

В. М. БОНДАРИК, к. т. н. В. Л. ЛАНИН

Дата поступления в редакцию  
12.05 1998 г.

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский гос. ун-т информатики  
и радиоэлектроники

Оппонент к. т. н. Г. Е. КОНОВАЛОВ

## ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАЙКОЙ

*Исследуется прочность паяных соединений, полученных при воздействии колебаний различного направления распространения, а также электрического тока.*

*The strength of solder joint, that has been produced by action of vibrations of differently directional propagation and also of electrical current.*

Ультразвуковая (УЗ) пайка — одно из перспективных направлений в технологии монтажа электронных устройств, поскольку механические упругие колебания частотой 18–70 кГц и интенсивностью 0,1–1 МВт/м<sup>2</sup> резко интенсифицируют большинство физико-химических процессов при пайке — смачивание, растекание, капиллярное течение припоя, диффузию припоя в паяемые материалы [1]. Использование УЗ-колебаний в установках пайки волной припоя способствует повышению качества пайки элементов на платы, устранению флюсов из технологического процесса, оптимальному потреблению припоя, уменьшению загрязнения поверхности паяемого изделия [2].

Для УЗ-активации возможно использование различных видов механических колебаний (вводимых с помощью излучателей в жидкую фазу и являющихся по своей природе упругими волнами): продольных, сдвиговых, крутильных, комбинированных. Поскольку жидкости и газы не обладают упругостью формы, в них возможно распространение лишь продольных волн, однако в оловянно-свинцовом припое, который является вязкой жидкостью, возможно также образование вязких сдвиговых волн, которые затухают на малом расстоянии от источника [3, с. 141–147].

Целью настоящей работы являются анализ возможности применения различных видов колебаний для УЗ-пайки и исследование прочности паяных соединений, полученных при воздействии продольных колебаний различного направления распространения и электрического тока.

При возбуждении излучателем сдвиговых волн конечной амплитуды в тонком слое металлического расплава (толщина  $h/\lambda \sim 10^3$ ,  $\lambda$  — длина ультразвуковой волны) в расплаве возникают вязкие вол-

ны, волновой вектор которых направлен перпендикулярно боковой поверхности УЗ-инструмента [4, с. 97–101]. Важнейшим свойством такой волны является ее быстрое поглощение в направлении от колеблющейся поверхности, при этом глубина ее проникновения составляет

(1)

где  $\eta$  — коэффициент вязкости;  
 $\nu$  — циклическая частота.

Как показывает зависимость **рис. 1**, для припоя ПОС 61 при температуре расплава 260°C при частоте 22 кГц глубина проникновения сдвиговой волны составляет 170 мкм, т. е. сдвиговые волны из-за быстрого их затухания практически не оказывают влияния на процесс металлизации материалов.

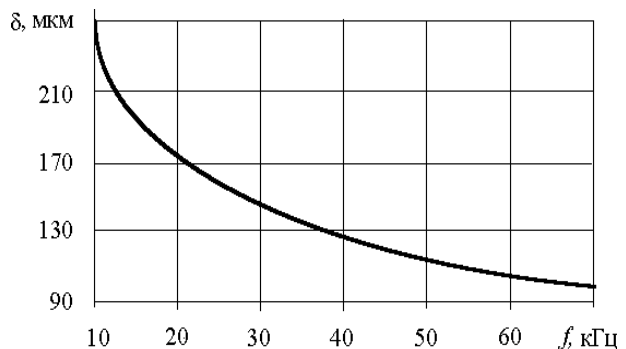


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения волны при сдвиговых колебаниях от частоты УЗ-колебаний

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

$$P_1 = \rho_1 c_1 v_1; P_2 = \rho_2 c_2 v_2; P_3 = -\rho_1 c_1 v_3, \quad (2)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — плотность сред;  
 $c_1, c_2$  — скорость распространения ультразвука в средах;

$v_1, v_2, v_3$  — скорость падающей, проходящей и отраженной волн, соответственно.

Учитывая, что коэффициенты отражения ( $K_{\text{отр}}$ ) и прохождения ( $K_{\text{пр}}$ ) по давлению определяются как [3, с. 141–147]

$$K_{\text{отр}} = \frac{P_3}{P_1}; \quad K_{\text{пр}} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3)$$

и с учетом того, что  $Z_1 = \rho_1 c_1$ ,  $Z_2 = \rho_2 c_2$  — удельные волновые сопротивления и что в плоскости  $x=0$  справедливо выражение

$$P_1 + P_3 = P_2; \quad (P_1 - P_3) Z_1 = \frac{P_2}{Z_2}, \quad (4)$$

получим:

$$K_{\text{отр}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad K_{\text{пр}} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что коэффициенты прохождения и отражения существенно зависят от акустических свойств сред. Если  $Z_1 = Z_2$ , то коэффициент отражения равен нулю, а коэффициент прохождения — единице, и граница раздела является акустически прозрачной. Поскольку в данном случае удельные волновые сопротивления излучателей ультразвука значительно превышают удельные волновые сопротивления расплавов, то через границу раздела «волновод — расплав» проникает всего 50–54% энергии.

Часть УЗ-энергии, прошедшей в расплав, расходуется на генерацию УЗ-эффектов — кавитацию, микропотоки и другие. Поскольку в данном случае волновые сопротивления припоя и труднопаяемого металла (алюминия) близки, т. е. коэффициент прохождения УЗ-энергии через эту границу составляет около 0,9, большая часть энергии передается в образец и расходуется на его нагрев и разрушение. При использовании продольных колебаний, распространяемых параллельно обрабатываемой поверхности, УЗ-колебания в большей степени распространяются в припой вдоль паяемой поверхности, и их энергия расходуется на кавитационные явления вблизи зоны взаимодействия, повышая эффективность процесса. Кроме того, в последнем случае улучшается также процесс смачивания материала припоем за счет эффекта натирания.

Для наблюдения микропотоков жидкости при воздействии УЗ-колебаний различного направления применялась смесь воды и глицерина в пропорции 3:1, налитая в кварцевую кювету, в которую вводился излучатель. Контроль размеров и направления распространения микропотоков жидкости осуществлялся с помощью оптического микроскопа МБС-2. При возбуждении в жидкости продольных колебаний с амплитудой  $A_1$ , распространяемых вдоль излучателя, наблюдался микропоток жидкости высотой  $h_1 = 3–5$  мм, направленный перпендикулярно дну кюветы (рис. 2). При использовании продольных колебаний с амплитудой  $A_2$ , распространяемых параллельно обрабатываемой поверхности, микропотоки жидкости направлены в стороны от излучате-

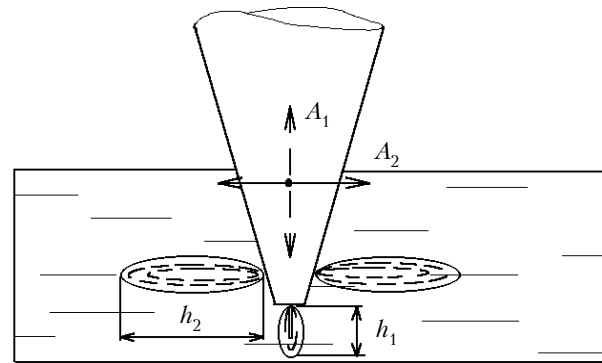


Рис. 2. Влияние типа УЗ-колебаний на глубину и направление микропотоков

ля на расстояние  $h_2 = 6–8$  мм, причем вблизи стенки кюветы наблюдался подъем раствора более чем на 20 мм.

Было установлено, что при получении в расплаве припоя колебаний, распространяющихся параллельно обрабатываемой поверхности, при расстояниях между торцом излучателя и поверхностью 0,1–0,2 мм кавитационное давление в припое возрастает в среднем на 25%, увеличивая прочность сцепления припоя с ней не менее чем в 1,5 раза [5]. Такие колебания применяют для облуживания выводов ИМС одновременно с погружением в ванну припоя [6].

Исследовалась прочность паяных соединений, полученных при воздействии продольных колебаний различного направления распространения и электрического тока, пропускаемого через зону обработки.

Экспериментальная установка (рис. 3) включала генератор ультразвуковых колебаний (УЗГ), акустическую систему, нагревательное устройство (Н), электронный частотомер (ЭЧ) и вольтметр (ЭВ) для контроля частоты и амплитуды на выходе генератора, измеритель вибраций (ИВК).

Источником продольных колебаний, распространяемых вдоль волновода, служила акустическая система, состоящая из магнитострикционного преобразователя 2, присоединенного соосно к волноводу 1 параллельно его оси, и излучателя 4 с коэффициентом усиления 5. Для генерации колебаний, распространяемых параллельно обрабатываемой поверхности 5, акустическая система включала два магнитострикционных преобразователя 3, присоединенных к волноводу перпендикулярно на расстоянии  $\lambda/2$ .

Для непрерывного контроля вибраций и настройки инструмента на резонанс к акустической системе был присоединен датчик амплитуды 6 в виде пьезоэлектрической пластины, одна поверхность которой являлась статичной, в то время как на ее вторую поверхность воздействовали УЗ-колебания. Сигнал с датчика поступал на вход измерителя вибраций ИВК-ЗМ.

Нагревательное устройство включало резистивный нагревательный элемент, на котором размещались исследуемые образцы, блок питания БП и блок контроля температуры БКТ. Контроль и стабилизация температуры



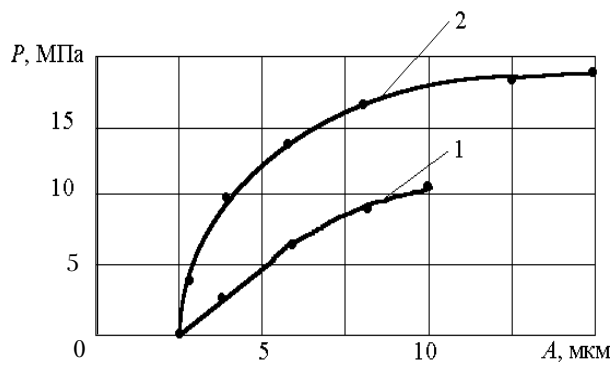


Рис. 5. Зависимость прочности сцепления припоя от амплитуды УЗ-колебаний:  
1 — продольные колебания; 2 — колебания, распространяемые параллельно обрабатываемой поверхности

припоя с алюминиевым образцом в случае параллельных колебаний выше на 10–20 МПа, чем при продольных колебаниях. Максимальная прочность сцепления наблюдалась при длительности воздействия сдвиговых ультразвуковых колебаний 15–20 с и составляла 24 МПа для сдвиговых колебаний. При меньшем времени воздействия не успевают до конца произойти процессы разрушения окисных пленок и смачивания поверхности материала. При времени воздействия больше 22 с происходит уменьшение прочности сцепления припоя с материалом за счет эрозии паяемого металла и окисления самого припоя.

Максимальная прочность сцепления припоя с алюминиевой поверхностью наблюдалась при амплитуде параллельных УЗ-колебаний 10–12 мкм и составляла 24 МПа при времени обработки 15±1 с (рис. 5). При меньших амплитудах колебаний развитие кавитационных процессов не переходит порога смачивания, характерного для расплавов припоев; разрушение окисных пленок происходит не полностью. Амплитуда УЗ-колебаний 3±0,5 мкм является пороговой для кавитационных процессов в расплаве оловянно-свинцового припоя. При более низкой амплитуде в расплаве не наблюдается кавитации и, соответственно, практически отсутствуют адгезия припоя к поверхности образца и химичес-

кое взаимодействие между компонентами припоя и материалом облуживаемой поверхности. При амплитуде УЗ-колебаний больше 15 мкм происходит уменьшение прочности сцепления припоя с материалом образца. Видимо, в этом случае возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков динамические импульсы вызывают деградацию приповерхностных слоев, расплав припоя «пылит» и интенсивно окисляется.

Для исследования влияния электропереноса на прочность сцепления припоя с основанием исследуемые образцы из алюминия подключались попеременно к различным полюсам источника тока. Исследования зон взаимодействия припоя и алюминия и локальный рентгеноспектральный анализ элементного состава производились на растровом электронном микроскопе Stereoscan-360 (Cambridge Instruments, Англия) с энергетическим спектрометром AN-10000 (Link, Англия).

Пропускание тока через зону взаимодействия при лужении в направлении из припоя в материал основания повышает прочность его сцепления с основанием в 1,5–1,8 раза за счет роста диффузионного взаимодействия соединяемых материалов из-за электромиграции алюминия в припой. Ширина диффузионной зоны в этом случае составляла около 8 мкм (рис. 6, а, б). При пропускании тока через зону металлизации в обратном направлении прочность сцепления покрытия с материалом основания практически не увеличивается, т. к. олово и свинец, составляющие припой, не обладают такой электроподвижностью, как атомы алюминия. Ширина диффузионной зоны при этом была такой же, как и в случае стимуляции процесса металлизации без токовой активации (рис. 6, в, г) и составляла менее 2 мкм.

При УЗ-пайке пропускаемый через припой ток способствует более прочному сцеплению припоя с деталью из-за дополнительной токовой стимуляции процесса диффузии (в данном случае — диффузии материала основания в припой), т. к. алюминий в исследуемой системе является наиболее подвижным элементом.

Увеличение прочности сцепления слоя припоя с материалом основания при УЗ-металлизации с токо-

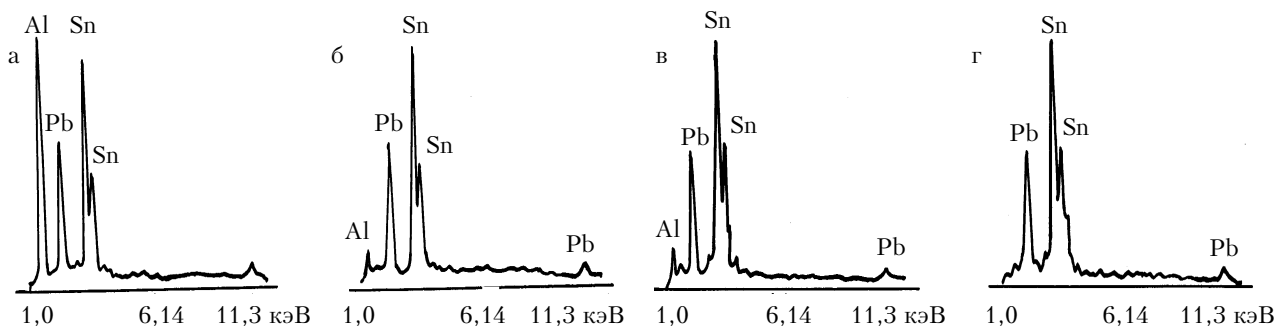


Рис. 6. Результаты локального рентгеноспектрального анализа образцов:

а — «минус» на образце, расстояние до поверхности детали 2 мкм, б — «минус» на образце, расстояние до поверхности 8 мкм, в — «плюс» на образце, расстояние 2 мкм, г — без токовой активации, расстояние 2 мкм

вой активацией можно объяснить механизм электродиффузии. На термически возбужденный ион алюминия действует сила, направленная навстречу электрическому потоку (действие приложенного внешнего поля), и сила, действующая 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. То есть, ионы алюминия перемещаются к положительному полюсу, увеличивая толщину диффузионного слоя, а вакансии — к отрицательному.

Таким образом, установлено, что применение колебаний, распространяемых параллельно обрабатываемой поверхности, для процессов УЗ-лужения и пайки, особенно при локальном введении энергии в зону взаимодействия, предпочтительнее с точки зрения повышения производительности, обеспече-

ния высокой стабильности процессов и уменьшения механического воздействия на обрабатываемые изделия.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

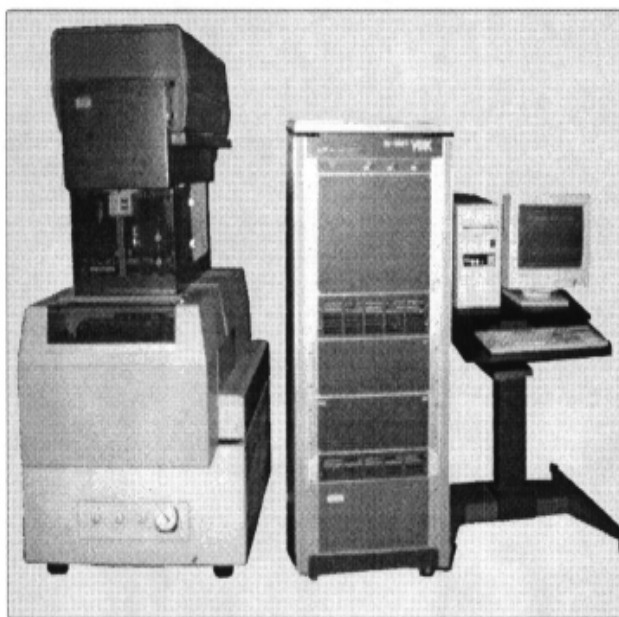
1. Ланин В. Л., Хмыль А. А. Современные процессы пайки в производстве радиоэлектронной аппаратуры. — Мн. : БелНИИНТИ, 1988.
2. Rainer K. Das so-no-clean-verfahren: ultraschalloten — ein alter hut // Productronic. — 1994. — Bd 14, N 11. — S. 10 — 12, 14.
3. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. — Л. : Изд-во Ленингр. ун-та. 1980.
4. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / Абрамов О. В., Добаткин В. И., Казанцев В. Ф. и др. — М. : Наука, 1986.
5. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами // Известия АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. — 1983. — № 4. — С. 69—73.
6. Пат. Великобритании 2265101, МКИ 5 В23К 1/08. Soldering apparatus and method/ Опубл. 22.09.93.



## ЛАЗЕРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМ-5009В

НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЦЕНТРЫ СНГ

Установка предназначена для изготовления металлизированных промежуточных фотооригиналов при производстве БИС, СБИС, фотоэлектронных преобразователей, ЖК-индикаторов, фотошаблонов ГИС, специальных измерительных и тестовых шаблонов. Является автоматической установкой, работающей по принципу микрофотонабора рисунка топологии по информации, поступающей от системы проектирования на гибком магнитном диске.



Производительность (на регулярных структурах)	до 1,5 млн. экспоз./ч
Размеры рабочего поля	150×150 мм
Погрешность позиционирования координатного стола	±0,35 мкм
Дискретность задания перемещений координатного стола	0,25 мкм
Размеры наборного элемента	2—300 мкм
Дискретность изменения размеров наборного элемента	0,5 мкм
Угол поворота наборного элемента	0—90°
Масштаб проекционного уменьшения	1:20
Типоразмеры шаблонов	3×3" (76×76 мм) 4×4" (102×102 мм) 5×5" (127×127 мм) 6×6" (153×153 мм) 7×7" (178×178 мм)