из условия равенства энергий: колебаний  $E_k$ , потенциальной  $E_n$  микроволны, поверхностного натяжения жидкости  $E_n$  на поверхности раздела

$$E_k = E_i + E_i . \quad (8)$$

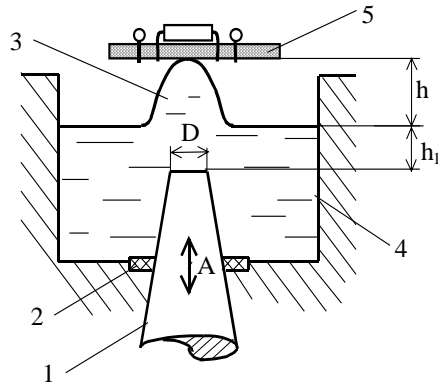


Рис. 2. Образование микроволны припоя: 1 — излучатель, 2 — акустическая развязка, 3 — микроволна, 4 — ванна, 5 — электронная сборка

Потенциальная энергия  $E_n$  складывается из энергий массы столба припоя над излучателем и массы микроволны

$$E_i = \pi D^2 \rho g \frac{h_1}{4} + \pi h \rho g \frac{h}{6} = \pi \rho g \left( \frac{D^2 h_1}{4} + \frac{h^2}{6} \right), \quad (9)$$

где  $m$  — масса,  $h_1$  — уровень припоя,  $D$  — диаметр излучателя.

Поверхностное натяжение действует по границе поверхности микроволны

$$E_i = \sigma S = \sigma \pi D^2 / 4. \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в уравнение (8), получим

$$2\pi^2 \rho f^2 A^2 S = \pi \rho g \left( \frac{D^2 h_1}{4} + \frac{h^2}{6} \right) + \sigma \pi \frac{D^2}{4} \quad (11)$$

Преобразуя (11) получим:

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} D \sqrt{\frac{2\pi^2 f^2 A^2}{g} - \frac{\sigma}{g\rho} - h_1}. \quad (12)$$

Вычисленная высота микроволны должна превышать в 1,1–1,2 раза расстояние между поверхностью расплава и паяемой микроплатой для формирования стабильной зоны контактирования с расплавом.

### Результаты моделирования

Решение нелинейного дифференциального уравнения (3) выполнено методом Рунге–Кутты–Мерсона с автоматическим изменением шага интегрирования и приближенной оценкой погрешности на каждом шаге на ПЭВМ для расплава оловянно-цинкового припоя вязкостью 0,85 Па·с. Варьировались начальные размеры кавитационных полостей от 4 до 14 мкм, давление ультразвука от  $0,5 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^5$  Па и частота УЗ колебаний 22, 44, 66 кГц. Анализ расчетных данных показывает, что кавитационные полости размером до 5 мкм незначительно изменяют свои размеры и пульсируют не захлопываясь. С увеличением начального размера до 10–50 мкм увеличивается амплитуда их пульсаций и происходит ее захлопывание в течение порядка 0,05–0,10 с (рис. 3,а).

При давлениях УЗ менее 0,1 МПа кавитационные полости пульсируют. С увеличением давления ультразвуковых колебаний до 0,15 МПа увеличивается резонансный размер полостей и происходит их захлопывание (рис. 3,б). С ростом частоты с 22 кГц до 66 кГц размеры кавита-

ционных полостей уменьшаются в среднем в 2 раза, что приводит к уменьшению интенсивности кавитации и к снижению локального кавитационного давления в припое (рис. 3,б).

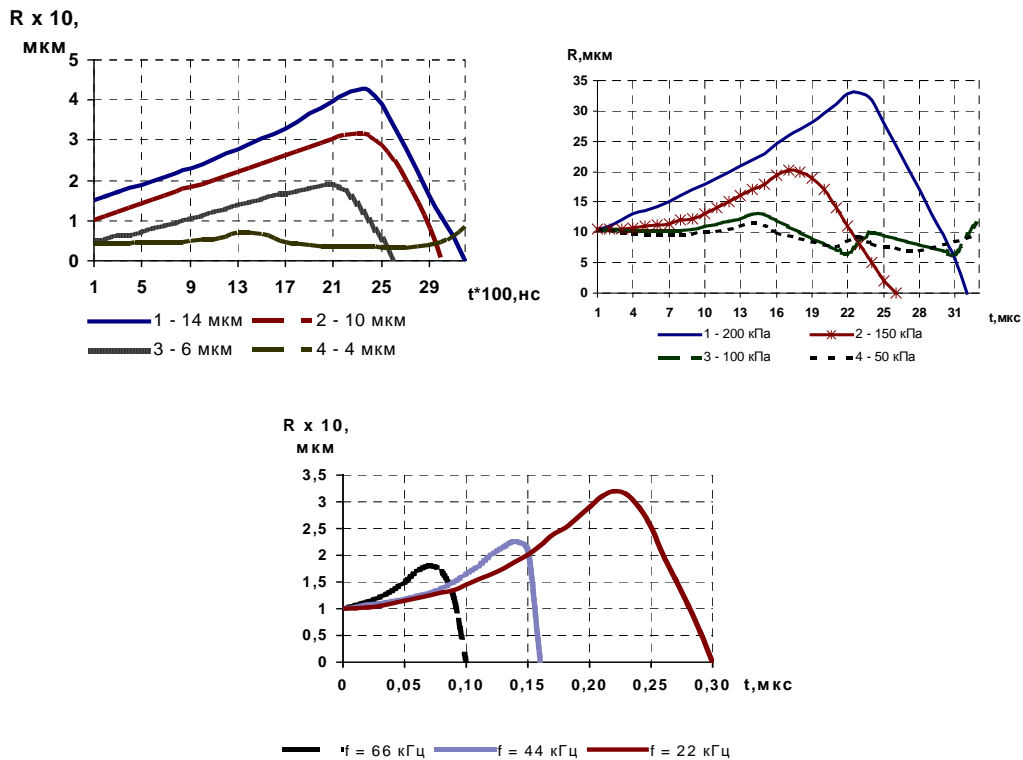


Рис. 3. Динамика кавитационных полостей в припое при соответствующих начальных радиусах полостей (а), давлениях ультразвука (б) и частотах (в)

Для припоя ПОС 61 исследование экспериментальной зависимости высоты подъема от частоты и амплитуды колебаний (рис. 4) показало, что рассчитанная высота несколько больше экспериментально определенной, так как в модели учитывается лишь поверхностное натяжение припоя, а не окисной пленки на его поверхности, которая практически постоянно там присутствует. Для оптимального воздействия УЗ колебаний на обрабатываемую поверхность необходимо выбирать амплитуду УЗ колебаний в диапазоне 10–14 мкм при частоте 22 кГц и 7–11 мкм — при частоте 44 кГц. При меньшей амплитуде колебаний высота подъема припоя недостаточна для качественного воздействия на обрабатываемую поверхность, а при увеличении амплитуды выше 15 мкм происходит распыление припоя.

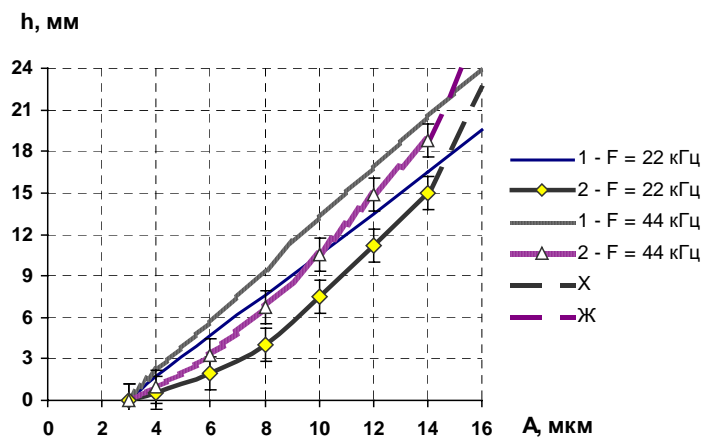


Рис. 4. Зависимости высоты подъема припоя от амплитуды УЗ колебаний: 1 — теоретические, 2 — экспериментальные

## Заклучение

Установлено, что динамическое воздействие энергии УЗ поля в диапазоне частот 22–66 кГц проявляется при начальном размере полостей 10–50 мкм и давлении УЗ волны 0,1–0,2 МПа путем образования кавитационной области и сформированного макропотока в жидкой среде, а также подъеме жидкости на границе раздела в виде микроволны. Применение продольных колебаний для процессов УЗ активации предпочтительнее с точки зрения повышения производительности и уменьшения воздействия на обрабатываемые изделия.

Модели динамического воздействия концентрированных потоков УЗ энергии на расплавы позволят управлять процессами кавитации, интенсифицировать процессы массообмена в жидких средах, формировать микроволны припоя, локализовать зоны УЗ активации. Создание микроволны припоя позволит реализовать процессы прецизионной пайки изделий электроники на керамических микроплатах. Это позволит улучшить качество контактных соединений с труднопаяемыми материалами, а также создать более надежное и эффективное технологическое оборудование для формирования паяных соединений в изделиях электроники.

## MODELLING PROCESSES OF FORMATION MATERIALS CONNECTIONS IN ULTRASONIC FIELDS

V.L. LANIN

### Abstract

Dynamic influence of energy US fields in a range of frequencies 22–66 kHz at the initial size of cavities 10–50 microns and pressure US waves 0,1–0,2 MPa formation cavitations areas and generated macro stream in the liquid environment, and also rise of a liquid on border of the unit as a microwave. Models of dynamic influence of the concentrated streams US energy on solders, will allow to operate cavitations processes to intensify mass exchange processes in liquid environments, to form microwaves of solder, to locate zones US activation. Creation of a microwave of solder will allow realizing processes of the precision soldering of products of electronics on ceramic micro plats. It will allow to improve quality of contact connections with difficult soldering materials and also to create more reliable and effective process equipment for formation soldering connections in products of electronics.

### 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., 2002. С. 267–285.
2. *Абрамов О.В.* Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М., 2000.
3. *Lanin V.L.* // Ultrasonics Sonochemistry. 2001. № 8. P. 379–385.
4. *Lanin V.L.* // Proc. Conf. Ultrasonics International 2003. 30 June – 3 July 2003. Granada, Spain, 2003. P. 120–122.