

В. В. Клубович
М. Д. Тявловский
В. Л. Лонин

УЛЬТРА-
ЗВУКОВАЯ
ПАЙКА
В РАДИО-
И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Н
Т
П

В.В. Клубович
М.Д. Тявловский
В.Л. Ланин

**УЛЬТРА-
ЗВУКОВАЯ
ПАЙКА**

В РАДИО-
И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

МИНСК
«НАУКА И ТЕХНИКА»
1985

Клубович В. В., Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении.— Мн.: Наука и техника, 1985.—263 с.

В книге обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований в области ультразвуковой пайки, применяемой в производстве радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Описаны физико-химические процессы, возникающие при воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы припоев. Дан анализ современных способов, технологического оснащения и материалов, обеспечивающих высокое качество спаев в ультразвуковом поле. Рассмотрено формирование качественных паяных соединений с металлическими и неметаллическими материалами. Анализируются вопросы влияния ультразвука на физико-механические свойства конструктивных элементов радиоаппаратуры и приборов, перспективы развития и промышленного освоения ультразвуковой пайки в связи с микроминиатюризацией РЭА и приборов.

Рассчитана на научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области технологии радио- и приборостроения, может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам.

Табл. 40. Ил. 105. Библиогр.—228 назв.

Рецензенты:

А. В. Степаненко, чл.-корр. АН БССР,
Ю. Н. Хлопов, д-р техн. Наук



Владимир Владимирович Клубович – академик Национальной Академии Беларуси, доктор технических наук, профессор, крупный специалист в области ультразвуковой обработки металлов и сплавов. Им создана научная школа, известная по теоретическим и экспериментальным исследованиям влияния ультразвука на физико-механические свойства твердых тел в зависимости от интенсивности ультразвуковых колебаний и величины статической нагрузки. В.В. Клубович существенно расширил сферу практических применений ультразвука, предложил ряд новых эффективных процессов получения и обработки материалов под действием ультразвука, сварки пластмассовых изделий, упрочнения и очистки поверхностей различных типов изделий. Под его руководством впервые осуществлены процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с наложением ультразвуковых колебаний. В.В. Клубович является автором около 500 научных работ, 14 монографий, одна из которых издана в США, имеет более 150 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Под его руководством подготовлено 5 докторов и 30 кандидатов наук. Получил Государственную премию БССР 1984 г. за цикл работ "Разработка научных основ использования мощного ультразвука в технологических процессах обработки материалов".



Михаил Доминикович Тявловский - доктор технических наук, профессор - автор 457 опубликованных научных работ, 9 монографий и 119 изобретений в области ультразвуковых технологий. Отдельные разработки запатентованы в США, Англии, Франции, ФРГ, Японии. Ряд его изобретений Государственные патентные органы признали целесообразным патентовать в Канаде, Италии, Швейцарии, Швеции, КНР, Венгрии, Чехии, Словакии. Его разработки внедрены в производство на ряде предприятий Республики Беларусь и стран СНГ. За свою научную деятельность удостоен почетного звания "Заслуженный деятель науки Республики Беларусь" и избран в состав ряда Международных академий.



Ланин Владимир Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии радиоэлектронной аппаратуры Минского радиотехнического института. Автор 125 научных статей и докладов, а также 15 изобретений в области активированных процессов формирования контактных соединений в электронной аппаратуре с применением ультразвуковых колебаний и высокочастотного нагрева.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В производстве современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и приборов процессы пайки занимают значительный объем. Трудоемкость этих процессов достигает 15—20% общей трудоемкости изготовления изделий. Прогрессирующее усложнение РЭА и приборов, появление новых изделий, микроминиатюризация компонентов и функциональных сборочных единиц повышают требования к надежности паяных соединений, устойчивости и производительности технологических процессов пайки, их управляемости, возможности механизации и автоматизации.

При изготовлении новых радиоэлектронных устройств и приборов, основанных на использовании интегральных схем, микросборок, многослойных печатных плат, монолитных керамических и стеклокерамических конденсаторныхборок необходимы также технологические процессы пайки, которые исключали бы применение драгоценных металлов, обеспечивали высокую производительность и надежность паяных соединений.

Пайка многих изделий в настоящее время в большинстве случаев осуществляется с применением ручного труда, при этом трудно обеспечить высокое качество паяных соединений и надежность изделий. Существующие способы получения спаев с неметаллическими материалами (керамикой, стеклокерамикой, ситаллами и др.) путем предварительной металлизации их поверхности вжиганием паст серебра, палладия, платины или молибденово-марганцевой пасты требуют дополнительных временных и материальных затрат и главное значительного расхода остродефицитных и драгоценных металлов. При пайке металлизационных покрытий возникают дополнительные трудности, связанные либо с растворением металла покрытия в припой, например серебра, либо с плохой паяемостью покрытий, что вызывает необходимость дополнительного гальванического осаждения легкопаяемого металла.

Активация процессов пайки энергией ультразвуковых колебаний — одно из перспективных направлений в технологии РЭА и приборов. Введение механических упругих колебаний ультразвуковой частоты в систему жидкий припой — основной металл позволяет резко интенсифицировать такие процессы, как смачивание, растекание, капиллярное течение, а также увеличить химическую активность припоя и основного металла. Развитие кавитационных процессов в жидком припое ускоряет разрушение окисных пленок, имеющих на основном металле, и удаление их из зоны пайки, форсирует процесс нагрева припоя и обеспечивает осуществление бесфлюсовой пайки труднопаяемых металлов, неметаллических материалов (керамики, ферритов, полупроводниковых материалов). Одновременно с процессом кавитации в жидком припое возникают вторичные эффекты, такие, как микро- и макропотоки, радиационное давление, которые также активно воздействуют на формирование паяного соединения.

Активация процесса пайки ультразвуковыми колебаниями позволяет производить бесфлюсовую пайку и лужение большинства металлов, применяемых в РЭА и приборах. Бесфлюсовая пайка более экономична, поскольку такие операции, как флюсование и последующая очистка, требующие значительных затрат времени, исключаются. Исключение флюса при пайке в ряде случаев — необходимое условие осуществления процессов сборки микроэлектронных устройств. Ультразвук позволяет надежно паять металлы, которые считаются труднопаяемыми или вообще непаяемыми традиционными методами пайки, например ковар, никелевые сплавы, титан, алюминий и др. Замена в трансформаторах, электродвигателях медных проводов алюминиевыми может дать значительную экономию при условии надежной пайки этих проводов.

Применение энергии ультразвуковых колебаний в сочетании с рациональным выбором припоя и оптимальными технологическими параметрами процесса позволяет радикально

изменить понятие о непаяемых материалах. Многие неметаллические конструкционные и специальные материалы, в том числе керамика, стеклокерамика, ситаллы, ферриты, абразивы, могут быть спаяны с помощью ультразвука без предварительной металлизации их поверхности. Это создает возможность значительной экономии различных металлов, широко используемых для изготовления электрорадиоэлементов, микроразъемных устройств и специальных приборов, выпускаемых радиоэлектронной промышленностью. К тому же ультразвуковое технологическое оборудование легко подвергается автоматизации и может встраиваться в поточные линии, а также обслуживаться роботами, манипуляторами с микропроцессорным управлением.

Ультразвуковое оборудование для операций пайки и лужения выпускается отечественной промышленностью серийно. Разработан ряд контрольных и измерительных приборов, позволяющих оперативно и достоверно контролировать технологические параметры процесса ультразвуковой пайки и лужения.

Широкое внедрение процессов ультразвуковой пайки в производстве РЭА и приборов позволит не только существенно увеличить производительность технологических процессов пайки, улучшить качество изделий, но и экономить драгоценные металлы, повысить культуру труда, снизить процент регенерируемых и утилизируемых отходов производства и их вредное воздействие на окружающую среду.

В монографии впервые у нас в стране обобщен весь материал, накопленный в области ультразвуковой пайки и металлизации, и изложен с единых позиций анализа физико-химических процессов воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы и паяемые материалы. Наряду с предложенными физическими моделями процессов формирования спаев с металлическими и неметаллическими материалами в ультразвуковом поле значительное место уделено экспериментальным исследованиям влияния параметров ультразвукового воздействия на физико-механические свойства паяных соединений и функциональных элементов РЭА и приборов, подвергаемых ультразвуковой пайке. Приведены сведения о современных способах ультразвуковой пайки, технологическом оснащении и припоях, представляющие практический интерес.

Авторы надеются, что книга даст читателю необходимую информацию о современном состоянии ультразвуковой пайки в технологии РЭА и приборов и поможет научным и инженерно-техническим работникам в разработке и практическом использовании ультразвуковой пайки и металлизации, обеспечивающих высокую производительность технологических процессов и гарантирующую необходимую надежность паяных соединений.

ГЛАВА 1

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА РАСПЛАВЫ ПРИПОЕВ

1.1. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ЯВЛЕНИЯ В РАСПЛАВАХ ПРИПОЕВ

Первые научно-исследовательские работы по применению ультразвука для лужения и пайки алюминия и его сплавов проведены в Германии в 1938—1940 гг. Уже тогда было установлено, что введение ультразвуковых колебаний частотой 18—25 кГц в расплавленный припой разрушает окисные пленки на поверхности паяемого металлу, которая затем быстро смачивается припоем [1]. В нашей стране ультразвук для пайки и лужения труднопаяемых металлов, таких, как алюминий и его сплавы, применен в середине 50-х годов. В ходе исследований отмечалось, что при воздействии ультразвуковых колебаний в припое возникает явление кавитации, которое вызывает эрозию окисной пленки на алюминии и растворение ее в припое [2]. Одновременно было предложено использовать активацию энергией ультразвуковых колебаний расплавленного припоя для лужения и пайки изделий из керамики, абразивов, ферритов и других неметаллических материалов [3,4]. Исследования механических характеристик спаев показали, что наибольшая прочность спаев достигалась для установочной пористой керамики на основе стеатита, имеющей развитый микрорельеф поверхности [5, 6].

Главная роль при ультразвуковой металлизации керамических материалов отводилась процессу кавитации. Считалось, что под действием кавитационных микроударов поверхность керамики очищается от мелкой фракции основного материала, в результате чего открывается доступ к порам, которые под действием возникающих в жидком припое за счет кавитации высоких давлений заполняются припоем, обеспечивая тем самым достаточную прочность сцепления.

По современным представлениям, активация расплава припоя энергией колебаний излучающей поверхности ультразвукового инструмента вызывает в расплаве при интенсивностях ультразвука $(8-10) \cdot 10^3$ Вт/м² появление маленьких пузырьков — зародышей кавитации. Их количество увеличивается с ростом газосодержания расплава или с введением в расплав мелких твердых частиц, например, цинка или микропорошков других металлов, сплавов (например, ферротитана). Пузырьки, находящиеся в расплаве вблизи паяемой поверхности, пульсируют с частотой ультразвуковых колебаний, расширяются и затем захлопываются. При захлопывании возникают ударные волны, давления в которых могут достигать 10^5 МПа. Такие микроудары разрушают окисные пленки и загрязнения на паяемой поверхности, которая затем хорошо смачивается припоем. Возникающие в кавитационной области микро- и макропотоки уносят частицы окислов и загрязнений, перемещают расплав, а микроудары способствуют абразивному воздействию частиц твердой фазы, находящейся в расплаве припоя [7]. При распространении в расплаве припоя ультразвуковых колебаний достаточно высокой интенсивности (в зависимости от объема расплава) в нем могут возникать другие эффекты: переменное звуковое давление, «звуковой ветер», кумулятивные течения.

Для выявления главного эффекта необходимо провести анализ энергетических показателей их воздействия. Так, например, звуковое давление в жидкости при скорости колебания частиц 0,2 м/с составляет $2 \cdot 10^5$ Па, при этом давление в кавитирующих полостях достигает $(1-5) \cdot 10^8$ Па, а сила звука не превышает $(2-3) \cdot 10^4$ Вт/м². «Звуковой ветер» пропорционален градиенту плотности потока энергии ультразвука, при этом скорость его оказывается на несколько порядков меньше колебательной скорости частиц, которая в свою очередь значительно меньше скорости движения стенок кавитирующей полости в момент ее захлопывания. Однако с учетом макрохарактера перемещений жидкости под действием кумулятивных течений, возникающих в момент захлопывания кавитационной полости, они являются фактором, обеспечивающим перемешивание всей массы жидкости в кавитационной области.

Таким образом, главным из эффектов, возникающих в расплаве припоя при воздействии ультразвука, следует считать кавитацию и акустические микро- и макропотоки. Эти явления носят нелинейный характер и сопровождаются возникновением разрывов в сплошной жидкой среде и переносом массы вещества. Степень проявления нелинейности эффектов в данной среде при определенных внешних условиях (давлении, температуре и т. д.) определяется акустическим числом Маха: $M = v/c$, где v — амплитуда колебательной скорости; c — скорость звука в среде. Нелинейные эффекты возникают при значениях числа Маха $10^{-3}—10^{-4}$. Если на частоте 22 кГц амплитуда колебаний составляет 10^{-5} м, то этого достаточно, чтобы в расплаве припоя возникли вторичные эффекты, так как расчетное значение числа Маха не больше $5,6 \cdot 10^{-4}$.

Кавитацией называется явление возникновения, развития и захлопывания парогазовых полостей в жидкой среде. Различают акустическую кавитацию, возникающую при прохождении через среду звуковой волны большой интенсивности, и гидродинамическую, обусловленную сильным локальным понижением давления в жидкости вследствие больших скоростей ее течения. Возникновение акустической кавитации тесно связано с наличием в жидкостях и расплавах зародышей кавитации — микроскопических газовых пузырьков. Реальные жидкости и расплавы содержат нерастворимые примеси, которые могут быть жидкими, твердыми и газообразными. Зародышами или ядрами кавитации могут служить нерастворенные пузырьки газа, находящиеся во взвешенном состоянии. Кроме того, зародыши кавитации могут образовываться на твердой несмачиваемой жидкостью частице, имеющей трещину, заполненную нерастворимым газом (рис. 1.1). Поскольку поверхность трещины 2 несмачиваемая, то заходящая в трещину жидкость 1 будет образовывать относительно газа выпуклый мениск с радиусом R . Условие равновесия на границе раздела определяется выражением [8]

$$P_r + P_n - P_0 = -2\sigma/R$$

где P_r — парциальное давление газа в пузырьке; P_n — давление насыщенного пара; P_0 — давление в жидкости; σ — поверхностное натяжение на границе жидкость — поверхность частицы.

Если угол смачивания $\Theta > \pi/2 + \alpha$, то при этом условии поверхностное натяжение препятствует продвижению жидкости в глубь трещины. При увеличении давления парогазовой смеси внутри пузырька кривизна поверхности раздела между жидкостью и газом меняет знак и газовый пузырек выступает из трещины в виде сферического сегмента, при этом $0 < \alpha < \pi/2 + \alpha$. В определенный момент времени часть его может оторваться под действием гидродинамических сил и находиться в жидкости во взвешенном состоянии.

Дисперсные твердые примеси могут инициировать образование кавитационных зародышей лишь при условии, если они также находятся в жидкости во взвешенном состоянии. Г. Флинном доказано, что для воды при нормальных условиях преобладающим при их радиусе $5 \cdot 10^{-7}$ м [9].

Процесс образования зародышей кавитации на сферических твердых частицах, находящихся во взвешенном состоянии в расплавах металлов, которые не содержат растворенного газа, рассмотрен в работе [10:]. При этом предполагалось, что значения краевого

угла смачивания для случая роста зародыша на дисперсных твердых частицах из неметаллических материалов радиусом $10^{-6} - 10^{-7}$ м составляют $100-174^\circ$. Как показал анализ, работа образования зародыша критического размера существенно зависит от размеров впадины. При значениях краевого угла смачивания $\Theta > 120^\circ$ на сферической частице с конической впадиной, угол раствора которой больше 40° , а глубина больше половины радиуса частицы, работа зародышеобразования существенно ниже, чем для случая зародышеобразования на плоской поверхности. Для сферической частицы с впадиной сфероподобного типа эта работа при тех же значениях варьируемых углов всегда ниже, чем для частицы с конической впадиной.

Таким образом, твердая частица с дефектом в виде конической или сфероподобной впадины в указанных условиях может рассматриваться как центр образования зародышей кавитации. Такие частицы, с одной стороны, сохраняют потенциальные кавитационные зародыши в условиях положительных статических давлений (порядка 10^7 Па), с другой — могут существенно снизить величины работы и растягивающего давления, необходимые для образования зародыша критического размера в расплавах металлов. Поэтому на практике введение в состав припоя цинка, кристаллы которого не растворяются полностью, а также порошка абразива или ферротитана существенно увеличивает количество зародышей кавитации в припое.

Численные расчеты на ЭВМ, в которых величину начального радиуса R_0 варьировали в уравнении Кирквуда — Бете как параметр при заданной амплитуде давления P_m , показали, что амплитуда пороговых давлений P_{t1} (порог паровой кавитации Блейка) и P_{t2} (порог Хси — Плессета) для расплавов In, Ga и Fe (рис. 1.2, кривые 2, 3, 4) при всех значениях R_0 выше, чем для воды /, причем для пузырьков с $R_0 < 10^{-7}$ м величины P_{t1} , могут отличаться в 5-30 раз [10].

Значения резонансных частот для пузырьков с одинаковыми значениями радиусов для воды и расплава металла близки. Это объясняется тем, что пороги кавитации в основном определяются при заданном R_0 величиной поверхностного натяжения σ , значения которого для расплавов металлов существенно выше ($0,348-1,95$ Н/м), чем для воды ($0,075$ Н/м), тогда как резонансная частота f_p зависит как от σ , так и от плотности расплава ρ [11]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\sigma}{\rho}}$$

где R_p — резонансный размер пузырька; n — показатель политропы, равный 1 для изотермических и $4/3$ для адиабатических пульсаций полости.

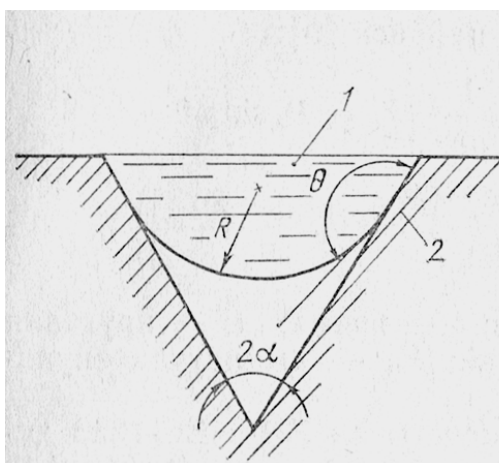


Рис. 1.1. Модель кавитационного зародыша, образовавшегося на не смачиваемой трещине

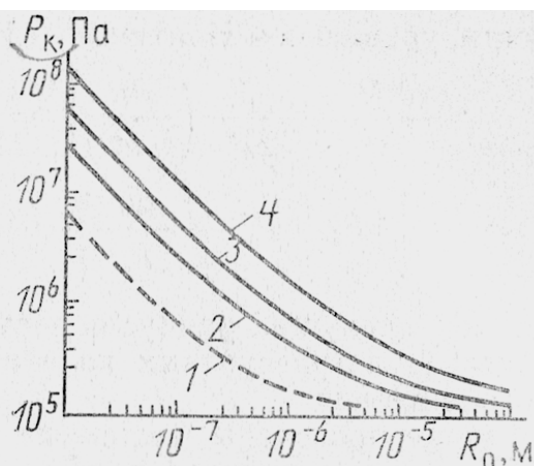


Рис. 1.2. Пороги акустической кавитации в жидкостях и расплавах

Сопоставление результатов аналитических оценок и численных расчетов для порогов P_{t_1} и P_{t_2} показывает, что для некоторого интервала значений они практически совпадают. Для расплавов индия интервал R_p составляет $7 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-5} м, железа — $4 \cdot 10^{-6}$ - $6 \cdot 10^{-5}$ м, а для воды, согласно расчетам Г. Флинна, — $2 \cdot 10^{-7}$ — 10^{-3} м. Поэтому взрывоопасный рост пузырьков в расплавах индия и железа начинается после достижения ими радиуса, равного $7 \cdot 10^{-7}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ м соответственно. Пузырьки с большими радиусами будут пульсировать в ультразвуковом поле и увеличиваться в основном за счет выпрямленной диффузии [10].

Движение парогазового пузырька в ультразвуковом поле под действием звукового давления описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка и, в частности, уравнением Нолтинга - Непайраса [9]:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2R} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho R} \left\{ P_0 - P_a \sin \omega t - \right. \\ \left. - \left[\left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + P_{II} - \frac{2\sigma}{R} \right] \right\},$$

где R — текущий радиус полости; t — время; ω — круговая частота ультразвуковых колебаний; P_a — амплитуда звукового давления.

Нами проведены численные расчеты на ЭВМ ЕС-1020 динамики кавитационной полости для расплавов олова ($\sigma=0,45$ Н/м) с учетом особенностей расплавов металлов. Так, при определении гидростатического давления P_0 было учтено давление столба жидкого металла в ультразвуковых ваннах:

$$P_0 = P_{атм} + h\rho g$$

где $P_{атм}$ — атмосферное давление, равное 10^5 Па; h — высота столба жидкого металла над излучателем ванны; g — ускорение свободного падения. Поскольку в расплавленном припое отсутствуют пары воды и других легкоиспаряемых веществ, давление газа внутри пузырька начального радиуса R_0 находилось исходя из условия равновесия пузырька [12]:

$$P_r = P_0 + 2\sigma / R_0$$

Динамика кавитационных полостей с начальным радиусом 10^{-5} в расплаве припоя ПОС61 на частоте 22 кГц при давлении ультразвуковых колебаний $(0,5; 1; 2) \cdot 10^5$ Па и условии адиабатического сжатия полостей ($\gamma = 4/3$) приведена на рис. 1.3. Расчеты показали, что кавитационные полости с начальными радиусами порядка 10^{-4} м не захлопываются, а пульсируют с незначительным увеличением радиуса при различных частотах и давлении ультразвуковых колебаний. Полости с радиусом 10^{-5} м начинают захлопываться при давлении $2 \cdot 10^5$ Па, а с радиусом $1 \cdot 10^6$ м — при $0,5 \cdot 10^5$ Па.

Таким образом, при одинаковом соотношении количества зародышей кавитации с различными начальными радиусами увеличение частоты ультразвуковых колебаний приводит к снижению числа захлопывающихся кавитационных полостей и, как следствие, к общему снижению локального кавитационного давления в припое. Этот факт подтверждается косвенной оценкой величины локального кавитационного давления P_k , измеренного с помощью кавитометра и выносного пьезоэлектрического датчика в расплавах припоев при различной частоте колебаний. Анализ зависимости, приведенной на рис. 1.4, позволяет сделать аналогичное заключение.

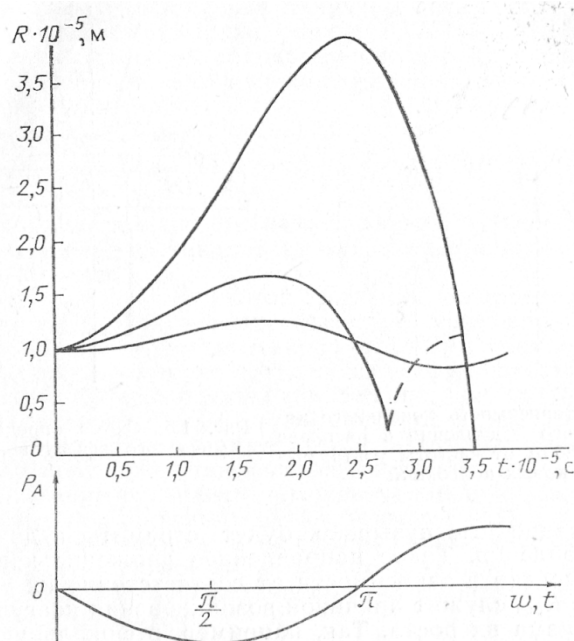


Рис. 1.3. Динамика кавитационной полости в расплаве припоя П200А

Зародыши кавитации, попадающие в область отрицательного давления, теряют устойчивость, начинают расти на полупериоде растяжения и быстро захлопываются на полупериоде сжатия. Так как акустическое поле в жидкости неоднородно, это служит причиной поступательного движения кавитационного пузырька. При этом направление движения пузырька зависит от соотношения его действительного радиуса R и резонансного $R_{рез}$. Если $R < R_{рез}$, то кавитационные пузырьки пульсируют в фазе с полупериодом сжатия и поэтому перемещаются по направлению к пучности давления. Если $R > R_{рез}$, то кавитационные пузырьки будут стремиться двигаться к узлам давления. Такое направленное движение кавитационных пузырьков в зависимости от соответствия их размеров величине $R_{рез}$ служит причиной возникновения коагуляционного механизма их роста. Так, например, в фокальную область источника ультразвука как бы засасываются пузырьки, в которых $R < R_{рез}$, и одновременно с этим из этой области выбрасываются в виде развивающихся микропотоков пузырьки, у которых $R > R_{рез}$.

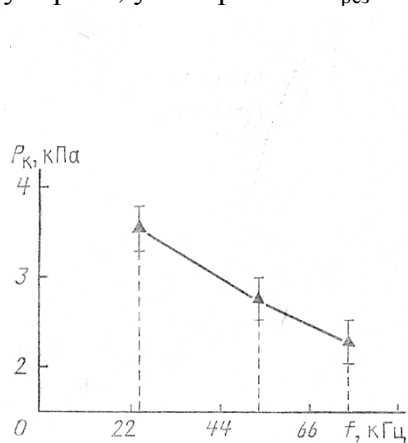


Рис. 1.4. Зависимость локального кавитационного давления в расплаве припоя П200А от частоты ультразвуковых колебаний

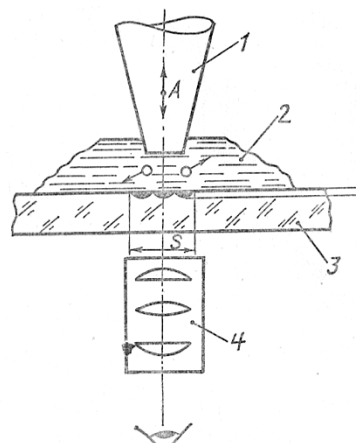


Рис. 1.5. Схема определения термического эффекта кавитации

Если в жидкости начальный радиус кавитационного пузырька уменьшается до некоторого значения R , то скорость v встречного движения частиц жидкости обратно пропорциональна радиусу уменьшающегося пузырька. При захлопывании пузырька сконцентрированная в ничтожно малом объеме кинетическая энергия трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. При этом из центра захлопнувшегося пузырька распространится ударная сферическая волна, а максимальное давление, согласно Рэлею, на расстоянии, равном $1,587$ радиуса от центра пузырька, составит [11]

$$P = P_0 \frac{R_0^3}{4^{4/3} R^3}$$

При $R = 1/10R_0$ и $P_0 = 10^5$ Па получаем величину давления вблизи поверхности пузырька, равную $15,75 \cdot 10^6$ Па.

Радиальная скорость сокращения пузырька и время смыкания t зависят от соотношения гидростатического давления и плотности жидкости:

$$v = \sqrt{\frac{3P_0}{2\rho} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right]}; \quad t = 0,915R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P_0}}$$

Время, необходимое для смыкания газового пузырька диаметром 10^{-4} м в воде, составляет $9,1$ мкс, а в оловянно-свинцовом припое — $29,9$ мкс.

Помимо высоких локальных давлений, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, возможно образование и локальных тепловых микрополей. При адиабатическом сжатии и одном и том же относительном уменьшении объема газа повышение температуры тем больше, чем больше значение γ для данного газа. При интенсивности звуковой волны $(5-10) \cdot 10^4$ Вт/м² температура внутри газовых кавитационных пузырьков может повыситься до нескольких сотен градусов. В момент резонанса температура в пузырьке достигнет еще больших значений (1000 К и выше) [13].

Для ориентировочной оценки температуры внутри газового кавитационного пузырька в любой стадии его сжатия при адиабатических условиях можно использовать уравнение Нолтинга – Непайраса

$$T_0 R_0^{3(\gamma-1)} = TR^{3(\gamma-1)}$$

где T_0, R_0 — начальные температура и радиус пузырька; T, R — значения температуры и радиуса в данный момент.

Полагая, что $\gamma = 4/3$ и начальная температура равна температуре расплава $523-573$ К, и учитывая, что R может на порядок отличаться от R_0 в сторону уменьшения, получаем температуры порядка $2873-3273$ К. Высокие температуры, возникающие в пульсирующих кавитационных пузырьках, увеличивают химическую активность как припоя, так и паяемого материала, создают предпосылки для интенсивного протекания процессов химического взаимодействия между ними.

Косвенное подтверждение наличия локальных тепловых микрополей в жидком припое в режиме развитой кавитации можно получить, наблюдая под микроскопом границу припой — неметаллическая прозрачная подложка после воздействия ультразвуковых колебаний на припой (рис. 1.5). Измеряя с помощью микроскопа 4 площадь расплавленных участков на поверхности прозрачной подложки 3 , граничащей с припоем 2 , и зная конкретную температуру расплавления неметаллического материала, можно рассчитать интенсивность кавитации в припое I_K возбуждаемой излучателем I , по формуле:

$$I_K = \frac{c(T_{пл} - T_{пр}) S_{пл} h\rho}{tS}$$

где c — теплоемкость материала; $T_{пл}$, $T_{пр}$ — температуры плавления материала и припоя, К; $S_{пл}$, S — площади расплавленных участков и наблюдений, h — глубина расплавленных участков.

Нами экспериментально показано, что при использовании в качестве подложки стекла марки К8 с температурой плавления 903 К площадь расплавленных участков при обработке в течение 3 с составила $0,75 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$, а интенсивность кавитации в припое П200А — $1,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. На слюде марки СНЧ с температурой плавления 1673 К средняя площадь расплавленных участков при времени ультразвуковой обработки 5 с составила $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$, а интенсивность кавитации — $3,9 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. Отсутствие при наблюдении расплавленных участков свидетельствует о том, что развитие кавитационного процесса не переходит порога кавитации в расплаве припоя ввиду малой интенсивности ультразвука или других факторов (температуры, давления и т. д.).

Пульсирование и захлопывание кавитационных полостей вызывает появление в областях, прилегающих к излучателю, микро- и макропотоков, которые имеют различное направление в зависимости от формы поверхности излучателя, амплитуды его колебаний, наличия препятствий на пути распространения и других факторов; Здесь и в дальнейшем под микропотоками подразумеваются такие потоки, масштаб которых соизмерим с максимальными размерами кавитирующих полостей (в стадии расширения), а под макропотоками — масштаб которых значительно больше максимальных размеров кавитирующих полостей.

При осуществлении процесса ультразвуковой пайки и металлизации важно управлять движением микро- и макропотоков, ориентируя их таким образом, чтобы они обеспечивали массоперенос микрообъемов припоя к паяемой поверхности и ускоряли тем самым протекание реакций химического взаимодействия компонентов припоя с материалом паяемого изделия.

Одновременно необходимо существенно уменьшить наличие и скорость микропотоков на границе расплавленной припой — атмосферный воздух, так как это приводит к повышенному окислению припоя в процессе пайки и, как следствие, ухудшению качества паяного соединения.

Исследование направления и скорости микро- и макропотоков в вязкой жидкости — глицерине и расплаве припоя П200А — проводилось на частотах 22 и 44 кГц при амплитуде ультразвуковых колебаний 10—20 мкм и различной геометрической форме излучающей поверхности ультразвукового инструмента, а именно величины угла наклона боковой излучающей поверхности к оси излучателя α (рис. 1.6). Изучение возникающих микро- и макропотоков в глицерине осуществлялось под микроскопом МБС-2, в расплаве припоя вблизи границы припой — поверхность подогреваемого до 493 К кварцевого сосуда — под микроскопом ММР-2Р [14].

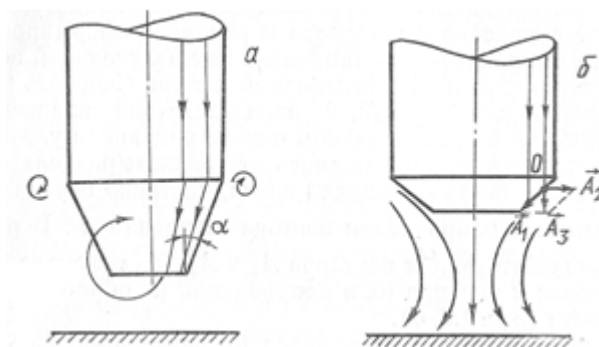


Рис. 1.6. Схема образования макропотока в жидкостях при различной геометрической форме излучающей поверхности

Скорость микро- и макропотоков определялась по движению металлических частиц (алюминиевой пудры) размером около 10 мкм, находящихся во взвешенном состоянии в глицерине и в припое. Фотографирование изучаемого макропотока осуществлялось с постоянной выдержкой при освещении импульсами света от лампы вспышки ИФК-120, питаемой от специального генератора импульсов частотой 10 - 50 Гц. Зная частоту и длительность импульсов и измерив на экране проектора 5ПО-1 длину трека частицы на фотокадре, оценивали скорость микро- и макропотока в данной области жидкости или расплава. Исследования показали, что при величине угла α 0—20° макропотоки в глицерине и расплаве припоя имели место главным образом у выступов и неровностей излучающей поверхности инструмента и носили вихревой характер (рис. 1.6, а). Образующиеся микропотоки имели локальный характер, массоперенос у обрабатываемой поверхности отсутствовал. Скорость макропотоков составляла 0,02—0,05 м/с.

Увеличение угла α от 20 до 45° и уменьшение средней высоты микронеровностей излучаемой поверхности до 0,35 мкм вызывают появление в жидкости и расплаве сформированного общего макропотока в направлении от излучающей поверхности инструмента к обрабатываемой детали. Скорость макропотока составляла 0,02 м/с, а зона действия зависела от амплитуды колебаний. В данном случае падающая ультразвуковая волна частично отражалась от границы раздела излучающая поверхность — жидкая среда, частично передавалась в последнюю в направлении вектора смещений A_2 . В результате равнодействующая векторов A и A_2 — A_3 увлекала частицы жидкости и уносила их в направлении к обрабатываемой поверхности (рис. 1.6, б).

Акустическое число Рейнольдса Re определяет роль нелинейных диссипативных эффектов в процессе распространения ультразвуковой волны в жидкости или расплаве [15]:

$$Re = \rho v l / \square = v l / \gamma$$

где ρ , \square , γ — соответственно плотность, динамическая и кинематическая вязкость среды; v — скорость потока; l — масштаб препятствия.

При средних размерах препятствий, определяемых для ванн лужения диаметрами обрабатываемых деталей 1-5 мм, значение акустического числа Рейнольдса составляет 40—150 единиц. Таким образом, в ультразвуковых макропотоках доминирует влияние вязкости жидкости или расплава, и поэтому ультразвуковая волна затухает раньше, чем успевают развиться нелинейные эффекты, приводящие к искажению формы потока и образованию в нем разрывов. Сформированные ультразвуковые макропотоки, имеющие ориентированное направление от излучателя к обрабатываемой поверхности и стационарные во времени, создают наилучшие условия для ускорения процессов массо- и теплообмена, протекания химических реакций взаимодействия паяемых материалов и припоя.

Одна из особенностей воздействия мощного ультразвука на процессы, протекающие в жидкостях и расплавах, — существенное увеличение высоты подъема жидкости и скорости ее прохождения в тонких капиллярах, так называемый ультразвуковой капиллярный эффект [16]. Установлено, что воздействие ультразвука на жидкость или расплав в капилляре обусловлено в основном захлопыванием кавитационных пузырьков. Так как вследствие потери устойчивости формы кавитационно-го пузырька его захлопывание может носить несимметричный характер, это служит причиной образования так называемых кумулятивных струй жидкости, радиус которых соизмерим с радиусом пузырька, а скорость близка к скорости захлопывания пузырька. При этом потенциальная энергия пузырька преобразуется в кинетическую энергию струи, которая, попав в канал капилляра, вызывает увеличение высоты подъема жидкости [17].

В работе [18] оценена величина избыточного давления над мениском в предположении, что диаметр капилляра намного меньше максимального диаметра кавитационного пузырька ($d \ll D$). При попадании струи в капилляр ее кинетическая энергия ΔE_C сообщается столбику жидкости в капилляре и расходуется на подъем жидкости на высоту Δh_{π} и

соответственное увеличение потенциальной энергии, а также на работу против сил трения:

$$\Delta E_c = \pi r^2 \Delta h_{\text{ц}} \Delta P_{\text{ц}} + \frac{\rho v_{\text{ц}}^3}{2} S \lambda \frac{H_0}{d} \Delta t_{\text{ц}}$$

где $v_{\text{ц}}$ — скорость подъема жидкости в капилляре; S, r — площадь поперечного сечения и радиус капилляра; λ — коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса, $\lambda = 64/\text{Re}$; H_0 — длина столбика жидкости в капилляре; $\Delta t_{\text{ц}}$ — время подъема.

Учитывая то, что $\Delta E_c = 4/3\pi R_{\text{max}}^3 \rho_0$, а время вытекания жидкости $\Delta t_{\text{в}} = t_{\text{ц}} = T/(V_{\text{ц}}N)$, где R_{max} — максимальный радиус пузырька; T — период колебаний; $V_{\text{ц}}$ — объем цилиндра; N — количество пузырьков в объеме $V_{\text{ц}}$, а также то, что параметры $P_a = 2 \cdot 10^5$ Па, $R_{\text{max}} = 10^{-4}$ м, $r = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м, $N = 10^{10}/\text{м}^3$, $f = 41,9$ кГц, избыточное давление в воде составляет $0,36 \cdot 10^5$ Па. В расплавах припоев ввиду их большой вязкости величина избыточного давления, очевидно, будет меньшей.

Исследование капиллярного течения расплавов припоев при воздействии ультразвука показало, что максимальная высота подъема расплава 118 мм наблюдалась в капилляре диаметром 0,55 мм при интенсивности колебаний $16 \cdot 10^4$ Вт/м². Время подъема составляло 14 – 20 с, а максимальная скорость в среднем 8 мм/с [19].

Ультразвуковой капиллярный эффект значительно ускоряет процессы пропитки капиллярно-пористых тел и может оказать положительное воздействие на увеличение прочности сцепления припоев с пористыми неметаллическими материалами в процессе ультразвуковой металлизации.

Таким образом, обусловленные кавитацией в расплавах динамические и тепловые эффекты, возникновение микро- и макропотоков, подъем расплава по капиллярам определяют интенсификацию процесса пайки под действием ультразвуковых колебаний и способствуют существенному повышению качества паяных соединений, а именно увеличению прочности сцепления, достижению равномерности смачивания и растекания припоя.

1.2. УДАЛЕНИЕ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СМАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ РАСПЛАВАМИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта окисными и неметаллическими пленками. При контакте металлов с газовой средой, органическими и неорганическими веществами образующиеся неметаллические пленки могут быть с ван-дер-ваальсовой, ионной валентной или ковалентной связями с подложкой. Перед пайкой неметаллические слои органического происхождения (жировые загрязнения, смазку) удаляют с помощью растворителей. Окисные пленки, препятствующие осуществлению физического контакта и взаимодействию припоя с паяемым металлом, удаляются механическим способом или травлением в специальных реактивах.

При пайке в процессе нагрева предварительно очищенных деталей окисные пленки снова начинают расти, особенно при нагреве на воздухе. Процесс окисления определяется химическим сродством металла к кислороду, температурой и длительностью нагрева. Удаление окисных пленок при пайке с поверхности металлов и сплавов без флюса может быть осуществлено путем диссоциации окислов в вакууме, инертных или восстановительных средах, а также с помощью механического воздействия или ультразвуковых колебаний.

Поскольку направление реакции окисления металла определяется температурой и давлением кислорода в окружающей среде [20]

$$K_p = \frac{P_{Me}^n P_{O_2}^{m/2}}{P_{Me_n O_m}},$$

где K_p — константа равновесия; P_{Me} , P_{O_2} , $P_{Me_n O_m}$ — давление паров металла, кислорода и окисла соответственно, уменьшение парциального давления кислорода в газовой среде и увеличение температуры смещает равновесие в сторону диссоциации окисла. Следовательно, таким образом достигается полное разложение окислов металла при пайке в нейтральных газовых средах и вакууме.

Анализ зависимостей давления диссоциации окислов от температуры и парциального давления кислорода показывает, что обеспечить условия диссоциации окислов многих металлов не представляется возможным ввиду необходимости необычно низкого парциального давления кислорода, которое при температуре 1423 К для железа и хрома составляет 10^{-8} - 10^{-13} , марганца — 10^{-6} , титана — 10^{-19} и для алюминия — 10^{-25} Па [21]. Такую степень вакуума достичь с помощью современного вакуумного оборудования невозможно. Другим затруднением при нагреве в глубоком вакууме является испарение самих металлов, особенно цинка, кадмия, марганца и магния.

При пайке металлов в активных газовых средах удаление окисной пленки с поверхности основного металла и припоя происходит в результате восстановления окислов активными компонентами газовых сред, в качестве которых используют водород или окись углерода. Однако при этом неизбежно взаимодействие металлов с компонентами газовых сред, а также с примесями в них кислорода и паров воды. В процессе пайки наиболее вредное воздействие на расплавленный припой оказывает водород, поскольку взаимодействие его с расплавом припоя протекает наиболее активно. Наличие водорода в паяном шве может привести к появлению водородной хрупкости, образованию трещин, пор и других дефектов. Ряд металлов, таких, как свинец, кадмий, олово, титан, цирконий, образует при пайке в восстановительной среде гидриды, поэтому пайка их в водородной среде нецелесообразна [20].

Сущность механического способа удаления окисных пленок с поверхности паяемого металла заключается в их разрушении под слоем жидкого припоя с помощью режущего инструмента или абразивного материала, при этом припой защищает паяемую поверхность металла от воздействия кислорода воздуха и вступает с ней в физический контакт. В качестве режущего и абразивного инструмента используют металлические щетки, сетки, пемзу, в качестве абразивных материалов — металлические порошки, асбест, вводимые в припой в мелкоизмельченном виде. Абразивные порошки, вводимые в расплав припоя, должны иметь меньшую плотность по сравнению с припоем для всплывания на поверхность.

При механическом удалении окисных пленок используют также припой с широким температурным интервалом плавления, например оловянно-цинковые (4—50% Zn), где роль абразива могут выполнять первичные кристаллы Zn и Sn в припое. Процесс удаления окисной пленки при этом ведут при температурах ниже температуры ликвидуса, но выше солидуса припоя, когда первичные кристаллы разделены друг от друга жидкой фазой. Недостатки бесфлюсовой низкотемпературной пайки с абразивным удалением окисной пленки — низкая производительность процесса, неравномерность толщины слоя лужения, наличие необлуженных мест ввиду трудности контроля процесса разрушения пленки, загрязнение припоя частицами абразива.

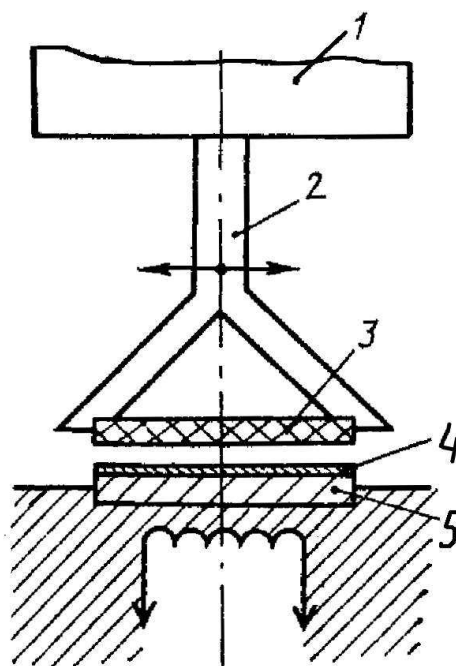


Рис. 1.7. Схема пайки способом притирки

Наиболее важны процессы бесфлюсовой пайки при сборке радиоэлектронных устройств и приборов, где требуется исключить применение флюсов, поскольку продукты их разложения способствуют развитию коррозионных процессов, при этом ухудшаются рабочие характеристики полупроводниковых приборов и интегральных схем, снижается надежность и долговечность РЭА и приборов. При пайке микрополосковых устройств, кремниевых кристаллов полупроводниковых приборов к неметаллизированным керамическим подложкам предложено удалять окисные пленки способом притирки, при этом перемещается только одна из соединяемых деталей, преимущественно верхняя, а вторая остается неподвижной в течение всего процесса. Притирка осуществляется на установках типа ЭМ-4025, ЭМ-415, ЭМ-445 путем наложения вибраций частотой 1—100 Гц на соединяемые детали [22, 23].

Схема данного способа показана на рис. 1.7. При перемещении паяемой поверхности платы 3, закрепленной в держателе 2, относительно основания 5 в параллельной плоскости с помощью вибратора 1 с амплитудой до 1 мм и более окисные пленки на паяемых поверхностях 4 разрушаются. Процесс пайки осуществляется без флюсов в интервале температур 403—883 К в течение 30—60с. Прочность паяных соединений при этом достаточно высокая и превышает значения, полученные в случае пайки в среде защитных газов [24]. К недостаткам метода притирки следует отнести длительность процесса (до 60с и более), необходимость обеспечения высокой степени параллельности плоских поверхностей паяемых деталей, воздействие вибраций значительной амплитуды на навесные элементы плат.

Введение упругих механических колебаний ультразвуковой частоты в расплавленный припой вызывает в нем кавитацию, а также ряд сопутствующих явлений: радиационное давление, микропотоки. Разрушение окисных пленок металлов происходит в основном за счет действия кавитации в жидком припое, тогда как вторичные эффекты ультразвука способствуют перемешиванию припоя и ускорению процесса лужения. Отрыв окисных пленок вызывается высокими местными давлениями (порядка 10^5 МПа), возникающими вблизи захлопывающихся кавитационных пузырьков.

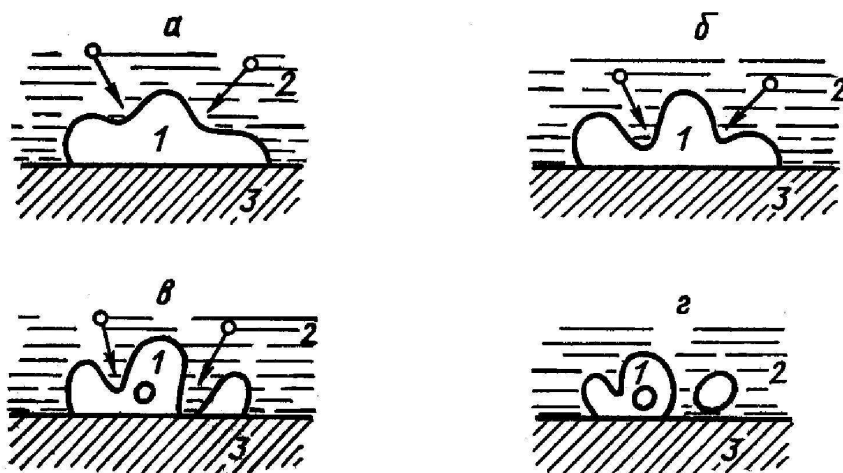


Рис. 1.8. Последовательность разрушения окисных пленок при кавитации (а-г)

Схематично разрушение окисной пленки 1 на поверхности алюминия 3 показано на рис. 1.8. Стрелками отмечены направления гидродинамических ударов, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков. Вскрытая от окисной пленки поверхность основного металла равномерно смачивается припоем 2. Возможный механизм разрушения хрупкой окисной пленки при ультразвуковом лужении определяется ее раскалыванием и отслоением в результате микроударов, появляющихся при захлопывании кавитационных пузырьков. Этот процесс был изучен с помощью высокоскоростной киносъемки [11]. В случае если при интенсивных колебаниях пульсирующего кавитационного пузырька силы сцеплений пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободные кусочки пленки отрываются от поверхности (рис. 1.9, б). Если прочность пленки превосходит силы сцепления, то пленка отслаивается от поверхности (рис. 1.9, а).

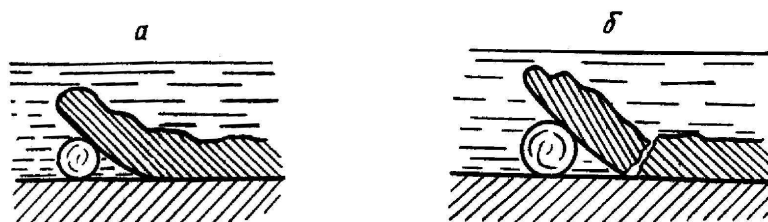


Рис. 1.9. Схема процесса отслоения пленки пульсирующим кавитационным пузырьком

Схема процесса ультразвукового лужения металлов с помощью излучателя, перемещаемого вдоль облуживаемой поверхности, показана на рис. 1.10. Излучатель 3, погруженный в припой 2 и находящийся на определенном расстоянии от поверхности, чаще всего от 0,2 до 2 мм, создает в расплавленном припое интенсивную кавитацию. Возникающие при захлопывании кавитационных пузырьков 4 гидродинамические удары разрушают окисную пленку 1 на поверхности металла б, освобождая доступ припоя к паяемой поверхности и обеспечивая ее смачивание. Образующиеся при этом шлаки 5 всплывают на поверхность припоя. При ручном лужении слой припоя недостаточно равномерный, прочность сцепления имеет также значительный разброс.

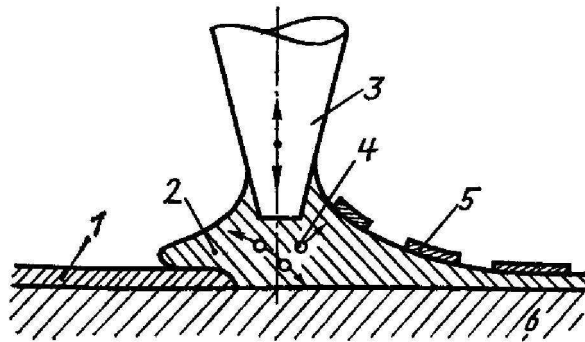


Рис. 1.10. Схема процесса ультразвукового лужения металлов

Таблица 1.1. - Температура ультразвукового лужения алюминия [20]

Тип припоя	Вид абразива	Температура лужения, К	Тип припоя	Вид абразива	Температура лужения, К
П200А	4—5% ферротитана	413—453	П250А	Первичные кристаллы	533—453
Олово	4—5% ферротитана	413—453	П350А	Первичные кристаллы	573—593

Ультразвуковое лужение металлов в кавитационном режиме сопровождается заметной эрозией основного металла. Весовой коэффициент эрозии K зависит от количества абразивных частиц или первичных кристаллов в расплаве N [20]: $K = \Delta V_{cp} \rho N / M$, где M , ρ — масса и плотность образца; ΔV_{cp} — средний объем металла, удаленного при лужении. Глубина эрозии возрастает с увеличением температуры и для алюминиевых сплавов при температурах порядка 533 К может достигать 0,5 мм, что ограничивает применение ультразвукового лужения для фольги толщиной менее 0,5 мм и проволоки диаметром до 0,5 мм, а также требует контроля процесса во времени. При введении в расплав припоя в качестве абразива порошка ферротитана глубина общей эрозии возрастает до 0,76 мм.

Кавитационный процесс в жидком припое, содержащем абразивный материал, может возникать и при допороговых интенсивностях ультразвука. При таком способе лужения, получившем название абразивно-кавитационного, используются припои на основе олова с содержанием цинка 20—50%, микропорошка ферротитана 4—7%. Продолжительность лужения составляет 5—40 с при интенсивности ультразвука $(2—8) \cdot 10^4$ Вт/см². Температурный режим лужения алюминия для некоторых припоев приведен в табл. 1.1.

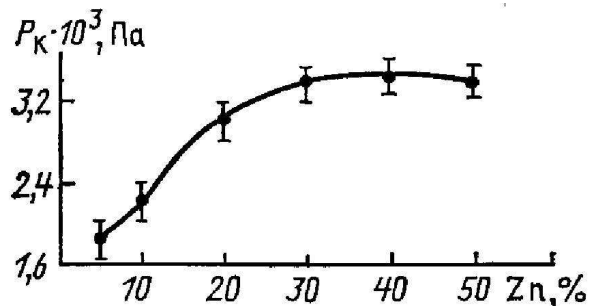


Рис. 1.11. Зависимость кавитационного давления в расплаве припоя от процентного содержания цинка

Нами показано, что кавитационное давление, измеренное с помощью лококавито-

метра, также зависит от процентного содержания цинка в припое (рис. 1.11). Максимальное значение кавитационного давления (до 3,5 кПа) при интенсивности ультразвука 10^5 Вт/м² достигается при содержании цинка 30—50%. Дальнейшее увеличение цинка снижает жидкотекучесть расплава и, кроме того, значительно увеличивает температуру лужения.

В процессе ультразвукового лужения часть энергии трансформируется в теплоту и затрачивается на нагрев припоя, что создает эффект увеличения температуры расплава припоя Sn—Zn (рис. 1.12). Этот эффект в большей степени проявляется при длительном озвучивании припоя и увеличении процентного содержания цинка в расплаве.

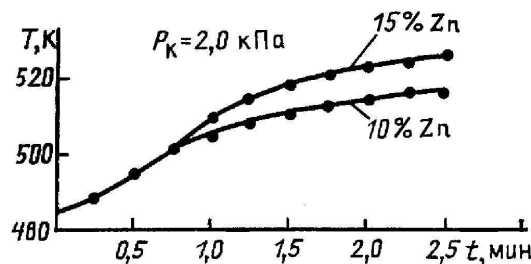


Рис. 1.12. Зависимость температуры расплавов припоев от времени воздействия ультразвука

Таким образом, кавитация и вторичные эффекты ультразвука создают необходимые предпосылки для протекания процесса смачивания расплавом припоя поверхности твердого тела, сопровождающегося понижением угла смачивания и увеличением коэффициента растекания.

1.3. ДИФФУЗИЯ И РАСТВОРЕНИЕ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Важнейший процесс, способствующий получению надежных спаев, — диффузия реагирующих компонентов спая. При воздействии ультразвуковых колебаний на жидкости и расплавы металлов происходит интенсификация процесса диффузии в жидком состоянии. Это связано с изменением под действием ультразвука коэффициента диффузии, вязкости среды, а также с появлением микро- и макропотоков в жидкости или расплаве.

Основное уравнение, описывающее процесс диффузии в изотропной среде (1-й закон Фика), имеет вид [21]

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где j — плотность диффузионного потока; D — коэффициент диффузии; C — концентрация диффундирующего вещества; x — координата. Если среда анизотропна, то коэффициенты диффузии в различных направлениях неодинаковы. Тогда уравнение (1.1) примет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}.$$

Коэффициент диффузии зависит от температуры T [21]:

$$D = D_0 \exp(-Q / R_0 T),$$

где D_0 — коэффициент, определяемый типом кристаллической решетки; R_0 — универсальная газовая постоянная, равная 8,3143 кДж/(кмоль·град); Q — энергия активации диффузии.

Если на диффундирующие частицы действует внешняя сила F , то под ее влиянием частицы вещества будут двигаться со средней скоростью

$$v = BF,$$

где B — подвижность частиц. В этих условиях к потоку диффузии добавится поток частиц, движущихся под действием силы, и тогда полный поток будет равен

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x} + vC.$$

Так как толщина диффузионного слоя в значительной степени зависит от интенсивности перемешивания жидкости вблизи поверхности твердого тела, ускорению диффузионных процессов в ультразвуковом поле во многом способствуют акустические микро- и макропотоки. Скорость микропотоков в вязких средах, например в глицерине, расплаве припоя, по данным авторов, не превышает 0,05 м/с, в то время как в водных растворах она равна 1,5—2 м/с [11]. Микропотоки способствуют протеканию процессов массообмена в диффузионном слое, особенно на границе расплав — твердое тело, а макропотоки — во всем объеме жидкой фазы припоя [25]. Воздействие ультразвуковых колебаний на припой приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя и соответственно к увеличению градиента концентраций на поверхности раздела фаз. Это вызывает увеличение интенсивности диффузии [26]:

$$Z = D \int_s \frac{\partial B}{\partial N} \partial S.$$

Интенсивность диффузии зависит от произведения частоты на амплитуду колебаний, возбуждаемых в расплаве, что приводит к нарушению диффузионного граничного слоя, возникающего при гетерогенных процессах.

Отмечено также снижение вязкости оловянно-свинцовых припоев на 9—15% при озвучивании их в течение 10—30 с. Это обусловлено уменьшением внутреннего трения и диссипацией акустической энергии в жидком припое с последующей ее трансформацией в теплоту [27].

Существенное влияние на увеличение скорости диффузии оказывает измельчение зерна припоев, подвергнутых воздействию ультразвука. Для бинарных сплавов типа Sn-Zn, Sn-Bi и других отмечено значительное уменьшение размеров зерна под действием ультразвука, которое в свою очередь зависит от температурного интервала кристаллизации [28]. Аналогичные исследования показали, что наиболее эффективное измельчение зерна в процессе кристаллизации припоев происходит у припоя П250А, содержащего 20% Zn и имеющего широкий интервал кристаллизации [29].

Измельчение первичных кристаллов в расплаве припоя приводит к увеличению коэффициента диффузии в соответствии с уравнением [30]

$$D = \frac{1}{3} (A_H^2 W_H + A_B^2 W_B) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right),$$

где A_H , A_B — амплитуды вынужденных колебаний в жидкости на нижней W_H и верхней частотах W_B ; ΔE — приращение потенциальной энергии взаимодействия частиц при изменении их концентрации до концентрации насыщения раствора, k — постоянная Больцмана.

Воздействие упругих колебаний ультразвуковой частоты приводит также к усилению диффузионных процессов в твердой фазе, несмотря на отсутствие в ней кавитации и вторичных акустических эффектов. Под влиянием ультразвука происходит снижение энергии активации атомов жидкой фазы, проникновение их в поверхностные слои твердого тела по дислокациям, границам кристаллитов и зерен.

1.4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СМАЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАСПЛАВАМИ ПРИПОЕВ

Образование паяного соединения предполагает сближение взаимодействующих сред до расстояний межатомного взаимодействия, которое осуществляется на этапе смачивания расплавом припоя паяемой поверхности. Смачивание, являясь одним из важней-

ших факторов, определяющих адгезионную прочность спая, представляет особый вид взаимодействия жидкой и твердой сред. Процесс смачивания описывается уравнением Лапласа

$$\cos\Theta = (\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}) / \sigma_{1,2} \quad (1,2)$$

Из уравнения (1.2) следует, что уменьшение разности в силах поверхностного натяжения, $\sigma_{1,3}$ и $\sigma_{2,3}$ способствует уменьшению угла смачивания, при этом освобождается поверхностная энергия: $Wa = \sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}$

Уравнение смачиваемости (1.2) может быть использовано для исследования процессов смачиваемости припоями поверхности твердых тел с известным допущением, поскольку в нем не учитывается сила тяжести капли жидкости и считается, что жидкость не взаимодействует с твердым телом. В реальных процессах пайки происходит активное взаимодействие припоя с паяемой поверхностью, поэтому капиллярные явления, протекающие при этом, будут более сложными.

Процесс смачивания предшествует явлению растекания припоя, обусловленному гидродинамическим и металлургическим факторами. Первый связан с такими явлениями, как жидкотекучесть, вязкость, поверхностное натяжение припоев, второй зависит от характера взаимодействия припоя с основным металлом и связанного с этим изменения вязкости припоя, температуры плавления, интервала кристаллизации. Растекание припоя по поверхности паяемого материала зависит от соотношения сил адгезии припоя к поверхности материала и сил когезии, определяющих прочность связи между частицами припоя. Чем больше будет разность между работой сил адгезии к паяемому материалу и работой сил когезии частиц припоя, определенной из выражения

$$A_{адг} - A_{ког} = \sigma_{1,2}(\cos\Theta - 1),$$

тем лучше растекание припоя по паяемой поверхности. Растекание припоя прекращается при достижении равновесия поверхностных натяжений взаимодействующих сред: $\sigma_{1,3} = \sigma_{1,2}\cos\Theta + \sigma_{2,3}$, где $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{2,3}$ - поверхностные натяжения на границах припой — газ, газ — твердое тело. припой — твердое тело соответственно; Θ — угол смачивания. Таким образом, для растекания припоя необходимо, чтобы $\sigma_{1,3} > \sigma_{1,2}\cos\Theta + \sigma_{2,3}$, может быть достигнуто путем уменьшения поверхностных натяжений $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{2,3}$.

Определение краевых углов смачивания припоями никелевых, железных и молибденовых подложек в вакууме 10^{-3} Па при нагреве до 1573—1673 К на установке высокотемпературной металлографии методом «лежащей» капли показало, что удовлетворительное смачивание в вакууме наблюдается в том случае, когда краевой угол не больше 40°. С увеличением времени выдержки до 1 мин краевой угол снижается до 26—30°. Для труднопаяемых металлов, таких, как титан, краевой угол не снижается ниже 90° при нагреве 1473 К [31]. В то же время возбуждение ультразвуковых колебаний в припое практически мгновенно обеспечивает снижение угла смачивания и растекание капли припоя по поверхности исследуемой подложки. Изучение динамики ультразвукового смачивания высокоскоростной киносъемкой показало, что продолжительность процесса смачивания составляет менее 0,02 с [32].

Таким образом, активация расплавленного припоя энергией ультразвуковых колебаний — мощный и практически безынерционный фактор, обеспечивающий сближение взаимодействующих сред на расстояния порядка атомных и способствующий интенсификации физико-химических процессов. Однако физическая сущность влияния энергии ультразвуковых колебаний на процесс смачивания выявлена еще недостаточно. Предложен ряд гипотез, объясняющих это явление.

Одна из них основывается на теории Я. И. Френкеля, в которой поверхностная энергия расплавов рассматривается как электростатическая энергия двойного электрического слоя, возникающего на поверхности металла. Поскольку электроны атомов наружного слоя металла обладают энергией, отличной от энергии электронов глубинных атомов, на границе расплав — твердое тело образуется своеобразный конденсатор, определяющий величину поверхностной энергии границы раздела, а следовательно, и ее поверх-

ностное натяжение. С этой точки зрения поверхностное натяжение расплавленного металла можно оценить как электрическую энергию конденсатора, отнесенную к единице площади. Для металла с валентностью z электрическое поле между обкладками, находящимися на расстоянии l , составляет [33] $E=4\pi ze/R^2$, где e — заряд электрона, равный $1,6\cdot 10^{19}$ Кл. Умножая E на толщину конденсатора, равную R , где R — расстояние между положительными ионами, получаем искомую разность потенциалов

$$\Phi=4\pi ze/R, \quad (1,3)$$

Полагая в выражении (1.3) R равным $2\cdot 10^{-10}$ м, $z = 2$, получаем, что разность потенциалов составит 360 В.

При активации расплава энергией ультразвуковых колебаний возникает электрокинетический эффект, заключающийся в том, что в результате действия ударной волны двойной электрический слой сдвигается и на границе твердое тело — жидкость появляется разность потенциалов. Согласно предложенной гипотезе, роль энергии ультразвуковых колебаний сводится к «разрядке» конденсатора на поверхности раздела, вследствие чего происходит «стирание» поверхностного натяжения и улучшение условий смачивания.

Другие гипотезы теоретически и экспериментально доказывают, что при введении ультразвуковых колебаний тангенциальная составляющая колебательного движения σ' соизмерима с величиной поверхностного натяжения σ_0 в невозмущенной среде. Поэтому физические свойства границы раздела фаз изменяются в сторону уменьшения энергии поверхностного натяжения $\sigma_{2,3}$, резко уменьшается краевой угол смачивания и улучшается процесс растекания припоя по паяемой поверхности [34]. Поверхностное натяжение в этом случае может быть записано в виде $\sigma = \sigma_0 - \sigma'$. Величина σ' пропорциональна мощности ультразвука, вводимой в расплав. Поэтому металлы, имеющие меньшую величину σ_0 , должны лучше смачиваться ультразвуком при этой же величине вводимой мощности.

В обычном состоянии для расплавленного припоя, находящегося на поверхности неметаллического материала, характерно, что $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$, т. е. работа сил когезии значительно превышает работу сил адгезии. Расплавленная навеска припоя в результате действия сил поверхностного натяжения и сил тяжести принимает форму «сидячей» капли, смачивание поверхности при этом отсутствует.

Если в системе припой — паяемый металл введение флюса позволяет увеличить разность $\sigma_{1,3} > \sigma_{2,3}$ и обеспечить смачивание поверхности металла за счет удаления окисных пленок с нее, то при пайке неметаллических материалов применение флюсов неэффективно, так как не только паяемая поверхность, но и вся масса материала представляет собой окисный продукт. При использовании высокотемпературных припоев на основе бинарных сплавов меди и нагреве в вакууме 10^{-3} Па углы смачивания на керамических материалах типа 22ХС не ниже $125—130^\circ$ [35]. Измерение краевых углов смачивания пьезокерамики на основе титаната бария расплавами свинца и олова и их сплавами в зависимости от температуры показало, что смачивание пьезокерамики начинается при 1273 К и краевой угол при этом составляет $88—90^\circ$ [36].

Введение ультразвуковых колебаний в систему расплавленный припой — паяемый неметаллический материал с помощью волноводного излучателя (рис. 1.13, 2) интенсифицирует процесс смачивания неметаллического материала. Происходящие при этом изменения в значениях коэффициентов поверхностного натяжения в меньшей степени отразятся на значениях $\sigma_{1,3}$ и $\sigma_{1,2}$, потому что твердое тело и газовая среда при данных мощностях вводимого ультразвука менее всего подвержены возмущениям. Наибольшие изменения, очевидно, произойдут на границе расплавленный припой—паяемый материал, что отразится на величине коэффициента $\sigma_{2,3}$.

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 1.14, показывает, что энергия взаимодействия W для исследованных припоев Sn — Zn П200А 2 и системы Pb — Sn—Zn—In 1 [37] увеличивается примерно в 5 раз при оптимальной величине кавитационного давления в припое 1,5—2,0 кПа и более чем в 6 раз превышает значение коэффициента поверхностного натяжения оловянно-свинцовых припоев при аналогичных температурах (0,5 Н/м).

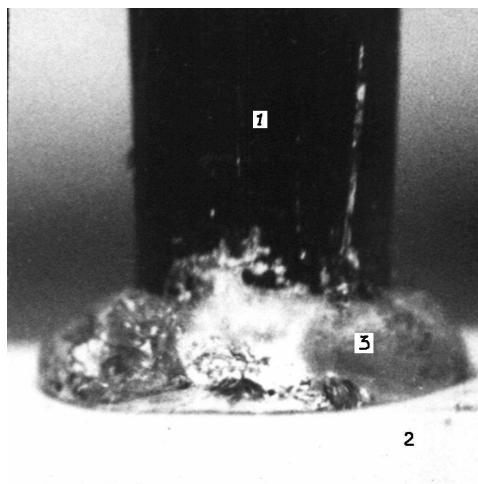


Рис. 1.13. Смачивание поверхности стеклокерамики припоем при активации энергией ультразвуковых колебаний: 1 – волновод; 2 – стеклокерамика; 3 – припой

Для улучшения смачивания поверхности неметаллических материалов важно также быстрое разрушение газовых пленок, находящихся на поверхности и обладающих всеми свойствами твердого тела в соответствии с теорией граничного слоя А. С. Ахматова [38]. Введение ультразвуковых колебаний в зону контакта жидкого припоя с поверхностью паяемого материала с интенсивностью, превышающей порог кавитации в припое, вызывает образование кавитирующих микрополостей на полупериоде растяжения, которые при захлопывании способствуют разрушению газовых пленок. На полупериоде сжатия под действием микроударов жидкий припой заполняет эти микрополости, осуществляя непосредственный контакт с поверхностью материала.

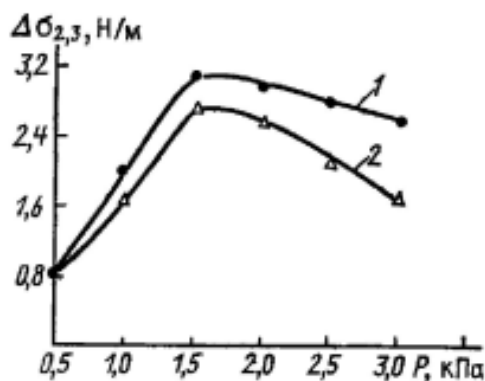


Рис. 1.14. Зависимость поверхностного натяжения на границе припой – стеклокерамика от кавитационного давления припоя

Таким образом, смачивание стеклокерамических материалов в процессе ультразвуковой металлизации достигается за счет удаления газовых пленок и резкого увеличения процессов взаимодействия на границе припой — паяемый материал, что приводит к снижению угла смачивания и растеканию припоя по поверхности материала.

Энергия взаимодействия припоя системы Pb — Sn — Zn — In со стеклокерамикой

при угле смачивания 25° , рассчитанная по уравнению Юнга — Дюпре $W = \sigma_{1,2}(1 + \cos\Theta)$, составляет 0,95 Н/м, что почти на три порядка превышает энергию дисперсионного взаимодействия при смачивании жидкостями с низким поверхностным натяжением.

Наличие химического взаимодействия при смачивании стеклокерамики припоями в присутствии энергии ультразвуковых колебаний подтверждается зависимостью степени смачивания от температуры процесса металлизации. При исследовании процесса смачивания сплава АМГ-6 легкоплавкими припоями с температурами плавления ниже 373К на основе сплава Вуда с добавками металлов Li, Zn, Ga, Ge, In, Pb, Bi, Cd установлено, что температурный порог ультразвукового лужения находится в пределах 513—553К. При увеличении мощности ультразвуковых колебаний порог лужения снижается до температуры плавления припоя [39].

При ультразвуковой металлизации пьезокерамических материалов расплавами чистого олова и припоя ПОС61 установлена зависимость коэффициента смачивания от технологических параметров: времени озвучивания и температуры расплава. Пороговые значения амплитуды ультразвуковых колебаний составили 15 мкм, а температуры процесса металлизации — 593К [40].

При исследовании зависимостей прочности сцепления припоев систем Sn — Zn (П200А) и Pb — Sn — Zn — In от температуры и времени ультразвуковой металлизации стеклокерамики установлено, что смачивание стеклокерамики припоями начинается с 473К, а оптимальные значения прочности сцепления припоя Pb — Sn — Zn — In со стеклокерамикой 18—19 МПа достигаются в интервале температур 523—543К и времени 5—7 с. Для припоя П200А наибольшая прочность сцепления достигается при температуре металлизации 593 ± 20 К [41].

Помимо температурного порога, процесс ультразвуковой металлизации характеризуется определенным временным интервалом, зависящим от инерционности процессов физико-химического взаимодействия между припоем и паяемым материалом.

1.5. ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВОВ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Развитие кавитационного процесса в расплавленном припое, сопровождаемое динамическим и термическим эффектами, увеличивает химическую активность компонентов припоя и создает условия для протекания реакций химического взаимодействия припоя с паяемым неметаллическим материалом. Для образования прочного паяного соединения разнородных материалов, например керамических и стеклокерамических, необходимо протекание процессов физико-химического взаимодействия, результатом которых является образование переходной зоны, содержащей продукты реакции в виде стехиометрических соединений. Прочность связи материалов обуславливается при этом валентными силами [42].

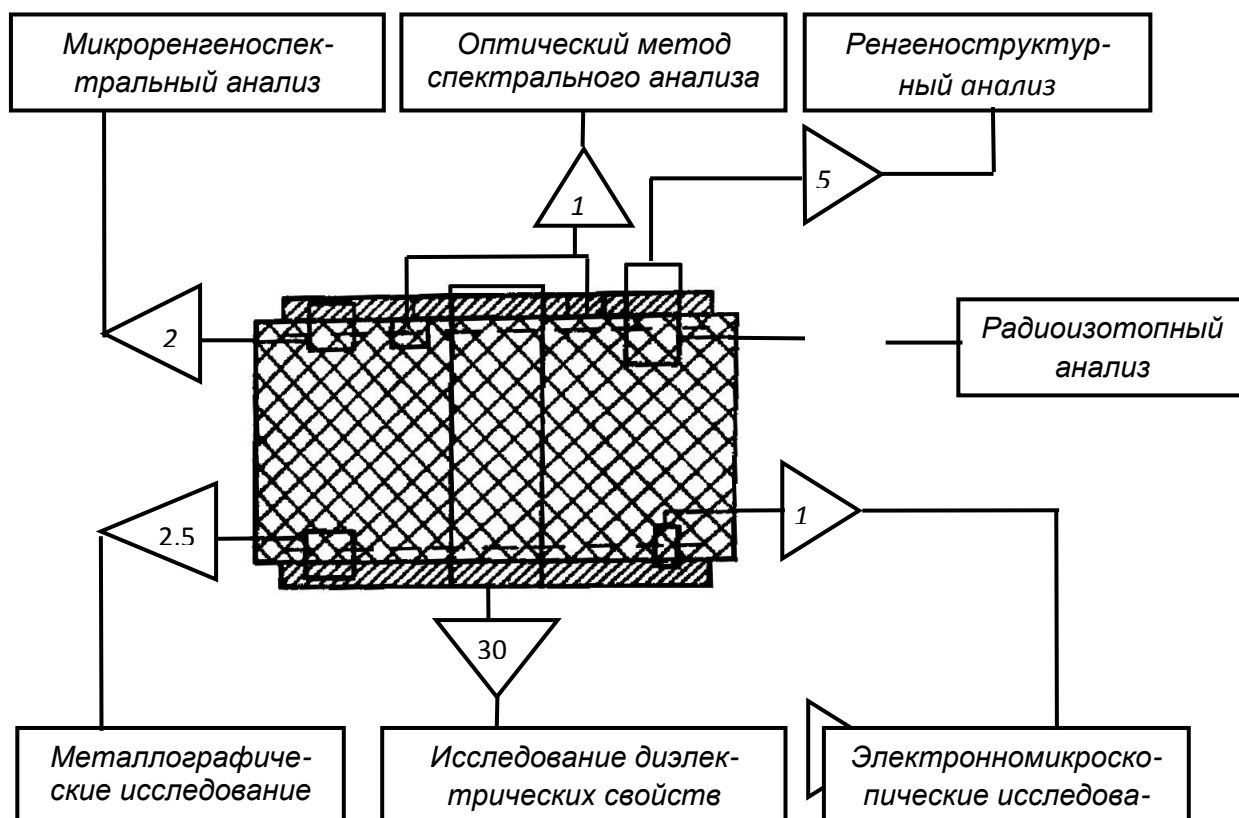


Рис. 1.15. Структурно-логическая схема исследований переходной зоны «металлизированный слой - основной материал»

Исследование переходной зоны между припоем и неметаллическим материалом может быть проведено с применением различных методов анализа, включая металлографический, оптический, рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный, электронномикроскопический и др. Структурно-логическая схема исследований переходной зоны «металлизированный слой — материал» с указанием разрешающей способности каждого метода приведена на рис. 1.15. Для подтверждения наличия переходной зоны применяется метод исследования диэлектрических свойств металлизированных образцов. Наиболее структурно чувствительной характеристикой является измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

Образцы металлизированных неметаллических материалов можно представить в виде слоистого диэлектрика с последовательным соединением слоев (рис. 1.16). При этом суммарная емкость образца и его тангенс угла диэлектрических потерь определяются так [42]:

$$C = \frac{C_A C_B}{C_A + C_B},$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_B \operatorname{tg} \delta_A + C_A \operatorname{tg} \delta_B}{C_A + C_B},$$

где C_A , C_B — емкости переходной зоны A и основного материала B ; $\operatorname{tg} \delta_A$, $\operatorname{tg} \delta_B$ — тангенсы диэлектрических потерь слоев соответственно.

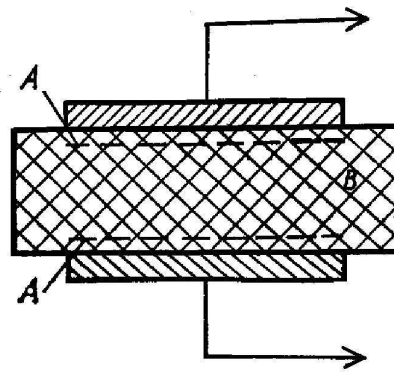


Рис. 1.16. Схема расчета тангенса угла диэлектрических потерь металлизированного образца

С уменьшением толщины металлируемого образца C_B и $tg\delta$ увеличиваются, а C_A уменьшается. Увеличение ширины переходной зоны и соответственно увеличение потерь в зоне приводят к значительному увеличению $tg\delta_A$, а следовательно, и $tg\delta$ всего образца. Поскольку механическим сошлифовыванием и последующей металлизацией удается получить толщину образца порядка 300—350 мкм, разрешающая способность этого метода невысока.

Металлографические исследования позволяют получить данные о структуре переходной зоны, выявить внутренние дефекты спая, наблюдать изменение цвета материала, прилегающего к припою, что может свидетельствовать в пользу изменения состава и свойств переходной зоны. Большие преимущества при этом обеспечивают косые аншлифы участков спая, что дополнительно увеличивает разрешение в зоне наблюдения в 10 раз и более. Визуальные наблюдения и фотографирование участков спая, прилегающих к неметаллическому материалу, проводят на металлографических микроскопах типа МИМ-7, ММР-2Р, МИН-4 и др. Основной трудностью таких исследований является резкое различие в микротвердости соединяемых материалов. Так, в случае пьезокерамики на основе ВаТiОз это различие по сравнению с припоем П200А достигает 25 раз.

Спектральный анализ позволяет обнаружить в спектре неметаллического материала линии компонентов припоя, установив тем самым факт проникновения того или иного компонента припоя в основной материал или растворения основного материала в припое. Путем последовательного сошлифовывания слоев металлизированного материала можно с точностью по толщине до 10 мкм определить размеры переходной зоны. Данный метод может быть успешно применен для исследования переходных зон спаев стекла с металлами с размерами до 250 мкм и более.

Идентификацию интерметаллидных, окисных и других соединений, присутствующих в переходной зоне, можно с достаточной степенью точности осуществить с помощью фазового рентгеноструктурного анализа. Использование современных дифрактометров типа ДРОН-2 с остросфокусированным рентгеновским излучением повышает разрешающую способность метода до 40—50 мкм.

Анализ зоны спая с помощью радиоактивных изотопов (авторадиографический контроль) основан на явлении искусственной радиоактивности. Этот метод позволяет фиксировать радиоактивное излучение изотопов некоторых компонентов припоя, например Fe^{59} , Zn^{65} , и следить за их проникновением в глубь неметаллического материала. Активацию припоя осуществляют потоком нейтронов при его выплавке, что позволяет проводить работу с изотопами, имеющими непродолжительный срок жизни и оказывающими менее вредное воздействие на человека.

Микрорентгеноспектральный метод анализа обеспечивает возможность получения данных о микрохимической структуре переходной зоны и соединяемых материалов. Качественный анализ осуществляется методом сканирования электронного пучка на заданной

поверхности, в результате чего может быть получена информация о распределении элементов, об однородности фаз, о морфологии их распределения.

Количественное определение химического состава осуществляется сравнением интенсивности аналитической линии характеристического рентгеновского излучения, генерируемого исследуемым образцом и эталоном известного состава при идентичных условиях возбуждения. В первом приближении отношение регистрируемых интенсивностей прямо пропорционально отношению концентраций искомого элемента в образце и эталоне [43]:

$$C_{обр}^A / C_{эт}^A = (I_{обр}^A / I_{эт}^A) \cdot I_0,$$

где $C_{обр}^A, C_{эт}^A$ — концентрации искомого элемента A в образце и эталоне, мас. %;

$I_{обр}^A, I_{эт}^A$ — величины интенсивности линий элемента A на образце и эталоне под углом Θ к плоскости объекта.

Серийно выпускаемые приборы, сочетающие в себе растровый электронный микроскоп высокого разрешения и рентгеновский микроанализатор типов РЭМП-1, РЭМП-2, ЭММА-2 (СССР), Камебакс (Франция), JSM-50A (Япония), ARL (США), имеют минимальный размер зонда (около 0,1 мкм). Разрешающая способность при исследовании на этих приборах при количественном анализе равна 2 мкм.

Наибольшей разрешающей способностью переходной зоны обладает метод электронной микроскопии, позволяющий исследовать тонкую микроструктуру переходной зоны с размером элементов, не превышающим долей микрометра. Для исследования спаев используют угольные или металлические реплики, воспроизводящие рельеф поверхности изучаемого объекта. Испытания проводят в основном на электронных микроскопах просвечивающего типа ЭМ5, УЭМВ-100, ЭММА-2 и др.

Экспериментальные исследования переходной зоны системы пьезокерамика — припой при ультразвуковой металлизации, проведенные с использованием комплекса методов, позволили установить размер и химический состав этой зоны. Так, металлографическими исследованиями спая установлено изменение в цвете зоны пьезокерамики, непосредственно прилегающей к припою. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что содержание Zn и Sn в пограничном слое керамики составляет 0,4 — 1%. Глубина переходной зоны, определенная с помощью радиоизотопного метода, составляет для керамики BaTiO₃ 40 мкм, для керамики (Pb_{0,60}Ba_{0,40})Nb₂O₆ — 10 мкм. Проникновение металла в пьезокерамику происходит за счет межкристаллитной диффузии. При анализе проб, взятых с поверхности керамики BaTiO₃, обнаружен Ti, с ЦТС-19 — Ti и Zn [44].

Микрорентгеноспектральным анализом исследована структура переходной зоны при металлизации пьезокерамик типа ТБК-3, ЦТБС-3 оловянно-цинковым припоем, содержащим 3—11% цинка. Установлено, что на границе раздела подложка — покрытие формируется переходная область с повышенной микротвердостью, обогащенная цинком, который при содержании 5—7 мас.% сконцентрирован вблизи подложки [45].

Рентгеноструктурный анализ показал наличие фазы Zn₂SiO₄ в системе ЦТБС-3 — припой и ZnTiO₄ в системе титановый сплав ВТ5-1 — припой на границе раздела подложка покрытие. Это подтверждает диффузионную подвижность и реакционную способность цинка в процессе ультразвуковой металлизации пьезокерамических материалов. Образование химических соединений цинка с окислами, входящими в состав керамики, обуславливает высокую прочность сцепления припоя, что создает предпосылки для замены процесса высокотемпературного вжигания серебра при формировании электродов к пьезокерамическим элементам металлизацией легкоплавкими припоями.

Исследованы структуры металлических спаев со стеклокерамическими материалами, в состав которых входило 20—30%; стекла в виде группы окислов SiO₂, BaO, PbO, включая добавки окислов Na₂O, K₂O, TiO₂, а также керамические материалы Т-80, Т-150, Т-260 на основе окислов SrTiO₂, CaTiO₃ и TiO₂ [46]. Ультразвуковую металлизацию стек-

локерамических образцов осуществляли на лабораторной установке при температуре 543 ± 5 К, скорости металлизации 0,3 м/мин на частоте 44 ± 1 кГц и амплитуде колебаний рабочего инструмента 5—8 мкм. В качестве припоя использовался экспериментальный сплав системы РЬ—Sn—Zn—In с температурой плавления 453 К [47]. Исследования переходной зоны между припоем и стеклокерамикой проводились методами измерения тангенса угла диэлектрических потерь, металлографического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов [48].

Для определения тангенса угла диэлектрических потерь образцы из стеклокерамики шлифовались перед металлизацией до толщин 2,0—0,4 мм. Величины емкости и добротности образцов измеряли на частоте 10 МГц с помощью прибора Е9-4. Тангенс угла диэлектрических потерь рассчитывался по формуле [49]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_2(Q_2 - Q_1)}{Q_1 Q_2 (C_2 - C_1)},$$

где C_1, C_2 — емкости по шкале прибора при подключенном и отключенном образце; Q_1, Q_2 — добротности при подключенном и отключенном образцах.

Анализ полученных экспериментальных данных, представленных в табл. 1.2, показывает, что с уменьшением толщины стеклокерамических образцов их емкость изменилась незначительно (на 15%), в то время как $\operatorname{tg} \delta$ возрос почти в 2 раза. Такое увеличение может указывать либо на наличие переходной зоны, либо на значительное проникновение припоя в стеклокерамику, что также вызывает изменение ее диэлектрических характеристик.

Металлографический анализ спаев, полученных в ультразвуковом поле на микроскопе МИМ-8, показал (рис. 1.17), что в спае вдоль поверхности стеклокерамики наблюдается тонкая темная зона окисных соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, примыкающем к поверхности стеклокерамики 3. На фотографии микрошлифа спая отчетливо заметно смачивание частицами индия 2 поверхности стеклокерамики. Располагаясь вдоль ее поверхности, крупные зерна индия (светлые по виду) смачивают ее поверхность и тем самым увеличивают прочность спая. Однако ярко выраженной зоны диффузии между припоем и стеклокерамикой, а также проникновения припоя в глубь стеклокерамики отмечено не было. Проникновение припоя по трещинам и другим микродефектам имело место в результате структурных несовершенств самой стеклокерамики либо нарушений технологии ультразвуковой металлизации, например, при возникновении жесткого акустического контакта излучающего торца ультразвукового инструмента с

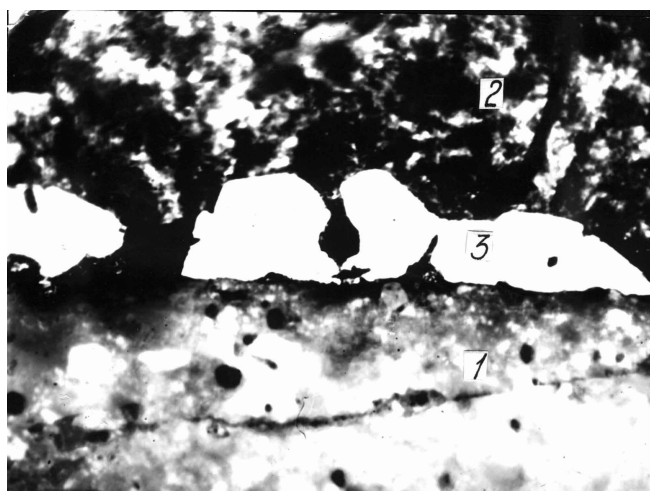


Рис.1.17. Микроструктура паянного соединения стеклокерамики с припоем системы Pb-Sn-Zn-In ($\times 360$)

поверхностью материала. При наличии макро- и микротрещин в приповерхностных слоях стеклокерамики припой под действием интенсивных кавитационных давлений заполняет микротрещины и микровпадины, повышая тем самым в некоторой степени прочность сцепления. Однако значительное проникновение припоя в глубь стеклокерамики существенно влияет на ее диэлектрические свойства.

Таблица 1.2. - Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь металлизированных образцов стеклокерамики

№ партии	Толщина образца, мм	Емкость, пФ	$\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$
1	2,0	80	8,0
2	1,5	82	8,9
3	1,0	90	9,5
4	0,8	91	10,3
5	0,6	91	11,5
6	0,4	92	14,5

Металлографические исследования зоны спая стеклокерамики с припоем системы Sn—Zn (П200А) показали (рис. 1.18), что вдоль паяемой поверхности наблюдается ориентированное расположение кристаллов цинка 2 под различными углами к поверхности стеклокерамики 3. Отмечена также тонкая темная зона интерметаллидных и других соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, непосредственно примыкающем к поверхности стеклокерамики [50]. Установлено, что при металлизации стеклокерамики припоем системы Pb—Sn—Zn—In происходят изменения в микроструктуре стеклокерамики, заключающиеся в увеличении стеклофазы в пограничной с припоем области, в образовании стекловидных областей, располагающихся вблизи границы с припоем (рис. 1.17).



Рис. 1.18. Микроструктура паяного соединения стеклокерамики с припоем системы Sn-Zn ($\times 360$)

Анализ металлокерамического спая с целью определения состава стеклофазы в керамике, объемов стекла и пустот в зависимости от расстояния до межфазной границы металлизированной керамики на основе Al_2O_3 показал, что возле металлизированной зоны наблюдается увеличение объема стеклофазы и уменьшение объема пустот. Основным компонентом стеклофазы является SiO_2 , содержание CaO и TiO_2 значительно уменьшается на расстояниях до 300 мкм от межфазной границы [51].

Рентгеноструктурный анализ спаев со стеклокерамикой, проведенный на дифрактометре ДРОН-2 с использованием излучения CuK_α позволил выявить некоторые особенности механизма образования спая с материалами, богатыми аморфной фазой. Так, при анализе рентгенограмм исходного металлокерамического материала отмечены рефлексы,

соответствующие двойным окислам 2PbOSiO_2 и 2BaOSiO_2 , а также уменьшенная интенсивность рефлексов окисла SiO_2 по сравнению с окислами PbO и BaO . Это указывает на физико-химическое взаимодействие окислов, составляющих аморфную фазу стеклокерамики, в процессе спекания стеклокерамической массы при 973—1023 К. Анализ припоев в исходном состоянии, применяемых для ультразвуковой металлизации, показал наличие в них окислов цинка и ZnOg , образовавшихся в процессе приготовления припоя, а именно при растворении цинка в свинцово-оловянистой массе припоя [50].

На рентгенограммах спаев отмечены рефлексы, соответствующие сложным окисным соединениям $\text{Pb}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ и BaZnSiO_4 , в то же время относительная интенсивность рефлексов двойных окислов 2PbOSiO_2 и 2BaOSiO_2 была уменьшена по сравнению с интенсивностью, наблюдаемой на рентгенограмме исходного материала (рис. 1.19). Это подтверждает факт химического взаимодействия между компонентами припоя, а именно Zn , с одной стороны, и окислами аморфной фазы стеклокерамики PbO и BaO — с другой. В рентгенограмме спая припоя системы Pb—Sn—Zn—In со стеклокерамикой обнаружены рефлексы, соответствующие окислу In_2O_3 , что дополнительно свидетельствует об окислительном характере протекающих химических реакций. Как показало исследование тонкой микроструктуры спая припоя системы Pb—Sn—Zn—In со стеклокерамикой, проведенное на электронном микроскопе ЭММА-2 с увеличением в 1000 раз и раствором электронном микроскопе «MINI-SEM» с увеличением в 700 раз (рис. 1.20), размеры зоны сложных окисных соединений, образовавшихся в припое вблизи границы со стеклокерамикой, не превышают 3 мкм.

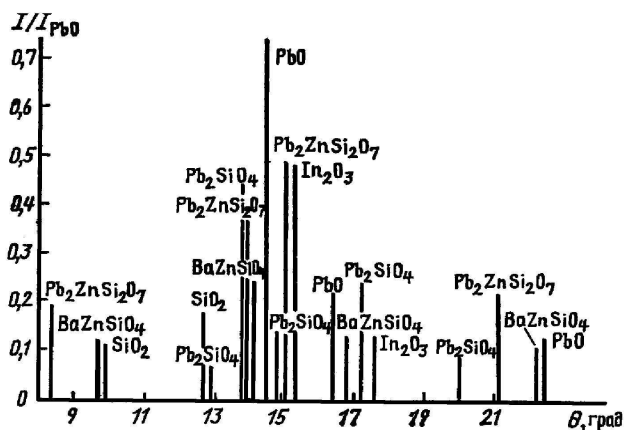


Рис. 1.19. Относительная интенсивность рентгеновских рефлексов некоторых окислов аморфной фазы стеклокерамики и окисных соединений в спае

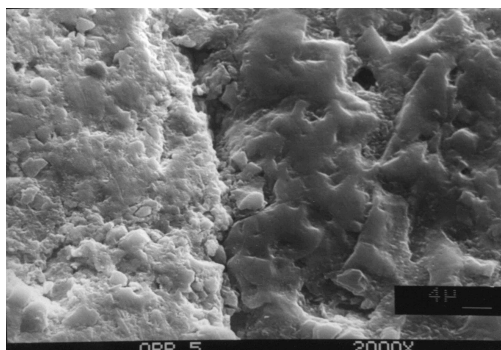


Рис. 1.20. Переходная зона на границе припой – стеклокерамика ($\times 1000$)

ГЛАВА 2

ПАЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАДИО- И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПАЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Современная радиоэлектронная аппаратура и приборы характеризуются широкой номенклатурой применяемых для их изготовления материалов. Каждую конструкцию РЭА или прибора можно рассматривать как состоящую из ряда структурных уровней, в пределах которых находят применение определенные типы соединений.

Высший конструктивный уровень аппаратуры — шкафы, стойки, приборы, блоки — характеризуется широким применением конструктивных неразъемных соединений, в том числе и паяных. Соединяемые пайкой на данном уровне материалы используются для изготовления различных конструктивных элементов устройств, экранов, кожухов, шасси, оснований и т. п. Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к конструктивным соединениям, заключаются в высокой прочности, герметичности, коррозионной стойкости и термостойкости. В номенклатуру применяемых конструкционных материалов входят в основном металлические материалы (металлы и их сплавы). Наряду с конструктивными неразъемными соединениями используются и монтажные соединения для межблочных коммуникаций.

Следующий, более низкий конструктивный уровень РЭА и приборов — субблоки, платы, кассеты — характеризуется исключительно большим объемом монтажных соединений, выполняемых в основном пайкой. На этом уровне удельный вес конструктивных соединений падает. Современная монтажная пайка отличается широким применением групповых методов, когда одновременно формируется большое число соединений с высокой плотностью монтажа, достигшей в настоящее время до 45 и более соединений на квадратный сантиметр (плата электронных часов). Монтажные соединения в первую очередь должны иметь хорошую электро- и теплопроводность, высокую надежность.

Элементная база радио- и приборостроения — электрорадиоэлементы (ЭРЭ), вакуумные и полупроводниковые приборы, интегральные (ИС) и большие интегральные (БИС) схемы, микросборки, элементы коммутации (разъемы, переключатели и др.) — также требует при своем изготовлении выполнения неразъемных соединений в виде пайки. Причем при изготовлении монолитных керамических и стеклокерамических конденсаторов, пьезоэлектрических преобразователей, варикондов, изделий из сегнетоэлектриков, электретов необходимо осуществлять процессы пайки неметаллических конструкционных материалов, таких, как керамика, стеклокерамика, ферриты, ситаллы и др. Значительная номенклатура применяемых конструкционных материалов, а также материалов для монтажной пайки, высокий удельный вес сборочно-монтажных работ (до 30%) в общем технологическом процессе изготовления современных радиоэлектронной аппаратуры и приборов вызывают необходимость классификации паяемых материалов по критерию их паяемости.

Возможность образования спая между паяемым материалом и припоем характеризуется **паяемостью**, т. е. способностью паяемого материала вступать в физико-химическое взаимодействие с расплавленным припоем и образовывать паяное соединение. Кроме физико-химических факторов, определяющих природу основного металла и припоя, необходимо учитывать способ и режим пайки, наличие флюсующих или восста-

новительных сред, условия подготовки поверхности основного металла под пайку и ряд других факторов.

Для образования спая необходимым условием является смачивание поверхности основного металла расплавом припоя, что в последующем определяет возможность образования между ними химических связей. Количественной характеристикой смачивания является краевой угол смачивания θ (рис. 2.1), определяемый из уравнения (1.2). Поскольку поверхностное натяжение $\sigma_{2,3}$ зависит от сил взаимодействия между припоем и основным материалом и состояния поверхности материала, то оно может изменяться в результате возникающей диффузии и образования интерметаллидов в процессе пайки. Поверхностные натяжения $\sigma_{1,3}$ и $\sigma_{1,2}$ в свою очередь зависят от наличия флюсующих или восстановительных сред, температуры, внешнего давления и других факторов. В зависимости от значений краевого угла смачивания различается и степень смачивания паяемых материалов (табл. 2.1) [53].

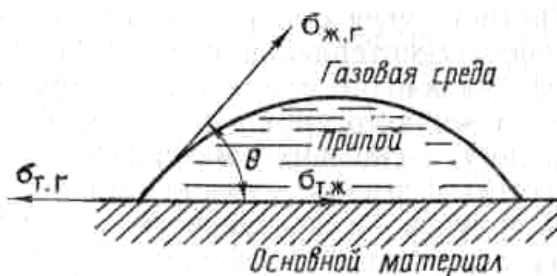


Рис. 2.1. Схема смачивания паяемого материала

Смачивание основного материала припоем сопровождается растеканием жидкого припоя, которое зависит от состояния поверхности основного материала (шероховатости, наличия покрытий) и жидкотекучести припоя. Количественно растекаемость припоев по поверхности паяемых материалов можно оценить с помощью коэффициента растекания K_p , который равен отношению площади, занятой припоем после растекания S_p , к площади, занимаемой дозой припоя в исходном состоянии до расплавления S_0 [53]:

$$K_p = S_p/S_0, (2.1)$$

Большее значение K_p соответствует лучшему растеканию припоя по паяемому материалу. По критерию паяемости все многообразие современных паяемых материалов различной физико-химической природы можно классифицировать в следующие основные группы: легкопаяемые, среднепаяемые, труднопаяемые и непаяемые (табл. 2.2).

Таблица 2.1. - Количественные и качественные характеристики смачивания

Контур капли	Краевой угол смачивания θ , град	Качество смачивания
	До 10	Отличное
	11—45	Хорошее
	46—90	Посредственное
	91—170	Плохое
	171—180	Отсутствует

Таблица 2.2. – Классификация материалов по паяемости

Группа материалов по паяемости	Материал	Угол смачивания θ , град	Коэффициент растекания K_p	Технологические условия	Литература
Легкопаяемые	Олово, индий, золото, серебро, палладий, медь	0—12	0,97—0,80	ПОС61, ФКСп при 493К	[53, 54]
Среднепаяемые	Бронза, латунь, никель, цинк, сталь	5—20	0,82—0,60	ПОС61, ЛТИ-120 при 493К	[21, 54]
Труднопаяемые	Нержавеющая сталь, магний, алюминий	20—40	0,60—0,50	ПСрМИн-63В, 10^{-2} Па при 1273К	[54, 87]
	Кремний, титан, молибден, тантал	20—60	0,55—0,50	ПСр72 10^{-2} Па при 1123К	[21, 31]
Непаяемые	Стеклокерамика, керамика, пьезокерамика, ферриты, полупроводники	120—160	—	ПОС61 10^{-2} Па при 538К	[36]

К легкопаяемым материалам относятся металлы, применяемые для монтажной пайки (медь, олово, серебро, золото и их сплавы), которые паяются с применением органических канифольных или бескислотных флюсов либо нейтральной газовой среды или вакуума.

Среднепаяемые материалы (никель, цинк, стали, сплавы меди с цинком или оловом) паяются только с применением активированных канифольных или кислотных флюсов либо восстановительной газовой среды.

Труднопаяемые материалы объединяют классы тугоплавких металлов (титан, молибден, вольфрам, тантал), а также легких (алюминий, магний и их сплавы). Наличие стойкой окисной пленки на поверхности этих металлов затрудняет выполнение обычных методов пайки и заставляет либо наносить предварительно покрытия из легкопаяемых металлов, либо применять специальные методы пайки (абразивная, ультразвуковая и т. д.). Пайка тугоплавких металлов, таких, как титан, молибден, тантал, возможна лишь в высоком вакууме (10^{-2} — 10^{-4} Па) либо путем нанесения на паяемые поверхности покрытий олова, серебра, меди [154].

К непаяемым материалам относятся неметаллические материалы (керамика, стеклокерамика, слюда, ферриты, ситаллы), которые обычными методами и с использованием стандартных припоев не соединяются пайкой.

Активация поверхности основного материала и припоя энергией ультразвуковых колебаний создает возможность для непосредственной пайки неметаллических материалов, при этом некоторые материалы могут быть переведены из четвертой группы в третью. С точки зрения технологии пайки активация энергией ультразвуковых колебаний может быть применена и к группе легкопаяемых и среднепаяемых материалов, особенно в тех случаях, когда рекомендуемые флюсы не удаляют окисную пленку, образовавшуюся в результате окислительных реакций или старения, либо когда требуется осуществить бесфлюсовую пайку при обычных условиях.

2.2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

В паяных конструкциях радио- и приборостроения широко применяют конструкционные металлические материалы (стали, никелевые и медные сплавы, легкие сплавы на основе алюминия, титана, магния, лития), сплавы тугоплавких металлов (молибдена, тантала, вольфрама, ниобия и др.).

Конструкционные металлические материалы нагреваются в процессе пайки до температуры, зависящей от температуры плавления применяемого припоя и технологических условий пайки. Основные физико-химические свойства некоторых конструкционных материалов приведены в табл. 2.3.

Наибольшее применение в качестве основного конструкционного материала нашли различные стали (рис. 2.2). В зависимости от химического состава, степени легирования, температуры и длительности нагрева, окружающей среды на поверхности сталей образуется один или несколько окислов различного состава и термической стойкости. Последовательность образования, состав и структура окислов на различных сталях определяются процессами взаимной диффузии кислорода из газовой среды и легирующих элементов из внутренних слоев стали к ее поверхности, а также их сродством к кислороду и структурной однородностью окислов типа Me_2O_8 (Me — Fe, Ni, Co), $Me'Me''_2O_3$ (Me' — Fe, Ni, Co, Me'' — e, Ni, Co, Cr, Ti, Al), MeO (Me — Fe, Ni, Co, Mn, Mg, Ti) [55].

Таблица 2.3 Паяемые конструкционные металлические материалы

Материал	Температура плавления, К	Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Предел прочности $\rho \cdot 10^8$, МПа	Твердость по Бринеллю НВ	Относительное удлинение, %
Бронза БрОЦ4-3	1163	8,43	3,4	170	52
Латунь ЛС59-1	1173	8,50	4,2	90	50
Никель	1728	8,90	4,0	70—90	40
Сталь углеродистая Ст.40	1403—1758	7,55	4,0	130—140	23
Ст.65	1403—1758	7,8	5,7	210—220	19
Сталь легированная 30ХГСА	1403—1758	7,85	10,7	229	10
50ХФА	1403—1758	7,9	12,7	400	8
Нержавеющая сталь 12Х18Н9Т	1673	8,0	4,9	—	—
Магниевый литейный сплав МЛ5	718	1,81	1,9	52	10
Магниевый деформируемый сплав МА8	755	1,74	2,8	55	10
Дуралюмин Д16	823	2,78	4,9	150	11
Силумин АЛ5	850	2,60	2,0	50	1
Титановый сплав ВТ5	1938	4,50	9,5	250	13
Хром	2163	7,2	9,4	—	—
Ниобий	2688	8,56	3,9	—	30
Молибден	2873	10,2	7,5	—	—
Титан	3269	16,6	4,1	—	25
Вольфрам	3683	19,3	7,8	320—415	2

Малоуглеродистые стали содержат углерода до 0,30%, марганца — 0,5—0,9, никеля — до 0,3, меди — до 0,3, серы и фосфора — не более 0,04%: каждого. Эти стали пластичны, допускают выравнивающие деформации, хорошо свариваются и паяются с использованием активных флюсов.

Среднеуглеродистые стали с содержанием углерода свыше 0,30% более твердые, малопластичные и могут быть легированы кремнием (0,15—1,6%), марганцем (0,15—2,3%), хромом (0,4—13%), вольфрамом (0,4—0,5%), ванадием (0,15—2,5%) и другими металлами. При нагреве легированных сталей наблюдаются полиморфные или аллотропические превращения, которые существенно изменяют физико-механические свойства материала. Так, например, при пайке стали в зависимости от температуры нагрева могут образовываться различные структуры (феррит, цементит, перлит, аустенит и т. д.). На поверх-

ности этих сталей образуются химически более стойкие окислы из-за растворенного в них хрома, титана. Молибдена и других легирующих элементов. При нагреве в вакууме на поверхности сталей образуются только окислы типа шпинели FeO , Me_2O_3 , а на воздухе два вида окислов Me_2O_3 , и $FeO \cdot Me_2O_3$ [55]. Пайка этих сталей требует активных флюсов, например содержащих хлористый цинк или ортофосфорную кислоту, что требует тщательной промывки соединений после пайки во избежание их коррозии.

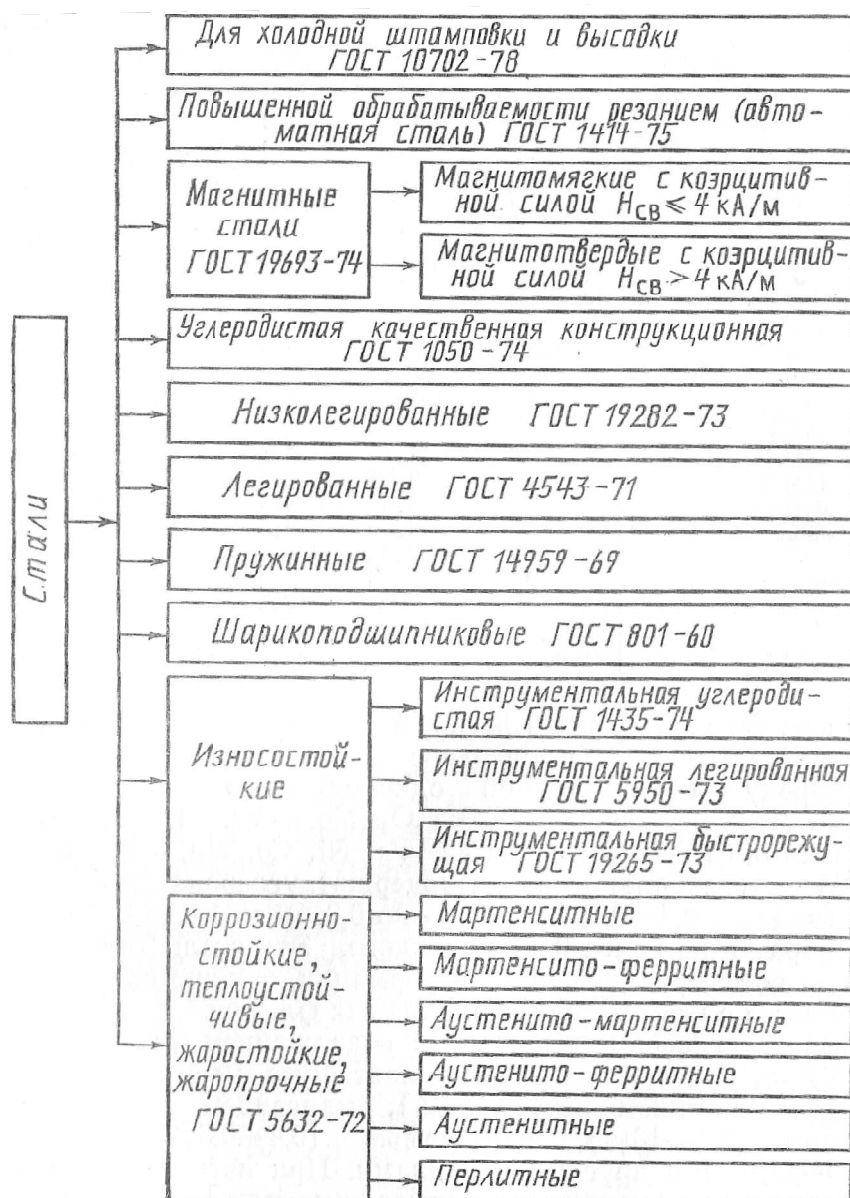


Рис. 2.2. Классификация сталей, применяемых в радио- и приборостроении

Пайка нержавеющей сталей в среде водорода или диссоциированного аммиака возможна лишь тогда, когда точка росы этих сред не выше — 213 К. Пайка в невысоком вакууме ($10-10^{-1}$ Па) требует предварительного гальванического покрытия паяемых поверхностей никелем или медью.

Сплавы меди с оловом, цинком и другими металлами (латуни, бронзы) находят применение в радиоаппаратуре и приборах в качестве корпусных и электроконтактных деталей. Особенностью пайки этих материалов является сравнительная легкость удаления

окисных пленок с их поверхности механическим путем, с помощью активированных флюсов, в невысоком вакууме или в нейтральной среде.

На латуни, содержащей до 15% цинка, окислы состоят из Cu_2O и ZnO , с увеличением содержания цинка преобладает окисел ZnO . На оловянных бронзах появляется двухслойная окалина, внутренний слой которой состоит из Sn_2O . На медных сплавах с алюминием, бериллием, кремнием образуются окисные пленки этих элементов, имеющие высокую химическую стойкость. Поэтому подготовка этих материалов к пайке требует особо тщательной обработки поверхности: зачистки и травления в смеси соляной и азотной кислот или во фтористоводородной кислоте. При наличии примесей кислорода (преимущественно в виде окислов) в меди и ее сплавах, нагреваемых в среде водорода, возникает водородная хрупкость, сопровождаемая образованием в металле воды и появлением пористости.

Свинцовые латуни, кремниевые и оловянные бронзы, никелевые сплавы склонны к красноломкости в процессе пайки, поэтому нагревать и охлаждать их рекомендуется медленно, не подвергая действию усилий или вибраций. Алюминиевые бронзы во избежание окисления и возможности образования хрупких интерметаллидов в паяном шве рекомендуется паять быстро, применяя высокоскоростные способы нагрева.

Из алюминиевых сплавов в качестве материалов конструкций приборов наибольшее распространение получили литейные и деформируемые. Наилучшими литейными свойствами обладают силумины, содержащие 10—13% кремния. Некоторые литейные алюминиевые сплавы могут применяться как жаропрочные при температурах 473—623 К.

К деформируемым алюминиевым сплавам относятся двухкомпонентные системы Al—Cu , Al—Mn , Al—Mg , Al—Ni , трехкомпонентные системы Al—Cu—Mg , Al—Mg—Si , Al—Si—Fe и др. Термически упрочняемые алюминиевые сплавы (дуралюмины) имеют наиболее высокую твердость и прочность после закалки и старения.

Состав и структура окисных пленок на алюминиевых сплавах зависят от химического состава сплава и температуры нагрева. Окисная пленка, образовавшаяся на воздухе при 293К, состоит из внутреннего аморфного окисла Al_2O_3 и наружного, более пористого и проницаемого. При температуре свыше 348К образуется кристаллическая окись алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, которая в свою очередь при 1473К превращается в окисел $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, имеющий гексагональную кристаллическую решетку. Ввиду высокой температуры плавления $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 2318К этот окисел практически не восстанавливается в газообразных средах и не испаряется при высокотемпературной пайке, устойчив к действию воды и кислот [56]. На сплавах Al—Mg с содержанием 2,8—8%: Mg при нагреве до 393К образуется окисел Al_2O_3 , свыше 393К — $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. При нагреве выше 673К появляется двухслойная окисная пленка: сверху окисел MgO , а под ним $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Высокая термическая и химическая стойкость окислов алюминия и трудность их восстановления, высокая теплопроводность и теплоемкость алюминия и его сплавов существенно усложняют их пайку. Из-за высокой склонности алюминиевых сплавов (например, силумины) растворять водород при их пайке происходит вспучивание поверхности вследствие выделения газов, растворенных в металле.

Бесфлюсовая пайка алюминия и его сплавов возможна при условии нарушения стойкости окисной пленки и ее отделения от металла в результате введения упругих механических колебаний ультразвуковой частоты, при этом осуществляются физический контакт паяемого металла с жидким припоем и, как следствие, смачивание паяемой поверхности.

Магниевого сплавы содержат в качестве легирующих добавок 3—10% Al, 0,3—2,5% Mn, 0,2—1,5% Zn, 0,05—1,1% Zr и другие элементы. Благодаря малой плотности они используются для изготовления корпусов приборов и аппаратов, однако требуют обязательной защиты от коррозии, например оксидирования. Недостатком магниевых сплавов следует считать их воспламеняемость, низкий модуль упругости. Трудность пайки магниевых сплавов определяется образованием на их поверхности окисной пленки

MgO, обладающей высокой термической и химической стойкостью и практически не восстанавливаемой ни в аргоне, ни в вакууме, ни в других газовых восстановительных средах.

При пайке сплавов Mg—Al—Zn с нагревом выше их солидуса возможно образование легкоплавких эвтектик и плавление металла по границам зерен, что в итоге приводит к охрупчиванию. Степень охрупчивания в основном определяется содержанием в сплаве алюминия, с увеличением которого возрастает количество интерметаллидных включений Mg_xAl_y , вокруг зерен твердого раствора, который образуется при оплавлении сплава и его псевдоэвтектической кристаллизации. Особенно опасно образование полностью замкнутой интерметаллидной сетки вокруг зерен твердого раствора. Затормозить образование интерметаллидов можно повышением скорости нагрева под пайку. Поэтому все магниевые сплавы следует паять при высоких скоростях нагрева, используя при этом магниевые припои. Пайку магниевых сплавов легкоплавкими припоями рекомендуется производить по предварительно нанесенному гальваническим методом слою меди, никеля или серебра. Удаление окислов с помощью ультразвука при пайке магниевых сплавов не дало должного эффекта.

Хром выгодно отличается от магниевых сплавов высокой коррозионной стойкостью не только на воздухе, но и в агрессивных газовых и жидких средах. Сопротивление его окислению заметно снижается только при температурах выше 1223К. Однако даже при этих температурах скорость окисления хрома остается примерно в 3—3,5 раза меньше скорости окисления никеля. Ухудшение коррозионной стойкости хрома при высоких температурах обусловлено повышением давления его паров. Это ухудшает сцепление окисной пленки с металлом, и она легко отслаивается при охлаждении. Высокая стойкость окисной пленки Cr_2O_3 на хrome затрудняет его пайку обычными способами. Со многими металлами хром образует интерметаллиды, что необходимо учитывать при выборе припоя. Поэтому пайку хрома ведут в вакууме 10^{-2} Па при нагреве не выше 1623К.

Титан и титановые сплавы характеризуются малой плотностью, высокой прочностью и коррозионной стойкостью ко многим агрессивным средам и поэтому широко используются в качестве конструкционных металлов в специальном приборостроении. В состав титановых сплавов наряду с титаном входит 0,2—7,5% алюминия, 0,2—2% магния, 0,9—5,5% ванадия, 0,5—5,5% молибдена, 0,5—2% хрома, 0,8—3,0% циркония, 0,15—0,4% кремния.

Особенность пайки титана и его сплавов обусловлена сравнительно плохой их смачиваемостью припоями и склонностью образовывать хрупкие интерметаллиды со многими металлами. Во избежание этого рекомендуется на паяемые изделия предварительно наносить барьерные покрытия металлами (медь, кобальт, никель, серебро) или их сплавами, которые не образуют хрупких интерметаллидных прослоек с титаном или образуют достаточно тонкие и не сплошные прослойки, существенно не ухудшающие прочности паяного шва.

Кроме того, при пайке титана и его сплавов с обычными и легированными сталями из-за разной степени их смачивания и растекания припоя по паяемым деталям и низкого поверхностного натяжения титана не образуется гладкая галтель паяного шва, а сам шов получается несплошным и некачественным. Для устранения этих недостатков необходимо стальные детали предварительно облудить тем же припоем, которым будет создаваться паяный шов. Предварительное нанесение гальванопокрытий из меди, никеля или кобальта улучшает смачивание паяемых компонентов и способствует образованию плавной галтели шва.

Если титан и его сплавы химически нейтральны до температуры 723К, то при нагреве выше нее они приобретают очень высокую химическую активность, поэтому их пайка среднеплавкими припоями возможна только при надежной защите от кислорода, азота и водорода. Хорошие результаты при пайке титановых сплавов в интервале температур 1053—1083 К получены при использовании припоя ПСр72 с предварительным на-

несением слоя серебра, или кобальт-никелевого сплава, или лужением в оловянной ванне. При нанесении покрытий никелем или медью получены хорошие результаты пайки при 1163—1223К [55].

Тугоплавкие металлы вольфрам, рений, молибден, тантал, гафний, ванадий и сплавы на их основе широко применяются в производстве электровакуумных приборов в качестве конструкционных и проводниковых материалов, так как они обладают высокой твердостью и прочностью, выдерживают высокие температуры. При пайке тугоплавких металлов необходимо учитывать следующие особенности. Вольфрам при нагреве на воздухе до 673К не окисляется, затем при увеличении нагрева на его поверхности начинают появляться окислы, и при температурах выше 773К. на поверхности образуется окисная пленка. Основным недостатком вольфрама — высокий температурный порог хладоломкости (573—773К) и пониженная прочность после рекристаллизации. Поэтому пайку его проводят при температурах не выше температуры рекристаллизации (1723К).

Молибден характеризуется высокой коррозионной стойкостью при повышенных температурах как на воздухе, так и в среде жидких металлов. Основным затруднением при пайке молибдена является его большое сродство к кислороду, а также склонность к росту зерна при высоких температурах. Пайку молибдена проводят в вакууме или среде аргона, тщательно очищенного от кислорода и паров воды, с применением высокой скорости нагрева.

Ниобий коррозионностоек до 473К, выше этих температур он начинает окисляться. Низшие окислы ниобия NbO и NbO_2 неустойчивы, самый устойчивый окисел Nb_2O_5 [54].

Тантал очень коррозионностоек, хорошо сопротивляется действию азотной, соляной кислот и до 423К устойчив против действия влажных и сухих галоидов. Почти такой же коррозионной стойкостью обладает ванадий. Однако при температурах нагрева выше 573К тантал и ванадий подвержены быстрому окислению: они взаимодействуют с кислородом, водородом, азотом и углеродом, образуя многовалентные окислы, нитриды, карбиды, которые концентрируются по границам зерен и, как следствие, приводят к охрупчиванию металла.

Гафний при нагреве на воздухе выше 623К окисляется, образуя двуокись HfO_2 . Глубина окисленной зоны при нагреве в течение 2 ч до 1223К составляет примерно 0,15 мм. С водородом гафний образует гидрид, являющийся хрупким соединением. Однако водород легко улетучивается из гафния при его вакуумном отжиге. При взаимодействии гафния в горячем состоянии с углеродом, азотом, кремнием, бором образуются тугоплавкие соединения — карбиды, нитриды, силициды, бориды. Высокотемпературная пайка гафния возможна в вакууме или в атмосфере гелия либо аргона с содержанием примеси соответственно не более 0,05 и 0,02 об. %.

Рений обладает высокой коррозионной стойкостью в галогеноводородных кислотах и особенно стоек в среде жидких щелочных металлов. Однако низкое сопротивление окислению — основной его недостаток. При нагреве на воздухе выше 433К рений окисляется, образуя окисел Re_2O_7 светло-желтого цвета. В вакууме окись рения устойчива до 673К, взаимодействуя с водородом при температурах 753—773К, она восстанавливается до металлического рения, при взаимодействии ее с водой образуется рениевая кислота. Загрязнение рения кислородом вызывает его межзеренное разрушение.

Пайку тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, ванадия, рения, гафния) при высоких температурах ведут только в вакууме, нейтральной или восстановительной атмосфере. Предпочтение отдается индукционной пайке в атмосфере аргона, водорода или азотно-водородной среде, причем ее следует производить быстро, что устраняет образование заметной хрупкой зоны. Пайку ниобия осуществляют только в вакууме или в среде сухого и чистого инертного газа, так как он при нагреве поглощает азот, водород, водяные пары, двуокись и окись углерода [54].

Возможна пайка тугоплавких металлов легкоплавкими и среднеплавкими припоями по предварительно нанесенным гальваническим покрытиям (никелированию, медне-

нию, серебрению). Пайку покрытых металлов можно вести известными способами с применением флюсов, в среде инертных газов или в вакууме.

2.3. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Металлы и сплавы специального назначения могут быть систематизированы в следующие основные группы: магнитные, проводниковые, высокого электросопротивления, прецизионные с особыми свойствами теплового расширения и упругости.

Магнитные сплавы подразделяются на магнитотвердые и магнитомягкие. Труднодеформируемые литые магнитотвердые сплавы типа альни (Fe—Al—Ni) применяются для изготовления магнитов, магнитных систем измерительных приборов, муфт, тахогенераторов и т. д. К деформируемым магнито-твердым сплавам относятся комоль, викаллой, кунико, кунифе, платиновые сплавы. Комоль Fe—Co—Mo применяется для изготовления магнитов простой и сложной формы, получение которых литьем невозможно, магнитных стрелок компасов, пружин измерительных приборов. Сплав хорошо обрабатывается давлением в горячем состоянии, а после смягчающей термообработки — резанием. Викаллой Fe—V—Co используется для изготовления гистерезисных двигателей, сплавы кунико Fe—Cu—Ni—Co и кунифе Cu—Ni—Fe применяются для изготовления устройств магнитной записи, платиновые сплавы систем Pt—Co и Pt—Fe — миниатюрных магнитов [57]. Викаллой, кунико и платиновые сплавы хорошо обрабатываются давлением и резанием.

При пайке магнитотвердых материалов скорость нагрева не должна быть большой, чтобы не допускать появления больших уровней напряжений первого рода, которые приводят к появлению микротрещин, но в то же время и не достаточно медленной, чтобы избежать появления хрупких интерметаллидов в паяном шве. Поэтому пайку целесообразно проводить в защитных газовых средах (аргон) или в вакууме при температурах ниже точки Кюри.

Магнитомягкие металлы и сплавы по области их использования делятся на материалы для аппаратуры сильного тока (машино- и аппаратостроение) и слабого (приборостроение, автоматика, средства связи). В технике сильного тока используется малоуглеродистая электротехническая сталь и технически чистое железо, слабого применяются материалы с высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях с малыми потерями в полях высокой и сверхвысокой частоты (преимущественно ферриты), постоянной магнитной проницаемостью, высокой индукцией насыщения, а также термомагнитные и магнитострикционные.

К сплавам с высокой проницаемостью в слабых магнитных полях относятся пермаллой и альсиферы. Эти сплавы применяются для изготовления магнитных экранов, особо чувствительных реле, высокочастотных и измерительных трансформаторов повышенных классов точности и др. Пермаллой Fe—Ni хорошо обрабатываются давлением и резанием. В силу высокой хрупкости альсиферов Al—Si изделия из них получают только литьем.

Высокой индукцией насыщения обладают сплавы железа с кобальтом, которые для улучшения технологических свойств часто легируют ванадием или хромом. Железкокобальтовый сплав 27КХ применяется для изготовления магнитопроводов с высокой плотностью потока, работающих в средних и сильных постоянных магнитных полях и подвергающихся механическим нагрузкам. Сплав 49К2Ф предназначен для изготовления магнитных экранов, магнитопроводов, полюсных наконечников, работающих в слабых и средних магнитных полях, не подвергающихся механическим нагрузкам [57].

К магнитострикционным металлам и сплавам относятся чистый никель, железоплатиновый сплав 46% Fe, 54% Pt и получивший наиболее широкое применение пермендюр К49Ф2.

Термомагнитными называются магнитомягкие материалы, обладающие большой зависимостью магнитной проницаемости от температуры. Основная область их примене-

ния — термокомпенсаторы измерительных приборов. К термомагнитным относятся сплавы НЗЗЮ1 (пермаллой), НЗ8Х14 (компенсатор), НЗ2Х6Ю и ЭП279, содержащий 10—12% Cr, 35—37% Ni, остальное Fe.

При пайке магнитомягких и магнитоотрицательных материалов следует учитывать возможность образования окислов при нагреве под пайку и характер взаимодействия жидкого припоя с паяемым материалом, которые в основном определяют физико-химические свойства паяного соединения и его механическую надежность и прочность. Кроме того, необходимо температуру плавления припоя выбирать ниже температуры полиморфных стабильных и метастабильных превращений, свойственных некоторым из паяемых материалов.

К металлам высокой проводимости, широко применяемым в радио- и приборостроении, относятся медь и алюминий. Проводимость меди лишь на 10% ниже, чем у серебра. Для электротехнических целей применяется наиболее чистая медь марок М0 (99,95% Cu) и М1 (99,9% Cu). Проводимость отожженного алюминия составляет 62,5% от проводимости меди. Однако на единицу массы алюминий имеет проводимость вдвое большую, чем медь. По степени чистоты алюминий подразделяется на три группы: особой чистоты марки А999, высокой чистоты А995, А99 и А95 и технической чистоты А85, А8, А7Е и А7, А6, А5 и А5Е. Медь и алюминий используются для изготовления проволоки, ленты, листа, шин, фольги, применяемых в производстве радиоэлектронной аппаратуры и приборов.

Особенности пайки меди и ее сплавов заключаются в следующем: 1) химическая и термическая стойкость окислов, образующихся на поверхности, обуславливает процессы диссоциации, растворения или восстановления окислов при нагревании; 2) высокая теплопроводность меди и сплавов и содержание в них легкоиспаряющихся компонентов (кадмия, цинка, марганца); 3) склонность меди и ее сплавов к красноломкости и растворению в жидких припоях; 4) повышенная способность меди образовывать хрупкие интерметаллиды с другими химическими элементами.

На меди могут образовываться окислы Cu_2O и CuO . При высоком ее нагреве образуется двухслойный окисел, состоящий из верхнего наиболее толстого слоя CuO и нижнего сравнительно тонкого Cu_2O .

Сплавы высокого электрического сопротивления делятся на резистивные, используемые для изготовления резисторов, потенциометров и т. д., жаростойкие для нагревательных элементов приборов и печей, термоэлектрические сплавы.

К прецизионным сплавам высокого электрического сопротивления относятся сплавы на медной основе манганин МНМцЗ-12, МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3, константан МНМц40-1,5, на никелевой — Н80ХЮД, Н60ГХ и Н63ГХ. В особо ответственных случаях для изготовления высокоточных образцовых прецизионных резисторов применяют сплавы на основе благородных металлов (золота, платины и палладия). Для обычных резисторов применяют медно-никелевые сплавы: мельхиор МН19, нейзильбер МНМц15-20 и сплав МН16 [58].

Жаростойкие сплавы, предназначенные для работы при 673—773К, изготавливают на медно-никелевой основе (типа константан); при 1173—1573К — на никелевой (сплавы никеля с хромом — нихромы) и на железной основе (сплавы железа с хромом — фехраль — хромель). К термоэлектродным сплавам, применяемым для изготовления термопар, относятся алюмель НМцАК2-2-1, хромель ТНХ9,5, сплав ТПМНОД копель МНМц43-0,5.

Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения делятся на три группы:

1) сплавы с минимальным коэффициентом теплового расширения (практически равным нулю) в интервале температур 213—373К: в эту группу входят железоникелевые сплавы (типа инвар) с незначительными добавками кобальта, меди или титана следующих марок: 36Н, 35НКТ, 32НК-ВИ, 39Н, 36НХ и др., из которых изготавливают ответственные

детали высокоточных приборов, требующих стабильности размеров в интервале климатических изменений температуры;

2) сплавы с фиксированными коэффициентами теплового расширения в интервале температур 203—723К и выше, соответствующими коэффициентами теплового расширения соединяемых с ними таких материалов, как стекло, керамика, слюда и т. д.; в эту группу входят железоникелевые сплавы типа ковар с повышенными добавками кобальта, меди, хрома или без них марок 29НК, 30НКД, 33НК, 48НХ, 47НХ, 47НД, 47НХР, 46Н, 18ХТФ и др.;

3) сплавы с заданными коэффициентами теплового расширения, стабильными в определенном интервале рабочих температур; из этих сплавов изготавливают такие детали приборов, которые должны быть чувствительными к изменению температуры окружающей среды; эта группа включает железоникелевые сплавы, легированные медью, титаном, кобальтом, хромом, ванадием марок 36Н, 32НКД, 35НКТ и др.

Прецизионные сплавы с особыми упругими свойствами, модулем упругости, не изменяющимся при изменении температуры, предназначены для изготовления упругих элементов различных особо точных приборов. К ним относятся сплавы на основе железа или никеля с добавками хрома, алюминия, титана, бериллия, марганца, молибдена, вольфрама марок 42НХТЮ, 44НХТЮ, 97НЛ, 41НХТА, 35НХМВ, 36НХТЮМ8, 40КНХМВТЮ и др.

Термобиметаллы состоят из двух либо нескольких слоев металлов или сплавов с различными коэффициентами теплового расширения и применяются для изготовления деталей приборов, фиксирующих изменение температуры окружающей среды. В эту группу входят чистый никель и сплавы на основе железа или никеля, легированных хромом, медью, марганцем, кремнием.

При пайке с нагревом до 773К на сплавах на основе Ni и Cr образуется окисел NiO. Однако большинство никелевых сплавов предназначено для работы при высоких температурах, при которых в зависимости от легирующих добавок Cr, Al, Ti могут образовываться окислы трех типов:

1) Me_2O_3 (изоморфных Cr_2O_3), где $Me—Cr, Fe, Mn, Ni, Al$;

2) $MeTiO_3$ (изоморфных $MeTiO_3$), где $Me—Fe, Ni$;

3) шпинели типа NiO, Me_2O_3 . Структуры Me_2O_3 и $MeTiO_3$ изоморфны [55]. На чистом никеле при всех температурах нагрева в окислительной среде образуется только окисел NiO. Так как система Ni—Si обладает неограниченной растворимостью, при пайке никелевых сплавов медью или припоями на основе меди следует учитывать, что паяемый материал интенсивно растворяется в жидком припое. Это же касается припоев, легированных бериллием и бором.

Пайку сплавов, содержащих никель, следует вести при быстром нагреве, не допуская перегрева основного металла. Так как в ряде случаев обеспечить тщательное соблюдение температурного и временного режимов невозможно, для пайки никелевых сплавов следует применять никелевые припои. Никелевые сплавы подвергаются особо интенсивной эрозии в контакте с жидкими борсодержащими припоями. Поэтому паять изделия из никелевых сплавов такими припоями не рекомендуется.

Сплавы на основе никеля перед пайкой должны тщательно очищаться от остатков масел, красок, смазок и других серосодержащих веществ, так как при взаимодействии серы и никеля образуется легкоплавкая эвтектика, располагающаяся по границам зерен металла и приводящая к его охрупчиванию. Такое же действие на никель оказывают мышьяк, свинец, висмут и другие легкоплавкие металлы. Никелевые сплавы склонны к охрупчиванию при контакте с жидкими припоями, содержащими серебро, кадмий и цинк.

Благородные металлы и сплавы на их основе в радио- и приборостроении используются как проводниковые материалы, а также для нанесения гальванопокрытий на различные детали. Серебро, золото, платина, палладий обладают высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Родий, иридий, рутений и осмий наиболее тугоплавки по срав-

нению с другими благородными металлами, тверды и хрупки, поэтому плохо обрабатываются давлением и резанием.

Серебро не образует соединений ни с азотом, ни с углеродом. Сухой сернистый газ не действует на серебро, однако в присутствии кислорода и влаги оно взаимодействует с сероводородом, содержащемся в воздухе. Серебро, золото, платина и родий хорошо паяются легкоплавкими и среднеплавкими припоями. Палладий стоек к образованию сульфидных пленок, однако способен интенсивно поглощать углерод и водород. Поэтому его не паяют в присутствии углерода или водорода. Иридий стоек к атмосферной коррозии, но окисляется при нагреве, поэтому его пайку целесообразно проводить в вакууме или в атмосфере инертных газов. Рутений и осмий склонны к окислению при нагреве, поэтому их пайку осуществляют в вакууме.

2.4. МАТЕРИАЛЫ НА МИНЕРАЛЬНОЙ ОСНОВЕ

В радио- и приборостроении широко применяются как естественные природные минералы (слюда, графит, асбест и др.), так и продукты их переработки (керамика, стекло, ситаллы и микалекс и др.). Сочетание у слюды высокой тепловой и химической стойкости с электро- и теплоизолирующими свойствами делает ее незаменимым материалом для изготовления многих деталей современных приборов и радиотехнических устройств. Различают следующие разновидности слюды (табл. 2.4): мусковит (алюминиевая), флогопит (магнезиально-железистая), вермикулит (магнезиально-железисто-алюминиевая) и фторфлогопит (синтетическая) [57].

Конденсаторная слюда — мусковит марок СО (образцовая), СФ (фильтрованная), СНЧ (низкочастотная), СВЧ (высокочастотная) используется для изготовления слюдяных конденсаторов. Флогопит и мусковит марки СЗ (защитная) применяются для изготовления тепло- и электроизоляционных прокладок.

Таблица 2.4 - Основные свойства слюды

Параметр	Мусковит	Флогопит	Вермикулит	Фторфлогопит
Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	2,8	2,2	2,6	2,8
Температурный предел работоспособности, К	923	1173	473	1323
Диэлектрическая проницаемость ϵ	6-7	5—6	-	7,5
Удельное объемное электросопротивление, Ом·м	10^{13} - 10^{14}	10^{11} - 10^{12}	-	1015
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц $\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$	2-3	10-50	-	1
Пробивная напряженность, МВ/мм	120	120	-	200

Стекла представляют собой прозрачные изотропные тела, полученные переохладением расплава различных веществ независимо от их химического состава и температуры затвердевания. У стекол нет температуры плавления. Ниже температуры стеклования (затвердевания) стеклам присущи такие механические свойства, как твердость и хрупкость, а выше этой температуры они переходят в пластичное состояние и способны к неупругим деформациям. Техническое стекло подразделяется на оптическое, светотехниче-

ское, химико-лабораторное, медицинское, электротехническое, автотранспортное, приборное, защитное, электро-, тепло- и звукоизоляционное, сцинтилляционное и люминесцентное. В зависимости от исходного сырья и химического состава стекло бывает следующих видов: силикатное — на основе двуокиси кремния; алюмосиликатное — на основе окиси алюминия и двуокиси кремния; боросиликатное — на основе борного ангидрида и двуокиси кремния; бороалюмосиликатное, алюмофосфатное, силикоти-тановое и силикоцирконатное [59].

Оптическое стекло представляет собой наиболее чистое, практически однокомпонентное, кварцевое стекло, полученное плавлением природного кварца в виде горного хрусталя, жильного кварца или кварцевого песка. В зависимости от основной области спектрального пропускания (прозрачности) различается шесть марок оптического стекла: КУ-1 для ультрафиолетовой области спектра, нелюминесцирующее; КУ-2 для ультрафиолетовой области спектра; КВ для видимой области спектра; КВ-Р для видимой области спектра, устойчивое к гамма-радиации; КИ для инфракрасной области спектра.

В радио- и приборостроении широкое применение находят также стекла с особыми свойствами: 1) термометрические, предназначенные для изготовления термометров или деталей других приборов, работающих в диапазоне температур 73—923 К; 2) рентгеновские защитные, характеризующиеся свинцовым эквивалентом, т. е. толщиной свинца (в мм), ослабляющей рентгеновское излучение в такое же число раз, как и защитное рентгеновское стекло установленной стандартом толщины; 3) электропроводящие (полупроводниковые), в состав которых входят элементы или окислы, придающие стеклу электропроводность, например сульфиды, селениды, теллуриды, а также мышьяк, висмут и другие элементы; такие стекла широко применяются при изготовлении термисторов, светофильтров и фотосопротивлений; 4) стекла с электропроводящей поверхностью за счет нанесения тонкого слоя окислов олова, титана, индия, кадмия или за счет восстановления поверхностного слоя специального стекла, которые вследствие незначительной толщины практически не изменяют оптических свойств стекла; такие стекла применяются для изготовления индикаторных устройств на жидких кристаллах, в полупроводниковых, электронно-вакуумных и нагревательных приборах, для изготовления незапотевших стекол и зеркал, отопительных панелей и т. д.

Ситаллы представляют собой продукты рекристаллизации стекол с равномерно распределенными по объему мелкими кристаллами величиной 0,01—1 мкм, с плотной упаковкой, исключаящую какую-либо пористость материала (табл. 2.5) [60]. Ситаллы выдерживают в воздушной среде колебания температуры от 213 до 1173 К. По электрической прочности ситаллы не уступают керамике, а по механической в 2—3 раза прочнее стекла. При определенных температурах и состоянии ситаллы хорошо обрабатываются давлением (прессование, вытяжка, прокатка и т. д.), обладают хорошими литейными свойствами. По химическому составу ситаллы делятся на следующие группы: СТЛ — сподуменовые, СТМ — кордиеритовые, СТБ — борно-бариевые и борно-свинцовые, высококремнистые и фотоситаллы. В радио- и приборостроении ситаллы применяются для изготовления подложек интегральных схем, электро- и теплоизоляторов.

Керамика представляет собой композиционный материал, полученный спеканием различных мелкодисперсных минералов, окислов и других неорганических составляющих. Для керамики характерны высокая механическая и электрическая прочность, твердость, износостойкость, тепловая и химическая стойкость. Ввиду высокой твердости и хрупкости керамические материалы слабо поддаются различным видам обработки, поэтому их выпускают в виде готовых изделий.

Таблица 2.5. - Свойства основных марок ситаллов

Параметр	Марка ситаллов						
	C-15-12 (СТЛ-1)	CO-21 (СТЛ-2)	CO-15 (СТЛ-3)	AC-05- ТЦ-370 (СТМ-1)	CT-50-1 (СТТМ-2)	T-IV-23 (СТБ-1)	AC-05- 336 (СТ5-2)
Плотность, кг/м ³	2535	2525	2457	2839	2702	2493	2528
Предел прочности при изгибе, МПа	-	74	-	100	80	70	100
Предел прочности при сжатию, ГПа	0,88	0,58	0,56	0,43	0,77	0,45	0,69
Микротвердость, ГПа	7,74	7,65	7,26	9,67	7,05	5,99	5,83
Теплопроводность, Вт/(м*град)	1,26	0,78	1,19	2,13	0,98	0,97	1,03
Термостойкость, К	1173	878	818	-	583	1023	-
Электрическая прочность, МВ/м	70,7	-	-	47,2	27,9	73,5	65,9

Структурный состав керамики включает кристаллическую и аморфную фазы, поры. Кристаллическая фаза представляет собой ионные кристаллы с поперечником 20—30 мкм и более, которые в зависимости от исходного состава могут быть окислами, твердыми растворами или соединениями окислов. Аморфная фаза представляет собой стекло на основе окислов щелочных и щелочноземельных металлов. Пористость керамики зависит от технологии производства и не превышает нескольких процентов.

Прочность керамики определяется ее составом, структурой и пористостью: чем меньше кристаллы, чем меньше содержится стекла и пор, тем выше прочность. Прочность увеличивается на 15—20% при глазуровке изделия, однако глазурь увеличивает электрические потери.

Электрические свойства керамики зависят от подвижности ионов примесей, особенно щелочных металлов, введение которых значительно увеличивает $\text{tg } \square$. По электрическим свойствам керамику подразделяют на низкочастотную и высокочастотную установочную, конденсаторную и пьезоэлектрическую (табл. 2.6).

Таблица 2.6. – Свойства керамики [61]

Тип керамики	Основные виды кристаллов	ϵ	$\text{TK}\epsilon \cdot 10^6$, К	$\text{tg } \square \cdot 10^4$	ρ_v при 373 К, Ом*м	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм	$\sigma_{\text{в изг}} \cdot 10^8$, Па	$\alpha_l \cdot 10^6$, К
<i>Установочная</i>								
Низкочастотная: электрофорфор	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; SiO_2	6,5	-	200	10^{11}	25	80	5,0
Высокочастотная: радиофорфор	То же	6,5	+150	40	10^8	23	79	5,0
корундомуллитовая	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$;							
КМ-1	Al_2O_3	7	+110	15	10^9	30	160	3,5
ультрафорфор	То же	8,5	+110	10	10^{10}	20	250	5,3
алюмооксид	Al_2O_3	9,5	-	2	10^{13}	15	300	-
стеатит	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	6,5		9	10^9	20	140	6,0
цельзиан	$\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot$ 2SiO_2	7,5	+60	3	10^{10}	35	90	2,2

Конденсаторная								
Низкочастотная: Сегнетокерамика СМІ	Твердые растворы на основе BaTiO ₃ с добавками Zr и Bi	3000	+3000	300	10 ⁷	4	60	-
Сегнетокерамика Т-7500	Cf и Sr	7500	+3000	300	10 ⁷	2.5	30	-
Сегнетокерамика ВК-1	Sn	20000- 100000	-	1800	10 ⁶	2.5	30	-
Пьезокерамика Т-1700	BaTiO ₃	1700	-	300	10 ⁶	2.5	60	-
Высокочастотная: Тиконды Т-150	CaTiO ₃	150	-1300	3	10 ⁸	10	120	7.5
Т-80	TiO ₂	80	-700	4	10 ⁷	10	120	8.0
Термотиконды Т-20	ZrTiO ₃	20	-70	3	10 ⁸	8	80	5.5
Станнатная кера- мика С-15	Станнаты Ca-Mg	15	+30	3	10 ⁸	10	80	8.0

Для изоляторов, используемых в цепях постоянного и переменного токов частотой до 20 кГц, широко используется ультрафарфор, который сравнительно дешев и имеет неплохие электрические свойства. Однако установочная керамика имеет низкую механическую прочность, при нагреве свыше 373 К увеличиваются потери. Высокочастотная керамика на основе стеатита содержит 65—70%; клиноэнстатита MgO-SiO₂ и алюмосиликатное стекло. Высокочастотная керамика на основе рутила TiO₂ подразделяется на тиконды (Т-60, Т-80, Т-150) и термотиконды (Т-20, Т-40). Термотиконды наряду с TiO₂ содержат ZrTiO₃ и другие добавки.

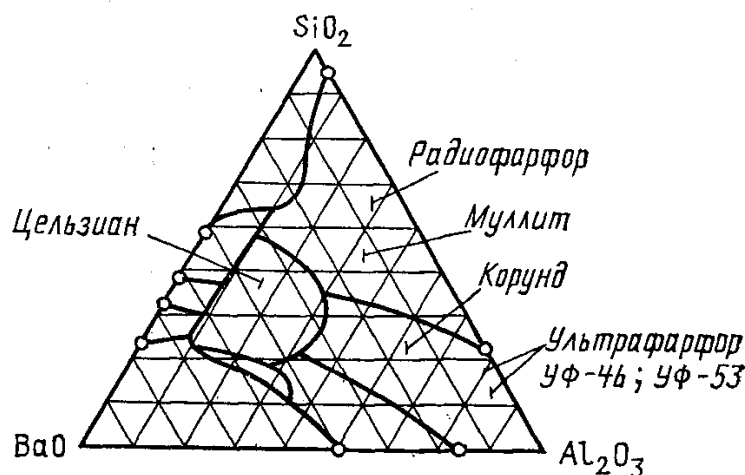


Рис.2.3. Диаграмма состояния керамики системы BaO – Al₂O₃ – SiO₂

Для изготовления подложек интегральных схем, деталей генераторных приборов и изоляторов широко применяется керамика на основе окиси алюминия марки «Поликор» и бериллиевая керамика. Теплопроводность последней в 200— 250 раз больше, чем у стекла, что чрезвычайно важно для интегральных схем, генераторных и других приборов с интенсивным тепловыделением.

Сугубо кристаллическое строение свойственно металлам, минералам и лишь частично керамике. На рис. 2.3, 2.4 приведены диаграммы состояния систем BaO – Al₂O₃— SiO₂ и MgO—Al₂O₃—SiO₂, на которых изображены основные кристаллические фазы структур отдельных марок керамики и фигуральные точки материалов, соответствующие

этим фазам. Такие кристаллические фазы, как корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, форстерит 2MgSiO_2 , анортит $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, воллстонит $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, циркон $\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$, соответствуют кристаллическим формам природных минералов, другие же фазы получают синтезированием или разложением компонентов смеси. К ним относятся муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$, цельзиан $\text{BaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, клиноэнстатит $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, периклаз MgO , шпинель магнезиальная $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ [62].

В зависимости от назначения пьезокерамические материалы для пьезоэлементов делятся на следующие классы: 1) высокой чувствительности, работающие в режиме приема или излучения (ТБ-1, ЦТС-19, ЦТБС-1); 2) для работы в режиме приема и излучения в условиях воздействия сильных электрических полей и механических напряжений (ТБК-3, ЦТС-23, ЦТС-24, НБС-1, ЦТСС-1); 3) с повышенной стабильностью частотных характеристик в определенном интервале температур и во времени (ТБКС, ЦТС-22, НБС-3); 4) высокотемпературные для работы при температурах 523 К и выше и обладающие повышенной стабильностью пьезоэлектрических характеристик в определенном интервале температур и механических напряжений (ЦТС-21) [63].

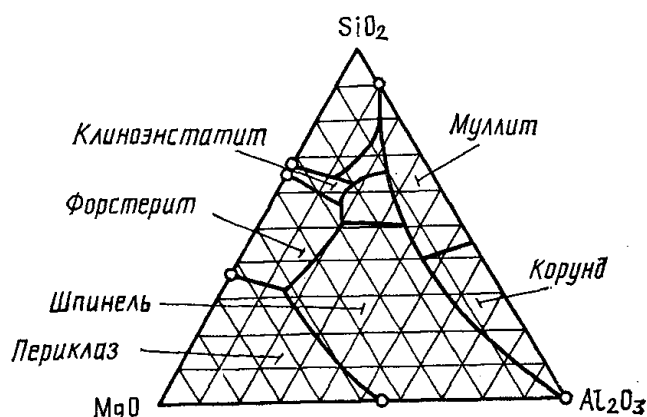


Рис. 2.4. Диаграмма состояния керамики системы $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Материалы системы ЦТС обладают высокими диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами, имеют более высокую рабочую температуру (до 573 К) по сравнению с материалами других систем. В последние годы получено большое количество твердых растворов системы ЦТС, модифицированных стронцием, ниобием, хромом, кобальтом, барием, натрием, висмутом, магнием и другими элементами. Модификацией материалов системы ЦТС удалось получить составы с высокой температурной стабильностью частоты, устойчивостью к динамическим воздействиям, высокой чувствительностью.

В процессе изготовления пьезокерамических элементов на их внешние поверхности наносят электроды, которые служат для подвода напряжения поляризации, а также для подключения элемента в электрические цепи и его крепления в процессе эксплуатации. Известные методы нанесения электродов на пьезокерамику (никелирование, палладирование, индирование и серебрение) требуют расхода драгоценных или дефицитных металлов и, кроме того, трудоемки и длительны. Так, никелирование и палладирование сопровождаются предварительным химическим меднением, а скорость осаждения покрытий электрохимическим путем не превышает 10—12 мкм/ч. Индирование керамики осуществляется методами вакуумной металлизации, что требует сложного вакуумного оборудования и приводит к значительным потерям металла за счет осаждения его паров на оснастке.

Серебрение пьезокерамики выполняют в большинстве случаев вжиганием серебра в керамику. Слой серебра, нанесенный вжиганием, не обладает полной объемной про-

димостью металлического серебра, так как представляет собой сплав, насыщенный керамической компонентой и вдобавок имеет пористую структуру. Прочность сцепления покрытий, нанесенных как электрохимическими методами, так и вжиганием паст, невысокая и не превышает 10 мН/м^2 . Кроме того, возникают большие затруднения при пайке выводов к электродам из никеля, палладия или серебра, что заставляет применять в одних случаях активные флюсы, в других — серебрясодержащие припои.

С целью замены драгоценных металлов более дешевыми и широко распространенными, увеличения надежности и повышения производительности технологических процессов изготовления пьезокерамических элементов целесообразно применение ультразвуковой металлизации для нанесения электродов. Однако процессы металлизации монолитной пьезокерамики, не имеющей развитого микрорельефа поверхности, недостаточно исследованы.

Для эксплуатации в различных приборах и устройствах пьезокерамические преобразователи предварительно собираются в пакеты. Традиционный способ сборки пьезокерамических преобразователей в пакет путем втягивания пластин одним центральным болтом, проходящим через отверстия в пластинах, не создает достаточно большой площади контакта из-за неизбежных макро- и микронеровностей контактирующих поверхностей, что снижает электрический к. п. д. собранного пакета. Сборка пакета с помощью токопроводящего клея, состоящего из эпоксидной смолы и металлического наполнителя, не обеспечивает достаточно жесткого акустического контакта, что ухудшает акустическую добротность собранного пакета пьезокерамических преобразователей. Весьма перспективна сборка платин в пакет методом пайки, при которой создается монолитная конструкция пакета с жестким акустическим контактом между всеми элементами.

Из других сегнетокерамических материалов широкое применение в различных областях радиоэлектроники, электротехники, автоматики, техники СВЧ, квантовой электроники нашли материалы с резко выраженными нелинейными зависимостями поляризации и диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля, которые применяются для изготовления варикондов. В настоящее время для изготовления варикондов используют семь видов нелинейной сегнетокерамики ВК-1, ВК-2, ..., ВК-7, отличающиеся различными величинами диэлектрической проницаемости и поляризации, степенью нелинейности, точкой Кюри и другими параметрами.

Металлизация поверхности пластины варикондов также осуществляется традиционными методами вжигания паст, главным образом серебрясодержащих. Поэтому, так же как и для пьезокерамических изделий, для варикондов характерна трудоемкая технология металлизации пластин, большой расход серебра и трудность подпайки выводов к электродам.

Неметаллические магнитные материалы делятся в основном на два класса: ферриты и магнитодиэлектрики. Ферриты представляют собой материалы, состоящие из мелких порошков окислов железа Fe_2O_3 и окислов двухвалентных металлов марганца, магния, цинка, никеля, стронция, кобальта, бария и получаемые методами керамической технологии. Ферриты и магнитодиэлектрики широко применяются в специальных приборах, в ЭВМ, в средствах связи в электро- и радиотехнике. Ферриты можно систематизировать в следующие шесть групп: 1) магнитомягкие системы Mn—Zn для средних частот; 2) магнитомягкие системы Ni—Zn для высоких частот; 3) системы $\text{MgO} \cdot 3\text{MnO} \cdot 3\text{Fe}_2\text{O}_3$ с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ); 4) сверхвысокочастотные системы NiO—CuO , NiO—CuO—MnO , NiO—CuO—CoO ; 5) магнестрикционные; 6) магнитотвердые системы $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CoO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Ферриты имеют различные свойства в зависимости от структуры входящих компонентов. Общим для них является очень высокое удельное электросопротивление (достигающее $10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), пропускание магнитной волны без значительного поглощения, простота технологии изготовления. Однако низкая температура Кюри и плохая темпера-

турная стабильность, низкая индукция насыщения, высокая твердость и хрупкость затрудняют механическую обработку.

Керметы и тугоплавкая металлокерамика характеризуются высокими термохимическими и механическими свойствами при высоких температурах (кермет, состоящий из 70% Cr и 30% Al_2O_3 имеет предел прочности при растяжении 1200 МПа при 1253 К). В состав керметов входят карбиды, бориды, нитриды, силициды, окислы, а также чистые металлы. Первые придают керметам жаростойкость, а вторые — жаропрочность. Наиболее качественными являются керметы, включающие металлы, окислы которых по форме и параметрам кристаллической решетки родственны окислам или другим соединениям керамического компонента (например, $Al_2O_3 - Cr$, $MgO - Ni$, $Al_2O_3 - Ti$). В электронике получили распространение микрокерметы, характеризующиеся более измельченной структурой, чем обычные керметы, и поэтому применяемые для изготовления непровольных резисторов методами эпитаксильной технологии [65].

Поликор, сапфир, керамика смачиваются титансодержащими припоями. Установлено, что с увеличением концентрации титана до 6—8 ат.% их смачиваемость жидкими припоями увеличивается, причем более высокая смачиваемость отмечена для расплава $Cu - Ti$ по сравнению с расплавом $Au - Ti$, что объясняется более высокой термодинамической активностью титана в расплавах на основе меди по сравнению с расплавами на основе золота и никеля [66].

Графит и алмаз смачиваются припоями систем $Cu - Cr$, $Cu - Ti$, $Cu - Ni$, $Cu - Si$. Хотя сродство титана с углеродом выше, чем сродство хрома с углеродом, однако смачивающая способность хромсодержащих припоев выше, чем у титансодержащих. Это объясняется более высокой термодинамической активностью хрома по сравнению с титаном в расплаве меди [67].

Смачиваемость алмаза и графита припоями, содержащими кремний, увеличивается с увеличением концентрации кремния до 60 ат.% и более. Это обусловлено высокой термодинамической активностью кремния в расплавах с большим содержанием кремния и, наоборот, при низких концентрациях кремния (до 30 ат.%) его низкой термодинамической активностью из-за наличия в нем устойчивых микрогруппировок (комплексов), отвечающих по составу соединению Ni_2Si и свидетельствующих о сильном взаимодействии между атомами никеля и кремния в жидком припое [68]. Установлено, что в ряду припоев $Au - Mn$, $Ge - Mn$, $Sn - Mn$, $Cu - Mn$, $Ag - Mn$ краевой угол смачивания графита и алмаза уменьшается. Для обеспечения в этом ряду припоев одинаковой степени смачивания графита и алмаза концентрацию марганца следует уменьшать от золота к серебру. Так, например, для достижения угла смачивания 50° содержание марганца в припоях на основе золота, германия, олова, меди и серебра соответственно составляет 70 – 65; 65; 45; 35 и 25 ат.% [69].

Исследования процессов смачивания полупроводников (кремния, германия) и тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама и др.) припоями $Pb - Ni$, $Pb - Sn - Ni$ в атмосфере водорода показали, что с увеличением концентрации олова в припое $Pb - Sn - Ni$ смачивание указанных материалов ухудшается. Это обусловлено снижением термодинамической активности никеля в расплаве $Pb - Sn$. Введение в припой $Pb - Ni$ добавки серебра улучшает смачивание полупроводников и тугоплавких металлов, так как серебро повышает термодинамическую активность никеля, образуя с ним монотектику. Таким образом, адгезионно-активная добавка должна обладать максимальной смачивающей способностью тогда, когда она образует с неактивным металлом основы монотектическую или простую систему, и минимальной смачивающей способностью в случае наличия в системе «неактивная основа — адгезионно-активная добавка» соединений, устойчивых в жидкой фазе [69].

2.5. СИНТЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Синтетические алмазы и металлоподобные соединения тугоплавких металлов с углеродом (карбиды), бором (бориды) и азотом (нитриды) характеризуются высокой термостойкостью, твердостью и устойчивостью к агрессивным средам. Самым тугоплавким из всех известных материалов является сплав карбида гафния (20%) и карбида тантала (80%). Температура его плавления 4488 К [70].

Промышленность выпускает поликристаллические синтетические алмазы (АСО, АСР, АСВ, АСК, АСКС, АСМ, АСН), из которых изготавливают резцы для алмазной обработки, инденторы для приборов измерения твердости, волоочильный инструмент, алмазные иглы, стеклорезы, наконечники для алмазного выглаживания и резцы для правки шлифовальных кругов (табл. 2.7).

Синтетические алмазы марки АСО имеют зерна с наиболее развитой режущей поверхностью и повышенной хрупкостью, используются они для изготовления инструментов на органических связках. Алмазы марки АСР характеризуются меньшей хрупкостью и большей прочностью по сравнению с алмазами марки АСО, они используются для изготовления инструментов на керамических и металлических связках. Алмазы марки АСВ имеют меньшую хрупкость и большую прочность, чем марки АСО, АСР, их рекомендуют для изготовления инструментов на металлической связке, работающих при повышенных удельных нагрузках. Алмазы марки АСК имеют еще меньшую хрупкость и большую прочность, чем алмазы трех предыдущих марок. Эта марка алмазов применяется для изготовления инструментов на металлической связке, работающих в особо тяжелых условиях (резка различных горных пород – гранита, мрамора и др.).

Таблица 2.7. – Физико-механические свойства синтетических металлоподобных соединений [70]

Физические свойства	Карбиды				Силициды			
	TiC	TaC	MoC	WC	TiSi ₂	TaSi ₂	MoSi ₂	NSi ₂
Температура плавления, К	3523	4153	2973	3143	1813	2473	2503	2438
Твердость НВ-10 ⁸ , Па	280	157	147	170	87	138	118	105
Удельное объемное электросопротивление $\rho_v \cdot 10^8$, Ом•м	52,5	65,0	71,0	19,2	16,9	46,0	21,0	12,5
Физические свойства	Нитриды			Бориды				
	TiN	VN	MoC	TiB ₂	TaB ₂	MoB ₂	NB ₂	
Температура плавления, К	3523	4153	2973	1813	2473	2503	2438	
Твердость НВ-10 ⁸ , Па	280	157	147	87	138	118	105	
Удельное объемное электросопротивление $\rho_v \cdot 10^8$, Ом•м	52,5	65,0	71,0	16,9	46,0	21,0	12,5	

Наибольшей прочностью и наименьшей хрупкостью обладают алмазы марки АСКС, которые используются для изготовления бурового инструмента, правки абразив-

ных инструментов, резки корунда. Все синтетические алмазы при температуре выше 1473 К переходят в графит.

Нитрид бора представляет собой кубическую модификацию соединения бора с азотом, синтезируемого по технологии, аналогичной изготовлению синтетических алмазов. За счет варьирования технологическими режимами получают следующие разновидности кубического нитрида бора: эльбор или боразон, эльбор-Р, кубонит, исмит, гексанит. Температурная устойчивость кубического нитрида бора почти в 2 раза выше, чем алмаза. Все разновидности кубического нитрида бора, как и алмазы, по своей массе измеряются каратами (1 карат= 0,2 г) и используются в основном для оснащения (в качестве рабочих органов) различных металлообрабатывающих инструментов.

Карбид бора В₄С по твердости и абразивной способности превосходит все искусственные и естественные абразивные материалы, за исключением алмаза и кубического нитрида бора.

Корунды синтетические представляют собой монокристаллы окиси алюминия и выпускаются двух видов: рубин-10 и лейкосапфир. Эти материалы используются для изготовления деггалей приборов времени (камни для часов), вставок специальных измерительных приборов, балансировочных призм и камней для измерительных приборов.

Рубиновые активные элементы изготавливаются из монокристаллов, выращенных из синтетического корунда и предназначены для работы в твердотельных оптических квантовых генераторах. Эти изделия выпускаются в виде цилиндрических стержней диаметрами 5,2; 6,5; 7; 8 мм и длиной рабочей части 75, 80 мм, с торцами под углом 90°, с лейкосапфировыми наконечниками и без них.

Микролит корундовый, или спеченный корунд, представляет собой синтетический материал микрокристаллического строения, состоящий из зерен Al₂O₃ величиной 0,5 – 0,75 мкм с добавками модификатора 0,6 – 1,0% в виде окиси магния и полученный путем спекания предварительно спрессованных изделий при 2023 К. Твердость микролита ЦМ-332 при 1273 НРА 82, и применяется он для изготовления резцовых пластинок, фильер, сопл, опор и других деталей специальных приборов и устройств.

Пайка синтетических материалов на основе неорганических соединений возможна путем их предварительной металлизации с применением энергии ультразвуковых колебаний. Ультразвуковая металлизация их требует высоких температур нагрева (до 1373 К), наличия защитной атмосферы, а также применения специальных припоев с адгезионно-активными компонентами.

ГЛАВА 3

ПРИПОИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАЙКИ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ

3.1. ПРИПОИ ДЛЯ ЛУЖЕНИЯ И ПАЙКИ МЕТАЛЛОВ

При разработке припоев для лужения и пайки изделий из металлов руководствуются следующими положениями [2]:

1) припои должны содержать компоненты, обладающие максимальной скоростью диффузии в основной металл, например цинк и кадмий, причем наибольшую скорость диффузии в алюминий имеет цинк;

2) для того чтобы в процессе пайки использовать обычно применяемое технологическое оборудование и инструмент, припои должны иметь сравнительно низкую температуру плавления, которая достигается включением в состав припоя олова, свинца и других легкоплавких компонентов;

3) необходимо, чтобы паяные соединения имели высокую прочность и коррозионную стойкость. Наименьшую разность электрохимических потенциалов в соединениях алюминия с алюминием, алюминия со сталью, а, следовательно, и наибольшую коррозионную стойкость имеет группа кадмиево-цинковых припоев.

Для ультразвуковой пайки разработан ряд легкоплавких ($418 < T_{пл} < 723$ К) оловянно-свинцовых, оловянно-цинковых, кадмиево-цинковых и оловянно-кадмиево-цинковых припоев (табл. 3.1). Наибольшей технологичностью при ультразвуковой пайке обладают оловянно-цинковые припои П200А и П250А. В их расплавах имеются кристаллы цинка, способствующие увеличению числа зародышей кавитации в процессе воздействия ультразвука, а также вызывающие эффект абразивного воздействия кристаллов припоя на паяемые металлы.

Для пайки при температурах ниже 417 К разработан ряд особолегкоплавких припоев на основе висмута и индия. В качестве основы этих припоев выбраны бинарные сплавы: висмут—олово, индий—кадмий, индий—олово, образующие низкотемпературные эвтектики и твердые растворы. Кроме того, висмут, германий, кремний и галлий при затвердевании увеличиваются в объеме. Это физическое свойство компонентов припоя используется для устранения негерметичности при ультразвуковой пайке различного рода изделий.

Таблица 3.1. - Легкоплавкие припои для лужения и пайки металлов

Марка припоя	Химический состав, мас. %	Температура плавления $T_{пл}$, К	Предел прочности паяного соединения σ_B , МПа
П150А	Sn—38, Zn—4, ост. Cd	428	44,0
П200А	Sn—90, Zn—10	473	54,0
Авиа 1	Sn—55, Zn—25, Cd—20	473	—
	Cd—60, Sn—40	508	70,6
П250А	Sn—80, Zn—20	523	55,9
Авиа 2	Sn—40, Zn—25, Cd—20, Al—15	523	—
	Cd—60, Zn—40	583	72,6
	Sn—70, Zn—30	588	46,1
П300	Cd—40, Zn—60	613	34,3
Мосэнерго «А»	Sn—40, Cu—1,5, ост. Zn	643	—

С целью повышения коррозионной стойкости паяных соединений с алюминиевыми сплавами в состав особолегкоплавких припоев на основе висмута и олова вводят до 10% цинка. Для увеличения прочности вводят германий до 0,5%. Введение добавок цинка, галлия, германия, индия и кадмия в припой на основе висмута и олова позволяет снизить температурный порог ультразвукового лужения алюминиевых сплавов (табл. 3.2) [71].

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по выбору типа припоя в зависимости от металла паяемого изделия с применением энергии ультразвуковых колебаний. Так, для бесфлюсовой ультразвуковой пайки меди, никеля, медных и никелевых сплавов, олова, золота, платины рекомендуются припой системы Pb—Sn. Пайка алюминия, магния и их сплавов осуществима припоями систем Sn—Zn—Cd, Sn—Pb—Cd, Sn—Pb—Zn, Zn—Al, Sn—Zn (рис. 3.1) [72].

Изучение воздействия ультразвуковых колебаний на расплавы припоев в процессе их кристаллизации показало, что наиболее эффективное измельчение зерна происходит у припоя П250А, содержащего 20%Zn и имеющего температурный интервал кристаллизации 50 К. Оловянно-свинцовые припои ПОС30, ПОС61, состоящие из компонентов Sn и Pb, имеющих гранцентрированную и тетрагональную решетки, отличаются менее эффективным измельчением зерна, характеризующимся микротвердостью сплава Н (рис. 3.2). Кроме того, эвтектический припой ПОС61 имеет более узкий температурный интервал кристаллизации (7 К), чем ПОС30, поэтому и подвержен наименьшему измельчению зерна [29].

Таблица 3.2. - Особолегкоплавкие припои для лужения и пайки металлов

Марка припоя	Химический состав, мас. %	Температура плавления $T_{пл}$, К	Предел прочности паяного соединения σ_B , МПа
ПВ-40	Sn—11, Cd—8, Zn—8, In—18, Pb—14, ост. Bi	323	1,96
ПВ-50-2	Sn—12, Cd—15, Zn—2, Pb—16, ост. Bi	368	5,86
ПВ-50	Sn—10, Cd—15, Zn—19, Pb—15, ост. Bi	373	4,41
ПИК-75	Cd—25, In—75	396	3,92
ПИГ-52	Sn—47,5; Ge—0,5; ост. In	402	4,9
ПВГ-50	Sn—47,5; Cd—0,6; Ge—0,5; Pb—4,0; ост. Bi	408	2,94
ПВГ-55	Sn—40,7; Ge—0,5; Pb—4,0; ост. Bi	418	6,86

Металлографические исследования микроструктуры припоев для ультразвуковой пайки, проведенные авторами, позволили получить данные об ее особенностях. Анализ микроструктуры оловянно-свинцового припоя ПОС61 показал, что припой представляет

собой механическую смесь темных зерен свинца и светлых олова. Олово и свинец мягки и пластичны, имеют соответственно тетрагональную объемно-центрированную и гранецентрированную кубическую решетки. В расплавах этих припоев не происходит значительного развития кавитационных явлений из-за отсутствия твердых кристаллов, являющихся в большинстве случаев центрами образований зародышей кавитации. Малая химическая активность, как олова, так и свинца не приводит в ультразвуковом поле к их химическому взаимодействию в жидком состоянии с компонентами стеклокерамики.

При анализе микроструктуры припоев ПСр1,5 и ПОССу10-2 выявлено, что их структура содержит неравномерно распределенные твердые кристаллы серебра в первом случае и сурьмы во втором, по размерам превосходящие кристаллы других компонентов. Однако незначительное содержание серебра (до 1,5%) в припое ПСр1,5 не оказывает заметного воздействия на его свойства в ультразвуковом поле. В структуре припоя ПОССу10-2 отчетливо заметны кристаллы сурьмы правильной ромбоэдрической формы. Поскольку кристаллы сурьмы обладают высокой твердостью и структурой, близкой к структуре абразивных зерен, то они способствуют увеличению абразивного воздействия припоя на паяемые материалы. Однако небольшое процентное содержание сурьмы (до 2%) не дает столь значительного эффекта. Структура припоя ПОИ-50 представляет собой механическую смесь светлых зерен индия и более темных зерен олова. Наличие индия в припое улучшает его смачивающую способность, однако повышенная легкоплавкость эвтектического сплава Sn—In (300 К) затрудняет его использование для пайки и металлизации кроме особых случаев.

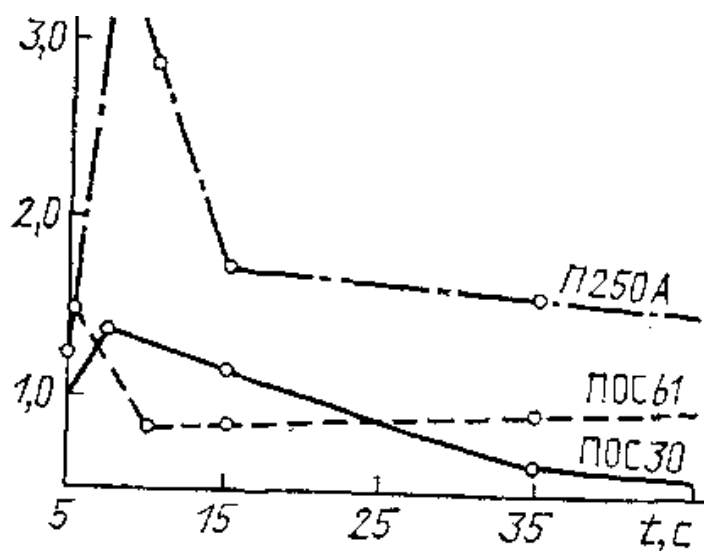


Рис. 3.2. Зависимость микротвердости припоев от времени воздействия ультразвуковых колебаний

Структура экспериментального припоя системы Pb—Sn—Zn—In, приготовленного традиционным методом расплавления исходных компонентов, носит видманштетный характер, т. е. отдельные компоненты, такие, как индий, не распределены равномерно по объему, а сосредоточены в отдельных участках в виде макроскопических образований, зерна же других компонентов разновелики по размерам. Использование такого припоя для ультразвуковой пайки и металлизации ввиду несовершенства его структуры может привести к значительному разбросу прочности сцепления с паяемыми материалами.

При воздействии ультразвуковых колебаний на этот припой в процессе его приготовления, а именно при введении легирующих добавок, структура получаемого припоя становится мелкозернистой, отдельные компоненты равномерно распределены по всему объему. Результаты экспериментальных данных показывают, что такой припой обеспечивает высокие и стабильные значения прочности сцепления с паяемыми материалами.

Для ультразвуковой пайки и лужения труднопаяемых металлов, таких, как титан, тантал, цирконий, кремний, германий, предложены припои систем Pb—Sn—Sb и Pb—Sn—Zn—Sb, содержащие в качестве диффузионно-активного металла цинк и сурьму до 10%, увеличивающие прочность спая [74, 75]. Кристаллы сурьмы, нерастворимые в припое, обладают высокой твердостью, чем способствуют увеличению абразивного воздействия на паяемые металлы.

Повышение прочности паяемых соединений с труднопаяемыми металлами при ультразвуковой пайке достигается введением в состав припоев системы Pb—Sn—Zn—Sb активных металлов, например Ti, Be, в количестве до 0,1%, а также Al, Si до 0,1%. Указанные добавки вводятся в припой в виде медной лигатуры [75, 76].

Наряду с этим в состав припоев на основе цинка с добавками Al, Mo, Ni, Be вводят мишметалл (Ge, La). Примерное соотношение Be и мишметалла составляет от 1:1 до 1:10. Такой припой обладает хорошей сопротивляемостью коррозии и высокими прочностными и пластическими свойствами [77].

Анализ литературных данных показывает, что для процессов ультразвукового лужения и пайки труднопаяемых металлов разработана большая группа легкоплавких припоев на основе олова, свинца и цинка, позволяющих обеспечить получение надежных паяных соединений.

3.2. ПРИПОИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ

И СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Природа сил связи, обеспечивающих при пайке соединение металлов с неметаллами, к настоящему времени еще мало изучена. Исследования контактных явлений в металлических расплавах [74, 78] позволили установить ряд важных закономерностей процесса смачивания неметаллических материалов. Так, отмечено, что смачиваемость окислов металлическими расплавами и адгезия в системе возрастают с повышением сродства металла жидкой фазы к кислороду. Химически активные по отношению к кислороду металлы Ti, Zr, Al, Mn в чистом виде или в виде сплавов образуют малые краевые углы смачивания на поверхности окислов Al₂O₃, BeO, MgO, SiO₂ и др.

Для возникновения адгезии и смачивания между припоем и паяемым неметаллическим материалом необходимо также химическое сродство между компонентами припоя и паяемого материала, под которым подразумевают способность компонентов вступать в химическое взаимодействие с образованием новых веществ. С термодинамической точки зрения мерой химического сродства отдельных реагентов друг с другом является уменьшение их свободной энергии в результате химического взаимодействия. Резко отрицательное значение изобарно-изотермического потенциала свидетельствует о высоком химическом сродстве металла с неметаллом.

Таблица 3.3. - Металлы с большим химическим сродством с основными компонентами неметаллических материалов

Компоненты, входящие в состав неметаллических материалов	Адгезионно-активные металлы в последовательности уменьшения химического сродства
Кремний	Hf, Ta, Zr, Nb, Mo, W, Ti, V, Cr, Co, Fe, Ni, Mn, Pd, Pt, Cu
Германий	Ni, Co, Fe, Ti, Zr, Nb, V, Ta, Pb, Pt, Mo, Mn, Cr, Cu
Углерод	Ta, Hf, Nb, Zr, Ti, W, V, Si, Mo, Cr, Mn, Ni
Бор	Zr, Hf, Ta, Nb, W, Ti, Mo, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co
Алюминий	Pd, Zn, Ni, Co, Nb, Mo, Pt, Ta, Fe, Au, Cu, Mn, Cr, Ti, V
Бериллий	W, Ta, Nb, Zr, Co, Fe, Ni, Ti, Pd, Cu, V, Ce
Азот	Ta, Hf, Zr, Ti, Nb, V, Mo, Mn, Al
Кислород	Be, Hf, Zr, Al, Ti, Si, Nb, Mn, Ta, Cr, V, W, Mo
Фосфор	Co, Fe, Mn, Ni, Pd, Cu
Сера	W, Mn, Co, Ni, Fe

Адгезионная активность взаимодействующих припоя и неметаллического материала возрастает по мере увеличения их химического сродства. В табл. 3.3 приведены металлы, которые являются адгезионно-активными по отношению к основным компонентам конструкционных неметаллических материалов (полупроводников, алюмооксидной и бериллиевой керамики, карбидов и т. д.) [80].

Адгезионно-активными металлами по отношению к перечисленным материалам являются гафний, тантал, цирконий, титан, ниобий, ванадий и т. д. Легкоплавкие металлы (свинец, олово, висмут и др.) обладают слабым химическим сродством с компонентами неметаллических материалов. Медь имеет слабое сродство с углеродом, кислородом и бором, а серебро и золото — с углеродом, кислородом и азотом. Поэтому такие металлы, как свинец, олово, висмут, сурьма, кадмий, медь, серебро, золото, могут быть отнесены к группе инактивных металлов, т. е. металлов, плохо смачивающих неметаллические материалы.

Таблица 3.4. – Взаимодействие адгезионно-активных и инактивных металлов

Инактивные металлы	Адгезионно-активные металлы													
	Zr	Ta	Hf	Ti	V	Nb	Mo	W	Ni	Co	Fe	Cr	Mn	Pd
Свинец	X	—	—	X	—	H	H	H	P	P	P	P	P	X
Олово	X	X	X	X	X	X	—	H	X	X	P/X	P	X	X
Индий	X	—	—	X	—	—	—	—	X	—	—	—	X	X
Висмут	X	—	—	X	—	H	H	H	X	P	P	H	X	X
Сурьма	X	—	—	X	X	X	—	—	X	X	X	X	X	X
Кадмий	П	—	—	X	X	—	—	H	X	X	X	H	X	X
Медь	X	H	X	X	P	П	P	H	HTR	П	П	P	HTR	HTR
Серебро	X	X	—	X	P	—	H	H	P	P	P	P	P	П
Золото	X	X	X	X	X	X	П	H	HTR	П	П	П	X	П

Примечание: X — образование химических соединений; P — расслоение в жидком состоянии; П — образование простых систем; H — отсутствие взаимодействия; HTR — непрерывные и упорядочные твердые растворы; P/X — одновременное расслоение и образование химических соединений.

В связи с этим для улучшения смачивания паяемых неметаллических материалов (керамики, кремния, графита и др.) в инактивные (по отношению к паяемым материалам) металлы, образующие основу припоя (олово, свинец, медь и др.), вводят добавки адгезионно-активных металлов. Однако при этом необходимо учитывать взаимодействие компонентов припоя между собой (табл. 3.4).

При разработке припоев для ультразвуковой металлизации неметаллических материалов особое внимание уделяют соответствующему подбору компонентов припоя с целью образования химических соединений с окислами элементов, входящих в состав материалов. Для металлизации керамики, стекла, стеклокерамики и других материалов предложен припой на основе свинца или олова, который наряду с такими компонентами, как цинк, сурьма и алюминий, содержит добавки в количестве 0,1—15,0 мас.% редкоземельных металлов (иттрия, скандия) и до 0,5% активных металлов (титана или бериллия) [81, 82]. В качестве добавок редкоземельных металлов используют селен и германий, однако при содержании этих добавок свыше 10% резко снижается пластичность припоя. Для введения бериллия, титана, кремния используют медную или алюминиевую лигатуру. Выплавку припоев осуществляют либо в вакууме, либо в среде инертного газа.

Исследования ультразвуковой металлизации радиотехнической керамики оловянно-свинцовыми ПОС40, ПОС61, оловянно-свинцово-сурьмянистым ПОССу3О-2, серебро-содержащими ПСр 1,5, ПСрОСЗ-58, а также оловянно-цинковыми припоями П200А, П250А показали, что наилучшие результаты по прочности сцепления с керамикой обеспечивают бинарные оловянно-цинковые сплавы эвтектического или заэвтектического состава [83,84].

Установлено, что цинк как адсорбционно-активный компонент при содержании 5-7% в сплаве обеспечивает получение прочных соединений с пьезокерамикой, сопоставимых с прочностью неметаллического материала. Диффузионная подвижность цинка в процессе ультразвуковой металлизации способствует протеканию процессов физико-химического взаимодействия на границе раздела припой – паяемый материал, приводящих к образованию переходной зоны с повышенной микротвердостью [45].

Оловянно-цинковые припои П200А, П250А и другие позволяют получить достаточную прочность спая в основном с керамическими материалами, имеющими развитый микрорельеф, например со стеатитовой керамикой. Ультразвуковая металлизация монолитных керамических и стеклокерамических материалов, широко применяемых для изготовления элементов электронной аппаратуры, но не обладающих пористой структурой и развитым микрорельефом, указанными припоями затруднена.

Для металлизации керамических и стеклокерамических материалов, имеющих в своем составе керамику марок ТК-20, Т-80, Т-260 на основе окислов SrTiO_3 , CaTiO_3 , а также до 20—30%: стеклофазы на основе окислов кремния и свинца, предложен припой следующего состава, мас. %: Sn — 10, Zn — 10, In — 10, Sb — 2, остальное Pb [37]. В нем наряду с цинком, необходимым для ультразвуковой пайки и металлизации, содержались добавки металлов, которые улучшают смачивание керамики в ультразвуковом поле (In) и повышают прочность ультразвукового спаивания (Sb). Статистические результаты исследований прочности сцепления известных припоев и экспериментального приведены в табл. 3.5 [47].

Из таблицы видно, что большинство известных припоев имеет прочность сцепления меньшую, чем серебряное покрытие, полученное вжиганием пасты (5,9 МПа). Оловянно-свинцовые припои ПОС40, ПОС61 не обеспечивают хорошей прочности сцепления с монолитной поверхностью стеклокерамики. При испытаниях слой металлизации отрывается от ее поверхности, адгезия припоя совершенно недостаточна для образования надежного спаивания.

Таблица 3.5. – Прочность сцепления припоев со стеклокерамикой

Марка припоя	Химический состав, %	Температура плавления $T_{пл}$, К	Прочность сцепления $\sigma_{в}$, МПа
ПОС40	Sn — 40, Pb — 60	511	0,7
ПОССу10-2	Sn — 10, Sb — 2, остальное Pb	541	1,0
ПСр1,5	Sn — 15, Ag — 1,5, остальное Pb	538	2,9
Олово	Sn — 100	503	2,4
Индий	In — 100	428	3,3
ПОС61	Sn — 61, Pb — 39	466	3,8
ПОИ50	Sn — 50, In — 50	390	5,4
П150А	Sn — 38, Zn — 4, остальное Cd	428	5,2
П200А	Sn — 90, Zn — 10	473	10,0
П250А	Sn — 80, Zn — 20	523	8,0
Специальный	Sn — 10, Zn — 10, In — 10, Sb — 2, остальное Pb	448	20,6

Применение индия в чистом виде позволяет достичь хорошего смачивания поверхности неметаллов. Однако вследствие недостаточной механической прочности и пластичности прочность его сцепления с этими материалами невысока. Сравнительно высокая стоимость и дефицитность затрудняют использование металла, а также припоев, богатых индием, для ультразвуковой металлизации в промышленных масштабах.

Использование оловянно-цинковых припоев позволило получить более высокую прочность сцепления металлизации, особенно для припоя П200А. Наилучшие результаты получены для экспериментально разработанного припоя системы Pb—Sn—Zn—In, что позволило в 3,5 раза увеличить прочность сцепления металлизации по сравнению с прочностью сцепления покрытий, нанесенных вжиганием серебряной пасты.

3.3. ПРИПОИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Для ультразвуковой высокотемпературной металлизации синтетических материалов, например плотных модификаций нитрида бора: композита β —BN и гексанида P (γ —BN) при температурах 900—1170 К применены сплавы на основе меди [85]. Для повышения прочности сцепления металлопокрытий с керамикой при высокотемпературной пайке в состав припоя предварительно вводят 0,5—1,0% металла от массы расплава из группы Nb, Mo, W, Ti, Zr, Cr, Ca [86]. Для металлизации используют излучатель, изготовленный из того же металла, который предварительно вводят в расплав припоя. Растворе-

ние металла излучателя в расплаве дополнительно повышает концентрацию вводимого элемента в расплаве.

Вводимые добавки в расплав интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия припоя с паяемым материалом. Высокотемпературная металлизация указанным составом припоя осуществлялась в герметичной камере 10^{-1} Па, заполненной после откачки осушенным аргоном при температуре 1023 К и времени воздействия ультразвука 1 мин. При этом адгезионная прочность соединений составляла не менее 4,4 – 5,4 МН/м².

Высокотемпературную ультразвуковую пайку осуществляют также с использованием индукционного нагрева в высоком вакууме ($1,3 \cdot 10^{-4}$ Па). Экспериментально исследовано влияние ультразвуковых колебаний на смачивание и растекание ряда высокотемпературных припоев (табл. 3.6) [87].

Введение ультразвуковых колебаний с амплитудой 1 – 6 мкм в паяемый материал приводит к уменьшению краевого угла смачивания для припоя ПСрМИн-63В на стали 12Х18Н9Т в среднем на 30 – 50°, а для припоя МВ на сплаве 36НХТЮ – на 50° без перегрева припоя. Припои ПМГрК-2,5 и ПМГрН-2,5 при повышенных температурах достаточно глубоко проникают в капиллярный зазор шва, так как в своем составе содержат легирующие добавки германия и кремния, которые обеспечивают лучшее смачивание поверхности нержавеющей сталей.

Т а б л и ц а 3.6. - Припои для высокотемпературной ультразвуковой пайки

Тип припоя	Химический состав припоя, мас. %	Температура расплава, К
МВ	Cu 100	1373
ПМГрН-2,5	Cu —92,5; Ge—5,0; Ni —2,5	1333
ПМГрК-2,5	Cu —93,5; Ge—4,0; Si —2,5	1333
ПМГ-9	Cu —91; Ge —9	1283
ПЗлМСр-60В	Au — 60; Ag —20; Си — 20	1173
ПСрМИн-63В	Ag —63; Cu —27; In —10	1023

Использование ультразвуковых колебаний при индукционной пайке в вакууме существенно интенсифицирует процессы смачивания, растекания и капиллярного течения припоев. Введение ультразвуковых колебаний частотой 44 кГц и амплитудой 1,5 – 2 мкм обеспечивает полное и равномерное заполнение капилляров при пайке нержавеющей сталей припоями на основе меди МВ, ПМГрК-2,5 и др.

Многие паяные соединения, получаемые низкотемпературной и высокотемпературной пайкой, как при эксплуатации, так и в процессах их получения и химико-технологической обработки подвержены воздействию химических сред различной активности, поэтому сопротивляемость паяных соединений коррозионному разрушению, особенно в напряженном состоянии, приобретает большое научное и практическое значение. Для оценки сопротивляемости паяных соединений в агрессивных средах пригодны методы, применяемые для оценки сварных соединений. Однако паяные соединения являются системами с повышенной термодинамической неустойчивостью, так как обладают более высокой структурно-химической, макро- и микронеоднородностями, обусловленными разными физико-химическими свойствами припоя и паяемых материалов. Это подтверждается характером распределения микротвердости, термоэлектрического и электродного потенциалов (рис. 3.3) [88].

Механическая, физическая и электрохимическая неоднородности являются интегральными характеристиками свойств паяного соединения и поэтому влияют на коррозионную стойкость соединения. Оценка коррозионной стойкости любого паяного соединения базируется на сравнении электродных потенциалов его компонентов и на сопротивляемости паяного соединения коррозионному разрушению в напряженном состоянии. С этой точки зрения необходимо, чтобы припой был катодом по отношению к основному материалу. Однако этого условия недостаточно для обеспечения коррозионной стойкости более благородного металла, находящегося в контакте с менее благородным. Поэтому в паяной конструкции нельзя полностью избавиться от эффектов, обусловленных контактной коррозией, даже если конструкция изготовлена из однородных металлов. При воздействии внешней химически активной среды на такое разнородное соединение скорость коррозионного процесса будет зависеть от следующих обстоятельств: у металла с более отрицательным электродным потенциалом (анод) скорость коррозии увеличивается, с более положительным (катод) уменьшается по сравнению со скоростью коррозии при отсутствии между ними контакта. Следовательно, катодный шов к общей коррозии невосприимчив, а анодный достаточно быстро подвергается коррозии.

Характер физико-химического взаимодействия основного металла и припоя, а также соотношение электрохимических потенциалов в условиях контактной коррозии показывают, что особенно склонны к контактной коррозии соединения алюминия и его сплавов, паяные оловянно-свинцовыми припоями, а также малоуглеродистые стали, паяные серебросодержащими свинцовыми припоями ПСр2,5 и ПСр3 [89].

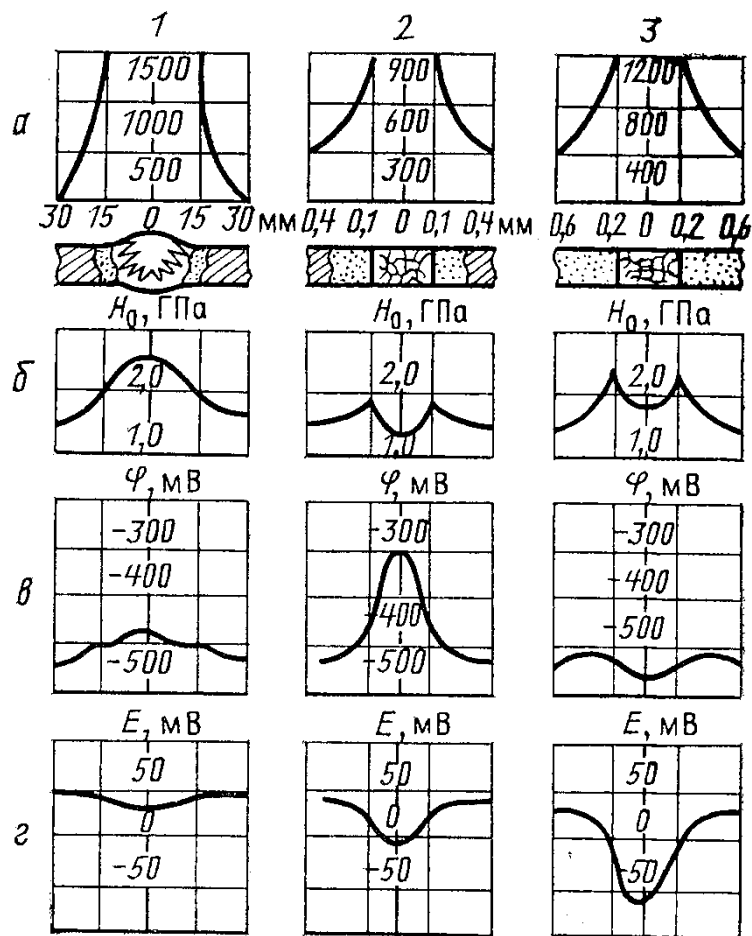


Рис. 3.3. Неоднородность физико-химических свойств в поперечном сечении сварного и паяного соединений (материал—сталь Ст.Зсп, толщина листа 3 мм): 1— аргонно-дуговая сварка; 2 — пайка припоем ЛБ3; 3 — пайка припоем П-87; а — распределение температу-

ры нагрева в соединении; b — микротвердость; v — электродный потенциал в 3%-ном растворе NaCl; z — термоэлектрический потенциал

Для снижения скорости коррозионных процессов паяных соединений в условиях химически агрессивных сред необходимо выполнять следующие требования: 1) припой должен быть катодом по отношению к паяемым деталям; 2) в случаях, когда неизбежно применение припоя с отрицательным потенциалом (анодного) по отношению к соединяемым металлам, необходимо, чтобы его поверхность не была слишком малой; 3) так как использование флюсов способствует развитию коррозионных процессов, необходимо применять ультразвуковую пайку, исключая применение флюсов.

Кроме того, введение ультразвука в расплав припоя способствует удалению газов, измельчению зерна в процессе кристаллизации и частичному снятию напряжений I и II рода в паяном шве. Однако, к сожалению, пока отсутствуют необходимые экспериментальные и теоретические работы, посвященные коррозионной стойкости паяных соединений в ультразвуковом поле.

3.4. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕСТАНДАРТНЫХ ПРИПОЕВ

Используемые в процессах ультразвуковой металлизации и пайки припои иногда приходится специально готовить, так как существующие стандартные типы припоев не всегда удовлетворяют требуемому качеству соединений. Большое значение при получении нестандартных припоев имеют порядок введения элементов, способ перемешивания, соблюдение температуры плавки и рафинирование готового припоя.

Плавку оловянно-свинцовых припоев ведут в электрических тигельных печах в следующей последовательности [90]: на дно тигля загружают небольшое количество древесного угля, доводят температуру печи до 523 К, загружают часть свинца и поднимают температуру до 603 К. После расплавления свинца добавляют сурьму и оставшуюся часть свинца, а олово вводят перед разливкой припоя. Если олова значительно больше, чем свинца, то первым плавят олово, затем свинец и все остальные элементы.

Перед рафинированием делают химический анализ припоя на содержание в нем цинка, железа и меди. Цинк из расплавленного припоя удаляют путем обработки расплава хлористым алюминием, который вводят в припой из расчета 200% от массы цинка в припое. Медь и железо удаляют путем обработки припоя серой из расчета 50%, суммы меди и железа в расплаве. Образовавшиеся сульфиды меди и железа всплывают на поверхность припоя в виде шлака.

Легкоплавкие припои на основе олова, висмута и индия получают плавлением в керамических или фарфоровых тиглях под слоем древесного угля в шахтной электропечи типа ПП-1. При выплавке припоя ПВ-40 в тигель, разогретый до 523 К, загружают олово, затем свинец. Поднимают температуру до 623 К и последовательно вводят висмут, кадмий, индий по мере их расплавления. В процессе плавки расплав периодически перемешивают и снимают шлак. При температуре 373 К берут пробу на химический анализ и разливают припой в прутки. При выплавке припоя ПИК-70 в тигель, нагретый до 473 К, загружают индий и расплавляют его. При температуре 698 К вводят цинк и кадмий последовательно по мере их расплавления.

Оловянно-цинковые припои П200А, П250А готовят в электрических тигельных печах. В тигель, разогретый до 523 К, загружают олово, которое плавят под слоем древесного угля, затем, поднимая температуру до 693 К, вводят цинк при интенсивном перемешивании. Снимают шлак и рафинируют канифолью из расчета 0,015% от массы припоя в тигле. Разлив в изложницы производят при температурах 593 К.

Расчет шихты припоя из трех металлов можно производить по формулам:

$$A = \frac{Mx}{100-a}; B = \frac{My}{100-b}; C = \frac{Mz}{100-c}$$

где A, B, C — количество исходных металлов, кг; M — масса приготовляемого припоя, кг; x, y, z — содержание металлов A, B, C в припое, %; a, b, c — угар исходных металлов A, B, C , %. Процент угара колеблется от 0,5 до 3% в зависимости от технологии плавки. Плавку цинковых припоев осуществляют в тигельных печах. В нагретый до 723 К тигель загружают небольшое количество цинка и расплавляют, после чего в расплав вводят алюминий и медь. Сплав перемешивают механической мешалкой, снимают с поверхности шлак и при температуре 1473 К его рафинируют фосфористой медью (из расчета 0,02—0,04% фосфора). В раскисленный сплав загружают остальную массу цинка и другие легирующие добавки.

ГЛАВА 4 УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОСНАЩЕНИЕ ДЛЯ ПАЙКИ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ

4.1. АКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

При возбуждении упругих механических колебаний ультразвуковой частоты в любой материальной среде возникает распределенное в пространстве и времени поле смещений и обусловленное им поле деформаций и циклических напряжений в твердых телах и звуковых давлений в газообразных и жидких средах.

Смещение любой точки, принадлежащей твердому телу, создает деформацию его элемента. Если смещения точки по осям координат x , y , z соответственно обозначить через u , v , w , то деформация, вызванная этими смещениями, может быть описана тремя компонентами, характеризующими относительные удлинения и сужения по осям координат:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{dv}{dy}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{dw}{dz}$$

и тремя компонентами, характеризующими деформацию сдвига в координатных плоскостях [11]:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy};$$

$$\varepsilon_{zx} = \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx};$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{dw}{dy} + \frac{dv}{dz}.$$

Возникшие под действием упругих колебаний деформации вызывают появление напряженного состояния, которое по аналогии может быть описано тремя составляющими напряжений сжатия – растяжения и тремя составляющими напряжений сдвига. При этом каждая из шести компонент, описывающих напряженное состояние, не превышающее предела пропорциональности в любой точке твердого тела, является линейной функцией шести компонент деформации. Известно, что коэффициенты, входящие в эту зависимость напряжений от деформаций, характеризуют упругие свойства твердого тела. Так как в изотропном твердом теле значения коэффициентов упругости не зависят от координат, напряжения растяжения — сжатия, соответствующие осям координат x , y , z , можно выразить в виде

$$\sigma_{xx} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{xx}, \quad \sigma_{yy} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{yy}, \quad \sigma_{zz} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{zz}$$

и напряжения сдвига в виде

$$\sigma_{yz} = \mu \varepsilon_{yz}, \quad \sigma_{zx} = \mu \varepsilon_{zx}, \quad \sigma_{xy} = \mu \varepsilon_{xy},$$

где $\Theta = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}$ — изменение некоторого объема твердого тела; λ, μ — коэффициенты, характеризующие упругие свойства твердого тела (константы Ламе).

Так как любая акустическая система представляет собой определенный набор геометрических твердых тел конечных размеров, то необходимо решить уравнения их колебаний. В общем виде уравнение продольных колебаний стержня может быть представлено в виде [11]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (4.1)$$

где ρ — плотность материала стержня; E — модуль продольной упругости, которое можно решить следующим образом:

$$U = (A \sin K_1 x + B \cos k_1 x) \sin \omega t,$$

A, B — коэффициенты, определяемые из граничных условий;

$k_1 = \sqrt{\rho/E} \omega$ — волновой коэффициент, а уравнение крутильных колебаний стержня

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

в виде

$$\varphi = (A \sin k_2 x + B \cos k_2 x) :$$

где φ — угол закручивания стержня; $k_2 = \omega \sqrt{\rho/\mu}$ — волновой коэффициент.

Ультразвуковая (акустическая) технологическая система для пайки и металлизации (рис. 4.1) состоит из источника упругих колебаний ультразвуковой частоты в виде магнитострикционного, ферритового или пьезоэлектрического преобразователя 1, акустического трансформатора скорости или концентратора 2, а в случае необходимости волновода 3, обрабатываемого изделия 4 и полуволнового отражателя 5. На рис. 4.1 вместе с ультразвуковой технологической системой приведены эпюры распределения смещений A и циклических напряжений растяжения—сжатия O , возбуждаемых продольными стоячими волнами.

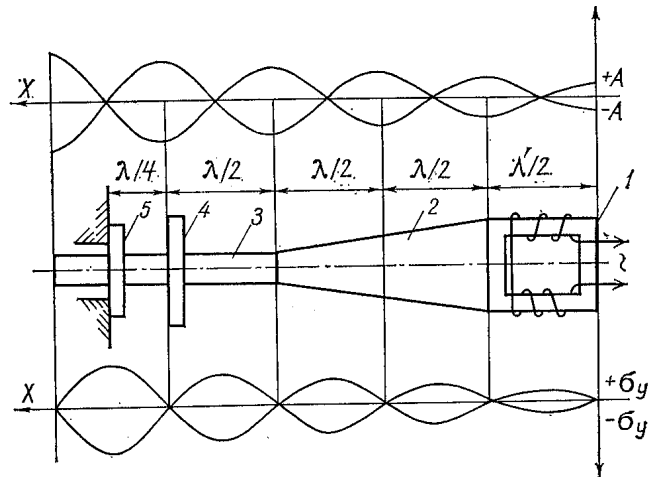


Рис. 4.1. Ультразвуковая технологическая система: 1 — преобразователь; 2 — концентратор; 3 — волновод; 4 — обрабатываемое изделие; 5 — полуволновой отражатель

Конструктивно ультразвуковые колебательные системы технологического назначения могут выполняться односторонними (рис. 4.1), двусторонними с прямолинейными и криволинейными волноводами (рис. 4.2), крестообразными (рис. 4.3). В последней конструкции волновод выполнен в виде стержня 1 резонансной длины, на котором симметрично относительно узла смещений расположен граненый диск 2, причем расстояние между

противолежащими гранями диска равно $\lambda/2$. К граням диска взаимно перпендикулярно присоединены четыре магнитострикционных преобразователя 3. При синфазном возбуждении преобразователей происходит усиление продольных колебаний, распространяющихся вдоль стержня 1. На рис. 4.4. приведена модификация крестообразной акустической системы, собранной на основе пьезокерамики. Двусторонние и крестообразные акустические системы применяются в энергоемких ультразвуковых технологических процессах.

Важнейшей характеристикой любой акустической системы является ее резонансный режим работы, который возможен только при условии, что все элементы системы имеют длину, равную или кратную $\lambda/2$. Только в этом случае суперпозиция прямой и отраженной волн образует стоячую волну, наличие которой позволяет однозначно определить местоположение узлов и пучностей смещений и циклических напряжений вдоль вектора распространения упругой волны в колебательной системе.

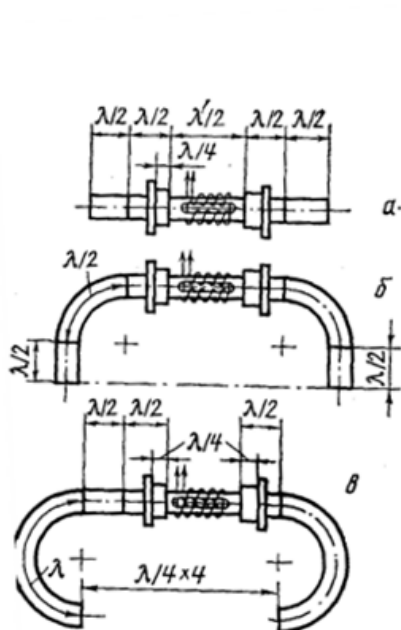


Рис. 4.2. Двусторонние ультразвуковые технологические системы: с прямолинейными (а) и криволинейными волноводами (б, в)

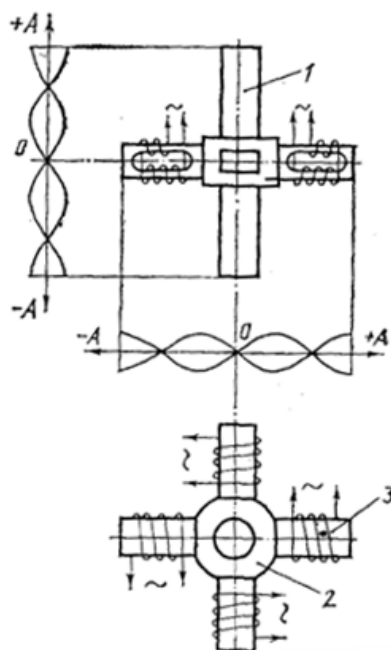


Рис. 4.3. Двусторонняя ультразвуковая технологическая система с крестообразным расположением преобразователей

Другим требованием, предъявляемым к акустической технологической системе, следует считать численное совпадение резонансных частот, появляющихся под механической нагрузкой системы, с частотами колебаний системы, работающей в холостом режиме. Механическое нагружение, даже если оно не вызывает изменения геометрических размеров (длины) отдельных элементов колебательной системы, приводит к определенному рассогласованию резонансного режима работы системы в целом. В связи с этим большое значение имеет механический импеданс, который определяется как отношение, усилия, действующего в определенном месте любого элемента акустической системы, к величине колебательной скорости в этом месте. Частоты, при которых механический импеданс принимает минимальное значение, соответствуют резонансным частотам колебательной системы. Таким образом, импеданс системы носит ярко выраженный резонансный характер.

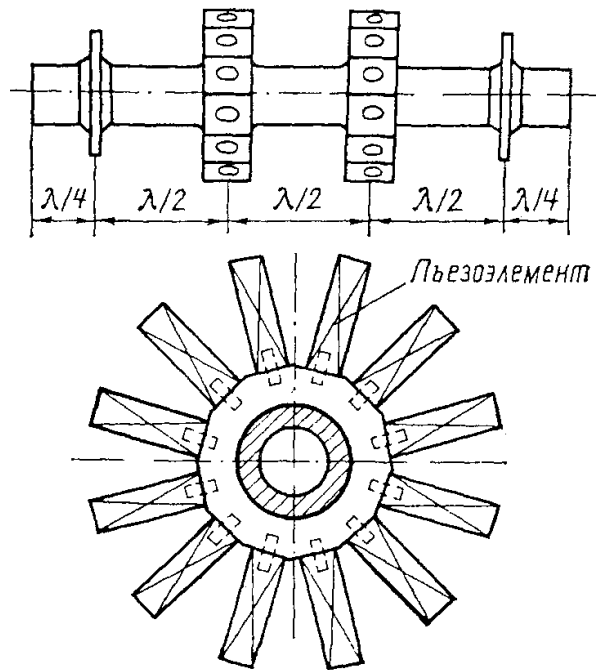


Рис. 4.4. Пакетный пьезокерамический преобразователь

Так как все акустические технологические системы возбуждаются с одной стороны, а нагружаются технологической нагрузкой с противоположной, при рассмотрении действия возбуждающей силы на технологическую нагрузку устанавливается новое свойство акустической системы — свойство трансформатора скорости. Поэтому каждая акустическая; технологическая система может также характеризоваться коэффициентом трансформации колебательной скорости.

Высокая акустическая добротность всех элементов акустической системы определяет не только ее к. п. д., но и продолжительность свободных колебаний, возбужденных в системе, а также величину и остроту амплитудно-частотных пиков. Акустическая добротность колебательной системы Q может быть определена исходя из ее амплитудно-частотной характеристики: $Q = f_p / \Delta f$, где f_p — резонансная частота системы; Δf — изменение частоты, при которой амплитуда смещений уменьшается в e раз.

Добротность акустической системы существенно зависит от уровня механических напряжений в ее элементах, возникающих под действием технологических нагрузок. Поэтому по мере увеличения нагружения системы технологической нагрузкой ее акустическая добротность, как правило, снижается. Определенное влияние на акустическую добротность системы оказывает микрогеометрия поверхности всех ее элементов. Чем ниже степень шероховатости, тем меньше акустической энергии рассеивается поверхностью каждого из элементов системы.

Принципиально важно жесткое соединение всех элементов между собой, причем одинаково жесткий контакт должен обеспечиваться по всем сопрягаемым плоскостям. С этой целью сопрягаемые плоскости должны быть строго перпендикулярны к оси системы и должны иметь предельно низкую степень шероховатости (притертые плоскости). При этом существенно увеличивается удельная статистическая площадь жесткого контакта и, как следствие, повышаются акустическая добротность и надежность работы акустической технологической системы. Соблюдение изложенных требований обеспечивает в акустической системе заданный колебательный режим работы и его устойчивость, стабильность работы во времени при длительной ее эксплуатации, минимальные потери энергии во всех звеньях системы и пассивных элементах технологического оборудования и оснастки, наибольшую концентрацию акустической энергии непосредственно в очаге технологического процесса.

Возможны два режима работы акустической системы:

- 1) колебательный в ненагруженном состоянии, когда в системе, состоящей из элементов резонансной длины, кратной $\lambda/2$, устойчиво существует режим стоячей волны;
- 2) при достаточно большой нагрузке системы на полностью поглощающую среду в ней возникает режим бегущей волны (независимо от резонансных размеров элементов акустической системы).

Степень приближения режима работы акустической системы к бегущей или стоячей волне определяется коэффициентом бегущей волны:

$$K_b = A_{y \min} / A_{n \max}$$

где $A_{y \min}$, $A_{n \max}$ — амплитуды смещений в узле и пучности колебаний.

4.2. МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Под ультразвуковыми преобразователями понимают устройства, которые преобразуют электрическую высокочастотную энергию в энергию упругих механических колебаний ультразвуковой частоты. Таким образом, любой ультразвуковой преобразователь можно рассматривать как двустороннюю систему, ко входу которой подводится один вид энергии (электрическая), а с выхода снимается другой вид (механическая).

В настоящее время в технике, использующей ультразвук, применяются следующие виды ультразвуковых преобразователей: магнитострикционные, пьезоэлектрические, полупроводниковые [9, 91, 92]. В технологических процессах пайки к металлизации применяются первые два вида.

В основу работы магнитострикционного преобразователя, положен прямой магнитострикционный эффект, состоящий в изменении механического состояния тела и его геометрических размеров под действием магнитного поля (эффект Джоуля). Обратный эффект заключается в изменении магнитной индукции при наложении на ферромагнитный материал механического напряжения (эффект Виллари). Магнитострикционный эффект может иметь место и при различных видах деформаций или при намагничивании (эффекты Гильемана, Баррета, Видемана, Вертхейма) [91].

С учетом анизотропии магнитных и упругих свойств твердого тела магнитострикционные явления в общем случае должны описываться тензорными соотношениями. Однако в металлах и сплавах, имеющих поликристаллическую структуру (и поэтому рассматриваемых как изотропные среды), тензорные соотношения могут быть полностью сведены к скалярным. Магнитострикционный эффект в поликристаллах является нелинейным, поэтому определение коэффициента пропорциональности (магнитострикционной константы) между магнитными и механическими величинами дается в дифференциальной форме. Наибольшей магнитострикционной деформацией $\Delta l/l$ характеризуются сплавы платины с железом, железокобальтовые (пермендюрты), железоалюминиевые (альферы) сплавы, а также никель и кобальт (рис. 4.5) [93].

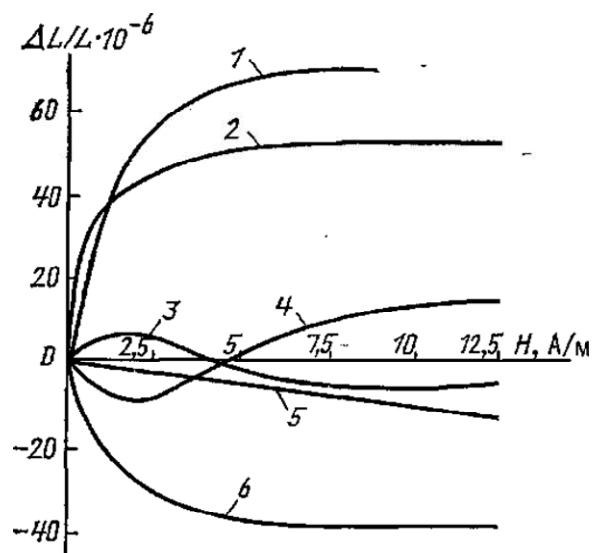


Рис. 4.5. Зависимость магнитострикционной деформации от напряженности магнитного поля: 1 — сплав платины с железом (54% Pt+46% Fe); 2 — пермендюр; 3 — железо; 4 — литой кобальт; 5 —

Зависимости, изображенные на рис. 4.5, получены в статических условиях, т. е. при воздействии на ферромагнитные материалы постоянного магнитного поля. При действии переменного магнитного поля ферромагнитный материал изменяет свои геометрические размеры с удвоенной частотой по сравнению с частотой возбуждающего поля, поэтому магнитострикционная деформация в этом случае оказывается небольшой (рис. 4.6, а). При подмагничивании магнитостриктора получают наибольшую магнитострикционную деформацию и линеаризацию магнитострикционного эффекта (рис. 4.6, б). Применяются следующие виды магнитострикторов: стержневые, пакетные, плоские, кольцевые преобразователи для возбуждения различных видов колебаний. Металлические магнитострикционные преобразователи — мощные источники ультразвука. Область их применения ограничена диапазоном частот 18 – 60 кГц. Для более высоких частот в силу малой длины пакета преобразователя их изготовление практически нецелесообразно.

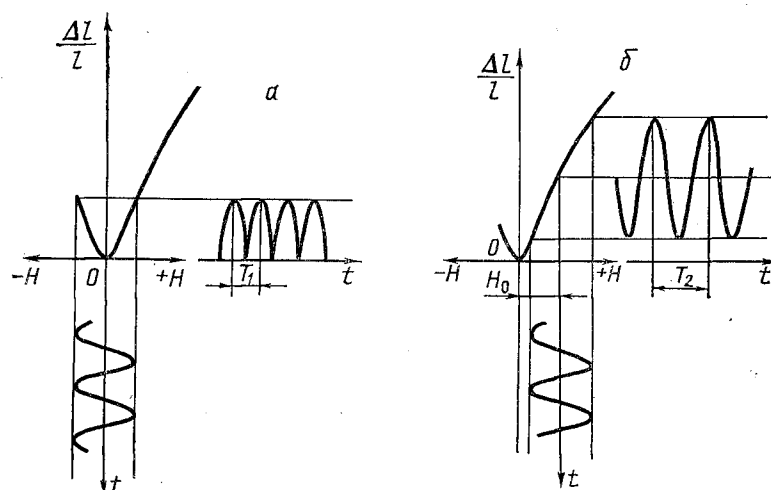


Рис. 4.6. Характер изменения магнитострикционной деформации: без подмагничивания (а), с подмагничиванием (б)

Поиск новых материалов для ультразвуковых преобразователей привел к разработке магнитострикционных ферритов. Так как электрическое сопротивление ферритов в 10^8 – 10^{10} раз больше, чем у металлов, потерь на токи Фуко в них практически нет. В этом и

состоит преимущество ферритов по сравнению с металлическими магнитострикционными преобразователями. Ферритовые магнитострикторы не требуют охлаждения и обладают высоким электроакустическим к. п. д. в широком диапазоне частот. Магнитострикционные ферриты получают смешиванием в определенной пропорции порошкообразных окислов железа и других металлов, прессованием этой смеси и последующим обжигом при высокой температуре.

Таким образом, ферриты представляют собой керамику, состав которой в общем виде описывается формулой $MeO \cdot Fe_2O_3$, где в качестве MeO могут быть окислы Ni , CoO , CuO , MnO , ZnO , LiO и др., а также их комбинации. Лучшими по акустическим, технологическим и прочностным свойствам являются ферриты, в состав которых входят $Ni - Si$ и $Ni - Cu - Co$ [92]. Параметры ферритов для акустических применений приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. – Основные физические свойства ферритов для акустических применений [94]

Марка материала	Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Скорость звука $c \cdot 10^3$, м/с	Магнитострикция насыщения $\lambda_s \cdot 10^{-6}$	Коэффициентная сила, А/м	Напряженность магнитного поля оптимальная, А/м	Начальная магнитная проницаемость	Температура Кюри, К
21-СПА	5,20	5,79	—26	224	1440	44	590
Ф-41	5,21	5,75	—26	184	1280	51	590
Ф-38	5,27	5,94	—9	28	400	330	260
МК-16	5,21	5,3	—26	—	1120	—	580
Ф-86	5,21	5,7	—24	152	1600	130	590
Ф-107	5,26	5,7	—27	176	960	70	540

Сердечники ферритовых преобразователей изготавливают монолитными, что упрощает технологию их производства и расширяет возможности конструктивных решений. Акустическая добротность ферритовых сердечников выше, чем сборных металлических пакетов. Кроме того, ферритовые магнитострикторы удобно и просто подмагничиваются пластинами из постоянных ферритовых магнитов, клеиваемых в магнитопровод. Благодаря такому способу подмагничивания упрощается система питания преобразователей и повышается их к. п. д. Интенсивность излучения и амплитуда колебаний ферритовых преобразователей лимитируется механической прочностью и их нелинейными свойствами.

Величина динамической прочности ферритов как разновидности керамики существенно зависит от поперечного сечения изделия. В среднем она принимается такой же, как и прочность пьезокерамики, и находится в пределах 19,6 – 39,2 МПа. При таком уровне циклической прочности амплитуды смещений составляют 4 – 8 мкм. Оптимальная удельная плотность мощности ферритовых преобразователей равна $7 \cdot 10^3$ Вт/м² [92]. Таким образом, предельные амплитуда колебаний и удельная плотность мощности ферритовых излучателей меньше, чем у металлических магнитострикционных материалов. В процессах пайки и металлизации указанные амплитуды колебаний и мощности излучений ферритовых преобразователей наиболее предпочтительны. Высокий к.п.д. ферритовых преобразователей, их незначительная масса (даже в сравнении с пьезокерамикой), отсутствие необходимости в принудительном охлаждении и малые габариты делают их удобными и перспективными для использования в процессах ультразвуковой пайки и металлизации.

Таблица 4.2. – Основные физические свойства некоторых пьезоэлектрических материалов [97]

Параметры	Пьезо-кварц	Сегнетова соль	Пьезокерамика		
			титанат бария	ниобат свинца бария	цирконат — титанат свинца (ЦТС)
Химическая формула	SiO ₂	—	BaTiO ₃	(Pb _{0,6})Nb ₂ O ₆	Pb(Zr _{0,55} Ti _{0,45})O ₃
Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	2,6	1,8	5,3	6,0	7,8
Диэлектрическая проницаемость, Ф/м	4,5	200	1530	1650	1100
Точка Кюри, К	849	330	393	533	603
Пьезомодуль $d_{ij} \times 10^8$	6,9	700	330	550	770
Модуль Юнга $E \cdot 10^{10}$, Па	86	31,6	103	90	65
Скорость звука $c \cdot 10^3$, м/с	5,7	—	4,4	3,9	2,9
Резонансная частота при толщине 1 мм, МГц	2,87	1,5	2,25	2,4	2,1

Работа пьезоэлектрических преобразователей основана на обратном пьезоэлектрическом эффекте, сущность которого состоит в том, что под действием электрического поля происходит упругая деформация кристалла. Отсутствие у кристаллов центра симметрии — необходимое условие существования прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов. Только в этом случае приложение извне механических или электрических напряжений может привести к появлению нескомпенсированного электрического заряда или упругой деформации кристалла. Все кристаллы по свойствам симметрии систематизированы в 32 класса, из которых кристаллы 20 классов не имеют центра симметрии и поэтому являются пьезоэлектриками.

В качестве пьезоэлектрических материалов используют естественные (минеральные) монокристаллические пьезоэлектрики — кварц, сегнетову соль и искусственные (керамические) — титанаты бария и кальция, цирконаты титаната свинца и др. (табл. 4.2). Благодаря невысокой стоимости и возможности изготовления излучателей разнообразных геометрических форм широкое распространение получила пьезокерамика [95, 96]. Так как пьезоэлектрические материалы фактически безынерционны, это позволяет с их помощью генерировать упругие механические колебания в очень широком диапазоне частот вплоть до 10^9 Гц. Второе важное преимущество, обусловленное электрической безынерционностью пьезоматериалов и малыми в них потерями на токи Фуко, — незначительный их нагрев в процессе работы. Это исключает необходимость принудительного охлаждения водой пьезоэлементов.

Для мощных пьезокерамических излучателей технологического профиля большое значение имеют предельно допустимые механические напряжения, возникающие в пьезоматериале при работе излучателя, которые зависят от механической прочности материала при растяжении. Весьма важна также зависимость свойств пьезоматериала от амплитуды смещений, так как при значительной амплитуде нарушается линейный режим работы преобразователя, сопровождающийся перекачкой энергии в высшие гармоники. В этом слу-

чае нежелательно снижение механической добротности Q с ростом амплитуды механических напряжений (рис. 4.7) и увеличение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ с ростом амплитуды возбуждающего электрического поля (рис. 4.8) [15].

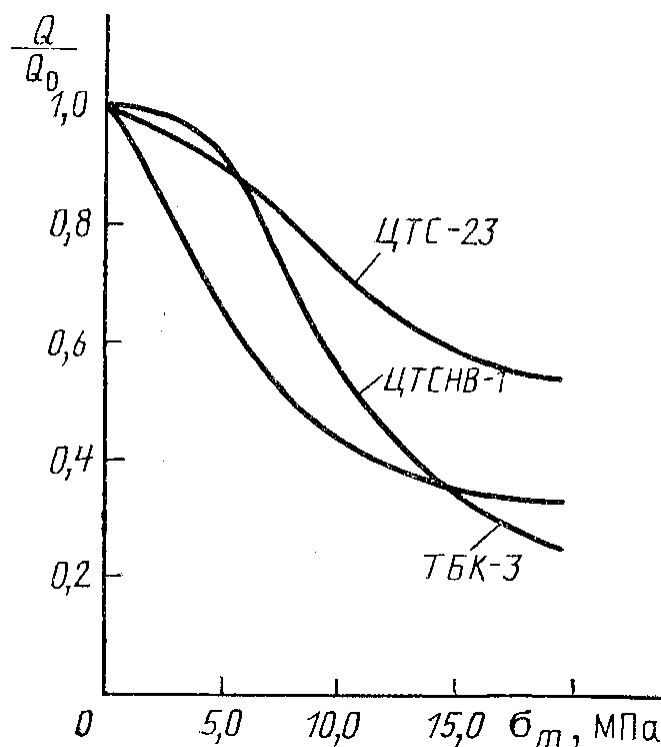


Рис. 4.7. Зависимость относительной механической добротности пьезокерамических материалов от амплитуды механических напряжений

Для мощных излучателей технологического назначения целесообразно использовать пьезокерамику с высокой механической добротностью, малыми электрическими потерями, характеризующими высокую излучающую способность. На высоких частотах излучения, когда резонансные размеры пьезоэлементов уменьшаются, предпочтительно использовать пьезокерамику с относительно высокой скоростью звука.

По конструктивным признакам пьезоэлектрические ультразвуковые преобразователи делятся на фокусирующие (сферические, трубчатые) и плоские (диски, пластинки). Для цилиндрических излучателей коэффициент усиления равен 5 – 20, а для сферических — 50 – 150. Такие преобразователи являются резонансными системами, работающими на частотах основного резонанса. При расчете и проектировании ультразвуковых преобразователей наряду с частотой собственных колебаний определяют интенсивность, входное сопротивление и электроакустический к. п. д. преобразователя. Добротность пьезокерамического преобразователя в основном определяется качеством поляризации, а вид генерируемых им колебаний — видом поляризации.

В зависимости от вида генерируемых колебаний пьезокерамические преобразователи бывают: 1) продольного типа, когда колебания распространяются в направлении длины прямоугольной пластинки; 2) составные продольного типа, в которых к пьезоэлектрическому элементу для управления колебательными характеристиками, например резонансной частотой, присоединен дополнительно металлический элемент; 3) колеблющиеся по толщине, в которых резонансная частота f_p определяется исключительно толщиной пьезоэлемента и рассматривается только для нечетных гармоник:

$$f_D = \frac{n}{2S} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

где $n = 1, 3, 5, \dots$; S — толщина преобразователя; E — модуль Юнга; 4) круглые пластинки (диски) с радиальными модами колебаний; 5) изгибные или биморфного типа, образованные двумя пьезокерамическими пластинками, которые удлиняются и укорачиваются в продольном направлении, причем при удлинении одной пластинки другая укорачивается.

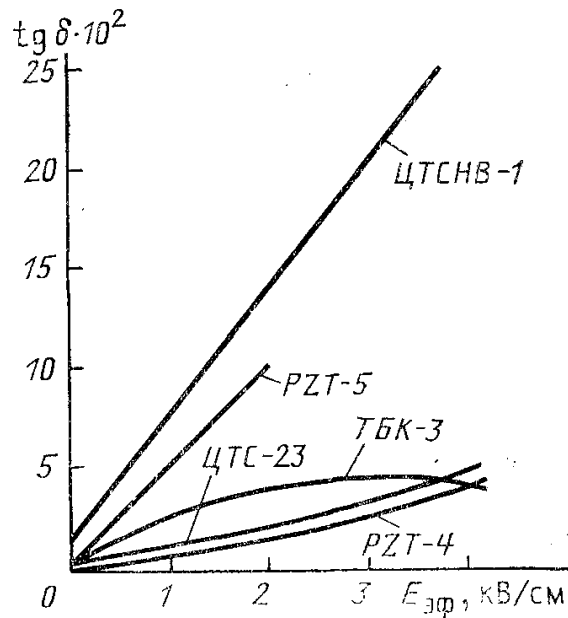


Рис. 4.8. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от амплитуды возбуждающего электрического поля

В последнее время начато производство пьезокерамики, генерирующей крутильные колебания [98]. Широкое распространение получили пакетные пьезокерамические преобразователи, которые по энергетическим параметрам приближаются к магнитострикционным и даже их превосходят. Пакетные преобразователи (рис. 4.9) состоят из двух металлических накладок 2, 4, между которыми помещены пьезоэлементы 1. Все контактирующие поверхности пакетного преобразователя должны быть тщательно притерты, а элемен-

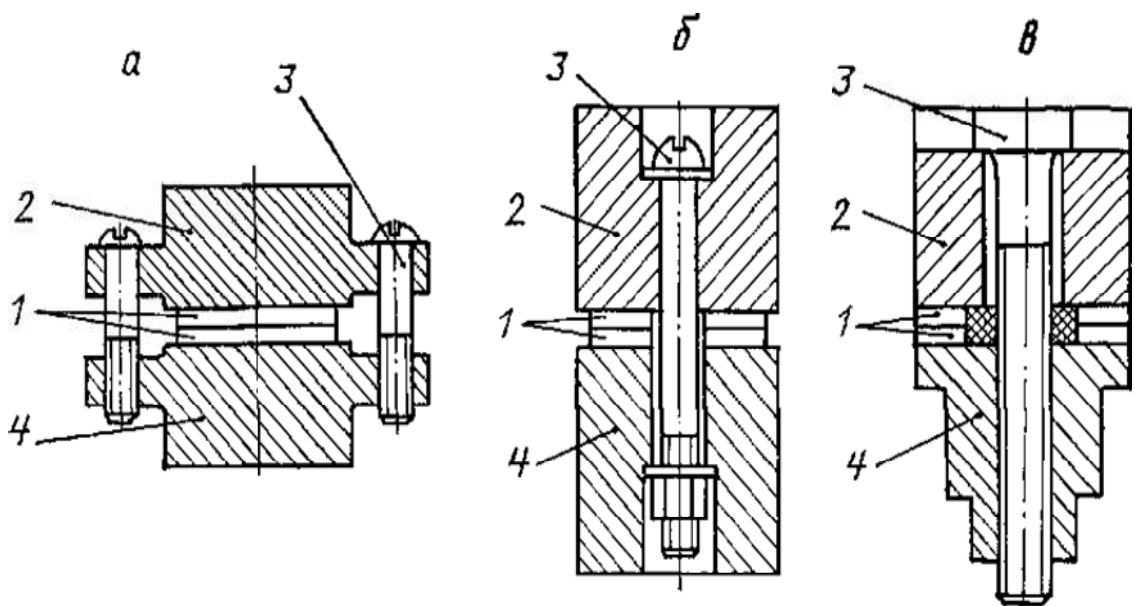


Рис. 4.9. Возможные конструктивные формы пакетных пьезокерамических преобразователей с фланцевым креплением (а) и центральным стягивающим болтом (б, в)

ты пакета надежно стянуты шпилькой или болтом 3, склеены или спаяны [99]. Пассивные металлические накладки значительно снижают резонансную частоту излучателя. Это позволяет применять более тонкие пьезоэлементы и улучшает условия их охлаждения. Резонансная частота f_p таких пакетных преобразователей может быть определена из уравнения [93]

$$\operatorname{tg} \frac{\pi f_p l}{c_1} \operatorname{tg} \frac{2\pi f_p l_1}{c_2} = \frac{\rho_1 c_1 S_1}{\rho_2 c_2 S_2}$$

где ρ_1, ρ_2 и c_1, c_2 — соответственно плотности и скорости звука в накладках.

На рис. 4.4 приведена конструкция пакетного пьезокерамического преобразователя, позволяющая получать предельно высокие удельные плотности мощности [100].

На эффективность работы пьезоэлектрических пакетных преобразователей большое влияние оказывает расположение преобразователя пьезоэлементов в системе, толщина пьезоэлементов и пассивных накладок, качество соединения всех элементов системы между собой. Предельная амплитуда колебаний пьезоэлектрических преобразователей ограничивается:

- 1) резким возрастанием акустических и магнитных потерь с увеличением амплитуды смещений и магнитной индукции выше критических уровней;
- 2) нелинейностью электромагнитных характеристик пьезоматериалов и их невысокой циклической прочностью.

В Акустическом институте АН СССР им. Н. А. Андреева разработаны типовые конструкции высокоамплитудных составных преобразователей, включающих пять элементов: ступенчатую рабочую накладку; два пьезоэлемента из ЦТС-19, соединенных электрически параллельно; тыльную накладку и технологическую гайку. Оптимальный момент затяга составной системы, обеспечивающий надежный акустический контакт, составляет 80—120 Н*м. Технические параметры высокоамплитудных составных преобразователей с резонансной частотой $22 \pm 10\%$ кГц приведены в табл. 4.3.

Сравнение параметров различных преобразователей ультразвуковых колебаний, используемых в процессах пайки и металлизации, показывает, что применение магнито-стрикционных преобразователей рационально в мощных установках пайки и металлизации, где требуется обеспечить высокую интенсивность колебаний в большом объеме припоя. Ультразвуковая пайка и металлизация малогабаритных и миниатюрных деталей и функциональных элементов РЭА могут осуществляться с помощью составных пьезоэлектрических преобразователей, имеющих малые потери и позволяющих генерировать колебания в широком диапазоне частот.

Таблица 4.3. – Технические параметры высокоамплитудных пьезоэлектрических преобразователей

Параметры	Марка преобразователя				
	ППК-0,01/22	ППК-0,02/22	ППК-0,03/22	ППКО-0,03/22	ППКО-0,2/22
Амплитуда смещений, мкм	15	40	20	10	10
Выходной диаметр излучателя, мм	8	10	15	30	200 × 200 × 100
Коэффициент эффективности	750	3000	2250	1450	2400
Напряжение питания, В	110	400	400	400	400
Потребляемая мощность, Вт	1	20	30	30	200
Масса, кг	0,1	0,25	0,35	0,35	2,4
Габариты, мм	15 × 15 × 5	30 × 14 × 4	30 × 14 × 8	30 × 14 × 8	30 × 14 × 8

4.3. ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

К пассивным элементам акустической колебательной системы относят: 1) стержни переменного сечения, т. е. акустические трансформаторы скорости или концентраторы; 2) стержни постоянного сечения или волноводы; 3) полуволновые отражатели; 4) пассивные металлические накладки для пьезокерамических пакетных преобразователей.

При колебаниях полуволнового стержня, имеющего торцы с различными площадями, амплитуда колебаний торца меньшей площади превышает амплитуду противоположного торца большей площади. Это свойство волновода определило его основное назначение в качестве акустического трансформатора скорости или концентратора. Таким образом, концентратор представляет собой стержень переменного сечения, изменяющегося по определенному закону. В зависимости от степени сложности геометрической формы различают простые и сложные концентраторы. Простые концентраторы бывают ступенчатые, цилиндрические, катеноидальные, экспоненциальные, конические, параболические и др. Характерным концентратором сложной геометрической формы является ампульный (рис. 4.10). Теория и методика расчета различных концентраторов простой геометрической формы изложены в работах [93, 101].

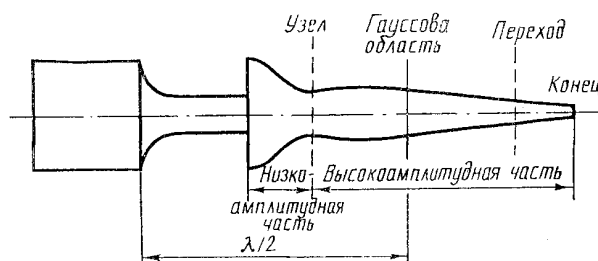


Рис. 4.10. Ампульный концентратор, возбуждаемый ступенчатым концентратором

Коэффициент усиления амплитуды смещений — основная характеристика любого вида концентратора. Коэффициенты усиления амплитуды смещений K_y , рассчитанные для различных форм концентраторов, но имеющих одно и то же отношение диаметра большого торца к диаметру малого, равное 3,33, приведены на рис. 4.11. Волновое число $K = \omega/c$ взято также одинаковым для всех рассчитанных концентраторов. Из рисунка видно, что наибольший коэффициент усиления имеют ступенчатый и катеноидальный концентраторы, наименьший — параболический. Наиболее простым по форме и изготовлению является конический концентратор, обладающий рядом преимуществ перед другими: небольшие отклонения от резонанса рабочей частоты не меняют рабочий режим акустической системы; высокая усталостная прочность и жесткость концентратора; простота и легкость его изготовления.

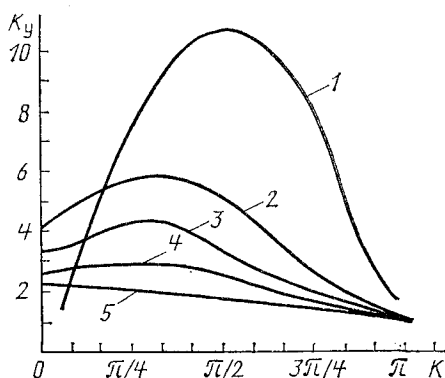


Рис. 4.11. Влияние геометрической формы концентратора на коэффициент усиления амплитуды смещений: 1 — ступенчатый; 2 — катеноидальный; 3 — экспоненциальный; 4 — конический; 5 — параболический.

Таким образом, хорошая устойчивость режима работы конического концентратора почти исключает появление систематических и случайных погрешностей, обусловленных непостоянством напряжения электрической сети и другими факторами, влияющими на резонанс рабочей частоты.

Для всех видов концентраторов существуют свои пределы максимальных значений коэффициента усиления, которые связаны с особенностями распространения звуковой волны и ее отражением от образующей поверхности при значениях коэффициентов усиления, превышающих критические.

При значениях коэффициента площади $D/d = 2—3$ конический, экспоненциальный и катеноидальный концентраторы дают коэффициенты усиления, мало отличающиеся между собой.

Ампульный концентратор предназначен для получения очень больших амплитуд смещений. Один из концов концентратора возбуждается преобразователем, а на другом конце образуется пучность смещений большой амплитуды. Ампульный концентратор можно рассматривать как систему, состоящую из низкоамплитудной и высокоамплитудной частей, которые соединяются в узле смещений. Требования, предъявляемые к каждой из частей концентратора, совершенно различны, и поэтому их расчет выполняется раздельно с последующей «стыковкой» в месте соединения.

Для концентрации ультразвуковой энергии в малом объеме, т. е. для создания очень высоких удельных плотностей мощности, применяют фокусирующие излучатели, например, мозаичного типа, позволяющие получать в фокусе удельную плотность акустической энергии порядка $1 \cdot 10^9$ Вт/м² [92]. Формулы для расчета ультразвуковых концентраторов различной геометрической формы даны в табл. 4.4.

В отдельных технологических процессах металлизации и пайки необходимо изменить направление распространения ультразвуковых колебаний. Если резонансный согласующий стержень переменного сечения не только осуществляет усиление амплитуды смещений, но и преобразует упругие колебания одного вида в другой вид, то такой пассивный элемент акустической системы называется концентратором-преобразователем. Так, например, продольные колебания в радиальные можно преобразовать с помощью резонансных цилиндрических стержней с дисками, диаметр которых равен половине радиальной волны. Минимальная ширина диска не должна превышать 0,1 %, чтобы в диске не могли возникнуть колебания другого вида, например изгибные. При возбуждении в цилиндрической части такого преобразователя продольных колебаний на поверхности диска возникают радиальные колебания, а в центре диска — пучность напряжений [102].

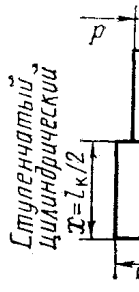
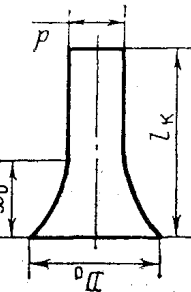
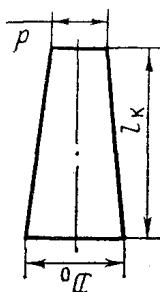
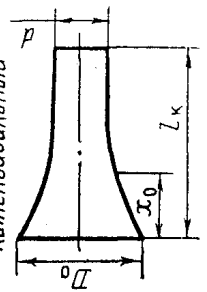
Продольно-крутильные колебания могут быть возбуждены с помощью ультразвуковой системы, где на боковой поверхности пакета магнестрикционного преобразователя в окнах размещена обмотка возбуждения, а инструмент имеет спиральную нарезку типа сверла [103], или посредством продольного возбуждения стержней, имеющих спиральную нарезку [104]. Возможно, также преобразование продольных колебаний в продольно-крутильные посредством цилиндрической спирали, навитой из трубки. Другие способы и системы преобразования продольных колебаний в крутильные описаны в работе [115].

Согласующие стержни постоянного сечения резонансной длины или волноводы предназначены для подвода ультразвуковых колебаний в очаг технологического процесса либо для обеспечения резонансного режима работы в акустических системах различной длины. Длина волновода должна быть равна или кратна $\lambda/2$.

Полуволновые отражатели являются автономными элементами акустической системы. Подобно волноводу они представляют собой цилиндрические стержни постоянного сечения и резонансной длины, равной $\lambda/2$. Как показано на рис. 4.3, в нулевой плоскости такого волновода имеется фланец, которым полуволновой отражатель может опираться на

пассивные элементы технологического оборудования. Так как полуволновой отражатель не связан со всеми остальными элементами акустической системы, его использование при необходимости позволяет обеспечить надежное закрепление обрабатываемого изделия между акустической системой и пассивными элементами оборудования без передачи акустической энергии на них, что концентрирует акустическую энергию в очаге технологического процесса, экранируя ее утечку.

Таблица 4.4. – Данные для расчета ультразвуковых концентраторов

Геометрическая форма концентратора	Закон изменения образующей	Теоретический коэффициент усиления амплитуды K_y	Резонансная полуволновая длина l_k	Координата узла смещения
 <p>Ступенчатый цилиндрический</p>	$D_x = D_0$ при $0 \leq x \leq l_k/2$; $D_x = d$ при $l_k/2 \leq x \leq l_k$	$(D_0/d)^2 = N^2$	$\lambda/2 = c/2f$	$l_k/2$
 <p>Экспоненциальный</p>	$D_x = D_0 e^{-\beta x}$; $\beta = \frac{\omega}{c} \frac{1}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}}$	$(D_0/d) = N$	$\frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$\frac{l_k}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)$
 <p>Конический</p>	$D_x = D_0 (1 - \alpha' x)$; $\alpha' = \frac{D_0 - d}{D_0 l_k}$	$\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l_k}{\lambda}\right)^2} < N$	$\frac{\lambda}{2} \frac{\alpha' l_k}{\pi}$; $\operatorname{tg}(\alpha' l_k) = \frac{\alpha' l_k}{(1 - N)^2} + 1$	$\frac{1}{\alpha} \operatorname{arctg}(\alpha/\alpha')$; $\alpha = \omega/c$
 <p>Катеноидальный</p>	$D_x = d \operatorname{ch} \gamma (l_k - x)$; $\gamma = \frac{1}{l_k} \operatorname{arcch} N$	$N/\cos(K'l) > N$	$\frac{\lambda}{2\pi} \times \sqrt{(K'l)^2 + (\operatorname{arcch} N)^2}$; $K'l + \operatorname{tg}(K'l) = \sqrt{1 - \frac{1}{N^2}} \operatorname{arcch} N$	$\frac{1}{K'} \operatorname{arctg} \times \left(\frac{K}{\gamma} \operatorname{cthy} l_k\right)$; $K' = \sqrt{\alpha^2 - \gamma^2}$

При выборе материалов для изготовления пассивных элементов акустической системы необходимо, чтобы они обладали высокими акустической добротностью, усталостной и механической прочностью. Акустическая добротность материала обычно определяется звонкостью [106]. Высокой акустической добротностью обладает алюминий и сплавы на его основе, например дюралюмины. Так, звонкость алюминия в 13 раз выше, чем желе-

за, в 30—50 раз выше, чем стали, и в 70 раз выше, чем меди. Малые акустические потери и высокую усталостную прочность имеют монель-металл (67% Ni; 28% Cu; 5% Fe, остальное Mn), а также титан и титановые сплавы.

4.4. РАСЧЕТ ПАКЕТНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Наиболее перспективными для ультразвуковой пайки и металлизации являются пьезоэлектрические преобразователи, которые по сравнению с магнитострикционными обладают высоким к.п.д., не требуют водяного охлаждения, имеют малые габариты и массу и в зависимости от типоразмеров могут работать в широком диапазоне частот. Методики расчета пакетных пьезоэлектрических преобразователей приведены в работах [107, 108].

В целях повышения энергоотдачи в очаге технологического процесса ультразвуковые преобразователи на основе пьезокерамики делают составными или пакетными, состоящими из пакета кольцевых пьезоэлементов. Пакет располагают между пассивными механическими элементами в виде цилиндрических и конических накладок, стянутых болтом или шпилькой. Накладки изготавливают из металла, обладающего высокой акустической добротностью, а их геометрические размеры (длину) определяют экспериментально, постепенным укорочением.

В общем случае при работе такого пакетного преобразователя на резонансной частоте каждый из его отдельно взятых элементов не будет резонансным. Поэтому расчет резонансных режимов работы отдельно взятого пьезоэлемента не может быть использован для определения аналогичных режимов работы всего пакетного преобразователя. Для расчета геометрических размеров составных систем можно использовать метод электроакустических аналогий. Существенное преимущество этого метода заключается в возможности использования эквивалентных электрических схем. Так, например, при проектировании пакетного пьезоэлектрического преобразователя, оснащенного технологическим инструментом, целесообразно для согласования выходного механического сопротивления преобразователя с акустическим сопротивлением среды рабочую накладку выполнять в виде конуса с отношением диаметров $N = 1,0 - 1,3$. Оптимальным местом расположения пьезоэлементов в пакете преобразователя, при котором получается наибольшее значение $\cos c_{sp}$, является узловая зона. Для воздействия на ванну расплавленного припоя наиболее целесообразен составной преобразователь (рис. 4.12), состоящий из рабочей конической накладки 1, выполняющей функцию излучателя, пакета пьезоэлектрических преобразователей 2, пассивной цилиндрической накладки 3, выполняющей роль отражателя, стягивающего элемента 4. Активный элемент такого преобразователя представляет собой набор из идентичных продольно-поляризованных пьезоэлементов, соединенных механически последовательно, а электрически параллельно.

Расчет волновых длин пассивных накладок (отражателя и излучателя) в одномерном приближении проводится без учета потерь для случая, когда нагрузка приложена только к одному из механических выходов преобразователя, т. е. к коническому излучателю. Используя эквивалентную схему секционированного пьезоэлемента [109], а также представление отрезков однородных стержней в виде Г-образных четырехполюсников, можно изобразить эквивалентную электрическую схему пакетного преобразователя так, как показано на рис. 4.13.

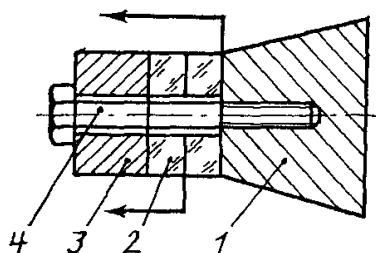


Рис. 4.12. Составной пакетный преобразователь: 1 — коническая накладка; 2 — активный элемент; 3 — цилиндрическая накладка; 4 — стягивающий элемент

На схеме эквивалентное полное механическое сопротивление Z_{ik} с соответствующими индексами представляет различные участки колебательной системы: Z_H — эквивалентное сопротивление акустической нагрузки; $C_{зр}$ и $R_з$ — емкость и сопротивление (диэлектрических потерь) пьезоэлемента; $1/n$ — коэффициент электромеханической трансформации. Элементы эквивалентной схемы, соответствующие пассивным накладкам и стягивающему элементу преобразователя, определяются соотношениями [110,111]:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= jW_1 S_1 \frac{1}{N} \left[\operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2} \frac{N-1}{N\beta_1} \left(1 - \frac{\beta_1}{\operatorname{tg} \beta_1} \right) \right]; \quad (4.3) \\ Z_{12} &= -jW_1 S_1 / N \sin \beta_1; \\ Z_{13} &= jW_1 S_1 \left[\operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2} + \frac{N-1}{N\beta_1} \left(1 - \frac{\beta_1}{\sin \beta_1} \right) \right]; \\ Z_{21} &= jW_2 S_2 \operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}, \quad Z_{22} = -jW_2 S_2 / \sin \beta_2; \\ Z_{31} &= jW_3 S_3 / \sin \beta_3, \quad n = d_{33} E S_2 / L_2, \end{aligned}$$

где $W_i = \rho_i c_i$; $\beta_i = WL_i/c_i$ — характеристические импедансы; $i=1, 3, 5$ — волновые длины механических элементов конструкции; L_i, S_i — продольные размеры элементов и их выходные площади; c_i — скорости звука в элементах преобразователя; ρ — количество пьезоэлементов; E — модуль Юнга; d_{33} — пьезомодуль.

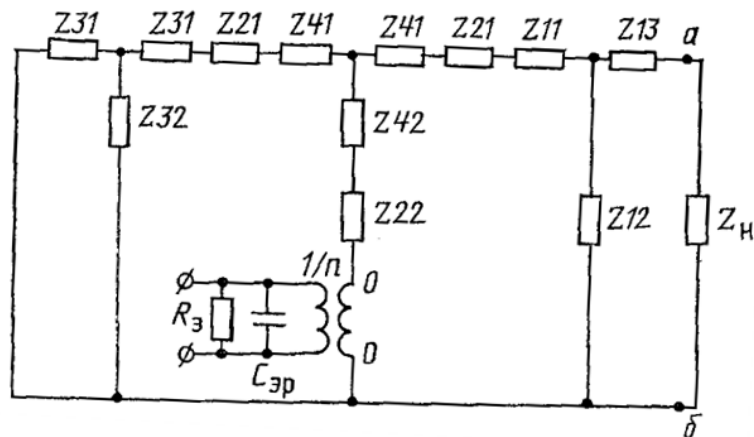


Рис. 4.13. Эквивалентная схема пакетного пьезокерамического преобразователя

Входное механическое сопротивление излучателя определится из формулы

$$Z_1 = Z_{11} + \frac{(Z_{13} + Z_H) Z_{12}}{Z_{13} + Z_H + Z_{12}} \quad (4.4)$$

Подставляя в формулу (4.4) выражение (4.3) с учетом, что при работе на жидкую среду волновое сопротивление рабочей накладки $W \gg W_{ср}$, и пренебрегая Z_H получим

$$Z_1 = jW_1 S_{12} \left\{ \frac{\beta_1 (N-1)^2 - [(N-1)^2 + N\beta_1^2] \operatorname{tg} \beta_1}{N^2 \beta_1 (N-1) \operatorname{tg} \beta_1 - N^3 \beta_1^2} \right\} \quad (4.5)$$

Для цилиндрического излучателя из условия максимальной удельной мощности [112]

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{W_1 S_1}{W_2 S_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \quad (4.6)$$

Заменим коническую накладку эквивалентной, но более простой, цилиндрической накладкой и определим ее входное механическое сопротивление по формуле $Z_{1\text{н}} = jW_1 S_1 \operatorname{tg} \beta_{1\text{н}}$. Условие эквивалентности $Z_{1\text{к}} = Z_{1\text{н}}$, тогда, пользуясь условием (4.6) и выражением (4.5), получим уравнение для определения продольного размера рабочей накладки

$$\frac{\beta_1 (N-1)^2 - [(N-1)^2 + N\beta_1^2] \operatorname{tg} \beta_1}{N^2 \beta_1 (N-1) \operatorname{tg} \beta_1 - N^3 \beta_1^2} = \frac{W_1 S_1}{W_2 S_2} \operatorname{ctg} \beta_2. \quad (4.7)$$

Обозначим $\frac{W_1 S_1}{W_2 S_2} \operatorname{ctg} \beta_2 = A$, тогда уравнение (4.7) можно преобразовать к виду

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{AN^3 \beta_1^2 + \beta_1 (N-1)^2}{N\beta_1^2 + AN^2 (N-1)\beta_1 + (N-1)^2}$$

Для определения продольных размеров цилиндрического отражателя необходимо решить резонансное уравнение $\operatorname{Im}(Z_{00}) = 0$ или $Z_{00} = 0$, где Z_{00} — входное механическое сопротивление преобразователя относительно точек 00:

$$Z_{00} = Z_{22} + Z_{42} + \frac{(Z_{41} + Z_{21} + Z_{03})(Z_{41} + Z_{21} + Z_{01})}{2Z_{41} + 2Z_{21} + Z_{03} + Z_{01}}; \quad (4.8)$$

Z_{01} — входное механическое сопротивление рабочей накладки:

$$Z_{01} = jW_1 S_1 \left\{ \frac{\beta_1 (N-1)^2 - [(N-1)^2 + N\beta_1^2] \operatorname{tg} \beta_1}{N_2 \beta_1 (N-1) \operatorname{tg} \beta_1 - N^3 \beta_1^2} \right\}; \quad (4.9)$$

Z_{03} — входное механическое сопротивление цилиндрического отражателя:

$$Z_{03} = jW_3 S_3 \operatorname{tg} \beta_3. \quad (4.10)$$

Подставляя значение Z_{ik} из формул (4.3), (4.9) и (4.10) в уравнение (4.8) и вводя для упрощения окончательного выражения обозначения

$$\begin{aligned} K &= W_4 S_4 \operatorname{tg} \beta_4 / 2; \quad M = W_4 S_4 / \sin \beta_4; \\ D &= W_2 S_2 \operatorname{tg} \beta_2 / 2; \quad C = W_2 S_2 / \sin \beta_2; \\ H &= W_1 S_1 \frac{\beta_1 (N-1)^2 - [(N-1)^2 + N\beta_1^2] \operatorname{tg} \beta_1}{\beta_1 N^2 (N-1) \operatorname{tg} \beta_1 - N^3 \beta_1^2}, \end{aligned}$$

получим выражение для определения толщины нерабочей накладки

$$\operatorname{tg} \beta_3 = \frac{1}{W_3 S_3} \frac{(K+D)[H-2(C+M)] + (K+D)^2 - H(C+M)}{(C+M) - (K+D) - H} \quad (4.11)$$

Расчетные и экспериментальные значения резонансных частот преобразователей различаются не более чем на 10%. Таким образом, изложенный аналитический метод расчета пакетных пьезокерамических преобразователей для воздействия на жидкую среду обеспечивает достаточно хорошее соответствие расчетных данных с экспериментальными.

4.5. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПАЯЛЬНИКИ И ВАННЫ

Генерирование упругих механических колебаний ультразвуковой частоты в технологических установках, предназначенных для ультразвуковой пайки, может осуществ-

ляться магнитоотрицательными, пьезокерамическими или ферритовыми преобразователями.

Для использования в процессах ультразвуковой пайки и лужения преобразователи встраиваются в ванны и паяльники, излучающие поверхности которых изготавливаются из кавитационно-стойких материалов (нержавеющие стали, титановые сплавы). Электрическая мощность современных промышленных установок для ультразвуковой пайки не превышает 0,4—2,5 кВт.

В настоящее время применяются два основных способа ультразвуковой пайки [113]: с возбуждением всей массы припоя в ванне (рис. 4.14, а) и с локальным воздействием ультразвука на ограниченный объем жидкого припоя (рис. 4.1, б). При первом способе обрабатываемое изделие 3 погружается в ванну жидкого припоя 4, корпус которой жестко связан с волноводом или концентратором 2 и преобразователем 1, охлаждаемым проточной водой. При втором способе изделие 3 погружается в ванну жидкого припоя 4. При этом источники ультразвука 1 не соединяются с ванной, а посредством волноводов 2 подают ультразвуковую энергию непосредственно в области, подверженные металлизации. В обеих конструкциях ванн расплавление припоя осуществляется нагревателем 5.

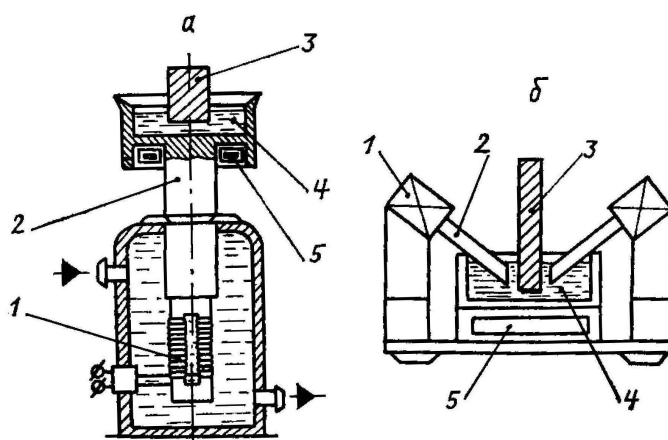


Рис. 4.14. Способы ультразвуковой пайки и конструкции ванн, их реализующих, с возбуждением всей массы припоя (а) и локальным воздействием ультразвука на ограниченный объем припоя (б): 1 – источник ультразвука; 2 – волновод; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – ванна с жидким припоем; 5 – нагреватель

Первый способ обеспечивает возможность обработки мало- и среднегабаритных деталей или одновременно партии деталей. Однако при этом не всегда удается получить необходимую интенсивность ультразвукового воздействия по всей паяемой поверхности.

Второй способ позволяет паять и крупногабаритные изделия. Достоинством способа является возможность концентрации ультразвуковой энергии в необходимых областях при достаточно высокой степени равномерности ее распределения, недостатком — снижение ресурса работы излучателей ввиду их кавитационной эрозии.

Первые ультразвуковые паяльники отечественные (УП-21, УП-42), зарубежных фирм Milliard (Англия) и других были рассчитаны на питание от ультразвуковых генераторов с выходной мощностью, не превышающей 50 Вт. Паяльники имели низкую акустическую мощность, перегревались при высокотемпературной металлизации (723—973 К), вследствие чего снижался коэффициент магнитоотрицательности преобразователей [114].

Отечественной промышленностью в настоящее время выпускаются ультразвуковые паяльники УЗП2-0,025 и ванны лужения УЗВЛ-0,4 (рис. 4.15).; УЗВЛ-1, источником ультразвуковой энергии для которых служит УЗ генератор технологического назначения типа УЗГ-3-0,4 с максимальной выходной мощностью 400 Вт (рис.4.16). Характеристики ультразвукового серийно выпускаемого технологического оснащения в сравнении с ранее выпускавшимися моделями [115] приведены в табл. 4.5.

В процессе практического использования паяльников типа УЗП2-0.025 выявлены

такие их недостатки, как нестабильность режима работы, неэффективность воздушного охлаждения, малая мощность нагревателя, низкая производительность ручного труда. Ваннам лужения УЗВЛ-0,4 присущи недостатки: низкая интенсивность колебаний, что приводит к наличию необлуженных мест; ограниченные размеры рабочей поверхности припоя; загрязнение ванны окислами припоя и шлака; наличие водяного охлаждения преобразователя. Снижение температуры нагрева преобразователя в ультразвуковых паяльниках достигают путем снабжения волновода воздушным радиатором [116], профилирования пластин преобразователя и сборки в пакет с заданным воздушным зазором [117], а также расположения ребер охлаждения на волноводе вдоль образующей [118].

Повышение стабильности режимов работы магнитострикционных преобразователей в ультразвуковом технологическом оборудовании достигают автоматической подстройкой генератора сигналом, снимаемым со вспомогательной обмотки в сочетании с дополнительным перемагничиванием преобразователя на инфразвуковой частоте в диапазоне 0,01—200 Гц [119]. Мощность нагревателя увеличивают путем использования газовой горелки, расположенной в корпусе ультразвукового паяльника и выступающей над торцом волновода, что дает возможность производить ультразвуковую пайку среднеплавкими и тугоплавкими припоями [120].



Рис. 4.15. УЗ паяльник УЗП2-0,025 (а) и УЗ ванна УЗВЛ-0,4 (б)



Рис. 4.16. УЗ генератор УЗГ-3-0,4

Весьма важно при ультразвуковой пайке правильное дозирование припоя. С этой целью разработан ряд конструкций паяльников с дозированием припоя. На рис. 4.17 изображена схема ультразвукового паяльника с дозирующим устройством, использующим ультразвуковой капиллярный эффект. Паяльник содержит камеру для припоя 2, которая нагревается нагревателем 4. Дно камеры соединено с капиллярной трубкой 3. Паяльник снабжен излучателем ультразвука 1, размещенным вблизи торца трубки, при этом зазор между торцами излучателя и трубки регулируется [121]. При внутреннем диаметре трубки 0,1—1,0 мм припой под действием ультразвуковых колебаний прокачивается через нее в направлении от излучателя к месту пайки. Скорость подачи регулируется от 0 до 7 г/с изменением амплитуды колебаний и величины зазора между торцом трубки и излучателем.

Таблица 4.5. – Технологическое оснащение для ультразвуковой пайки и металлизации

Модель	Частота, кГц	Мощность, Вт		Габаритные размеры, мм
		нагревателя	потребляемая	
<i>Паяльники</i>				
УП-21	23—26	70—120	100—150	260x230x45
УЗП-1	22	--	250	370x170x50
УЗУП-2	23—28	70—120	110—160	280x40x150
УЗП2-0,025	44	35	60	255x57x152
<i>Ванны</i>				
УП-40	22	1000	1500	430x360x220
УЗВА-1	18-25	300	800	360x360x480
УЗУЛ-1М	23-25	300	500	200x300x250
УЗВЛ-1	18-25	300	800	360x360x480
УВЛ-4	18	1000	1300	309x367x360

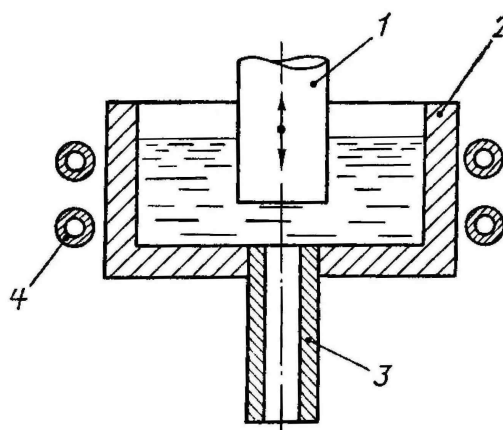


Рис. 4.17. УЗ паяльник с дозирующим устройством, использующим УЗ капиллярный эффект: 1 – излучатель ультразвука; 2 – камера для припоя; 3 – капиллярная трубка; 4 –нагреватель

Для дозированной подачи припоя при ультразвуковой пайке и увеличения производительности процесса создан ультразвуковой паяльник, содержащий дозирующую емкость 1, волновод 2, преобразователь 4, согласующий элемент 3 (рис. 4.18). Емкость для припоя жестко связана с волноводом на расстоянии не более $\lambda/4$ от его рабочего торца. Диаметр капиллярных отверстий 6, соединяющих емкость с рабочей поверхностью наконечника, выбирается таким образом, чтобы в обычном состоянии припой удерживался в емкости за счет сил поверхностного натяжения [122]. При подаче электрических колебаний ультразвуковой частоты от генератора на магнитострикционный преобразователь под действием продольных ультразвуковых колебаний, возбуждаемых в наконечнике, а также за счет создания ультразвукового капиллярного эффекта, заключающегося в резком снижении поверхностного натяжения припоя и увеличении скорости течения припоя по капиллярам, припой непрерывно подается из дозирующей емкости по капиллярным отверстиям на рабочую поверхность наконечника 7.

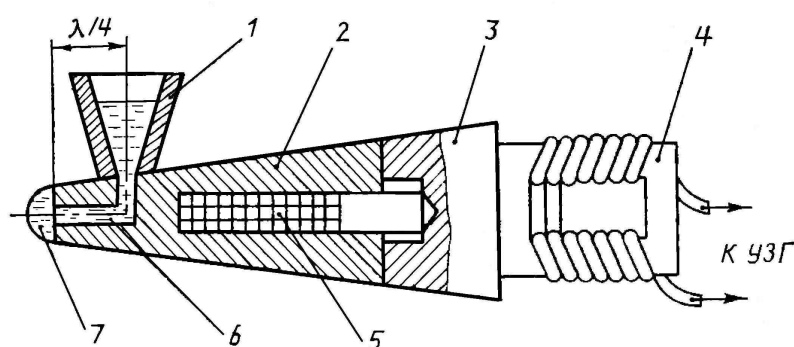
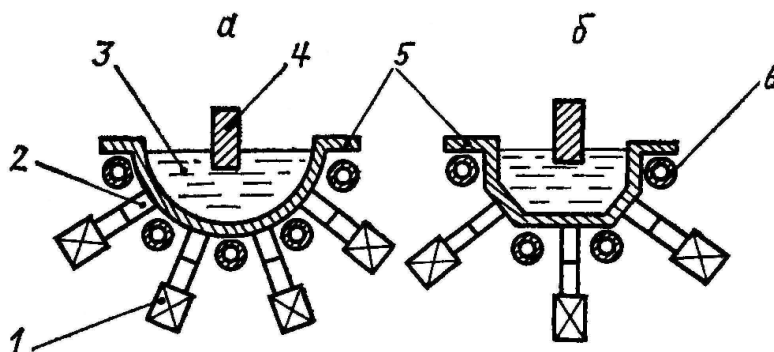


Рис. 4.18. Ультразвуковой паяльник с дозирующей подачей припоя: 1 – дозирующая емкость; 2 – волновод; 3 – согласующий элемент; 4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – нагреватель; 6 – капиллярные отверстия; 7 – рабочий наконечник

Усовершенствование серийно выпускаемой ванны лужения УЗВЛ-0,4, выразившееся в применении конического концентратора ультразвуковых колебаний с коэффициентом трансформации 2,5 в качестве элемента, обеспечивающего передачу колебаний от магнитострикционного преобразователя к ванне, позволило увеличить интенсивность ультразвуковых колебаний в ванне в 1,5 раза, снизить теплопередачу от нагревателя ванны. Для поддержания температуры припоя на заданном уровне был применен блок измерения и регулирования температуры, состоящий из прибора М303К, термопары ХК, и силового реле типа МКУ. Охлаждение магнитострикционного преобразователя осуществлялось вентилятором мощностью 3,5 Вт, обеспечивающим скорость воздушного потока 2м/с [123].

Перспективным направлением в настоящее время является использование в технологических устройствах пьезоэлектрических преобразователей, собранных в пакеты. Это позволяет получить более высокий к. п. д. преобразования, стабильный при рабочих температурах до 603К и более, повысить интенсивность ультразвуковых колебаний в рабочей зоне за счет применения фокусирующей формы преобразователей, использовать колебания различных частот для интенсификации процессов низкотемпературной пайки.

Наибольшую эффективность и равномерность распределения ультразвукового по-



ля обеспечивают ультразвуковые ванны с круглым и фасонным профилем дна (рис. 4.19). Такие ванны позволяют применить большое количество преобразователей (до 48 шт.) и таким образом обеспечить в них более равномерное распределение интенсивности ультразвуковой энергии, что способствует однородному и равномерному развитию кавитации по сравнению с обычными прямоугольными ваннами, а следовательно, повышает производительность процесса и качество лужения изделия [124].

Рис. 4.19. Ультразвуковые ванны лужения с круглым (а) и фасонным (б) профилем дна: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – волновод; 3 – жидкий припой; 4 – изделие; 5 – корпус ванны; 6 – нагреватель

Активацию небольшого объема припоя в ванне 8 осуществляют с помощью консольно закрепленного пластинчатого волновода 3, на который через волноводы 4 и 5 подают от ультразвукового преобразователя колебания (рис. 4.20). В свободном конце пластинчатого волновода в отверстии закреплен трубчатый излучатель ультразвука 1, погруженный в припой. Таким образом, возбуждаемые продольные ультразвуковые колебания посредством волноводов 3, 4, 5 преобразуются в поперечные колебания трубчатого излучателя, в результате чего активируется объем припоя внутри излучателя, где и происходит лужение деталей 2 [125].

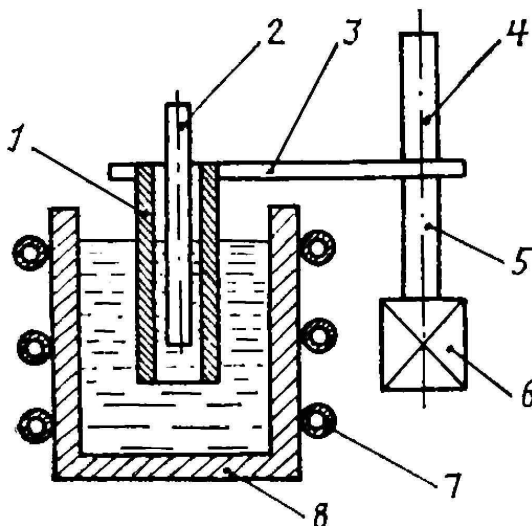


Рис. 4.20. Устройство для ультразвукового лужения длинномерных изделий: 1 – трубчатый излучатель ультразвука; 2 – обрабатываемое изделие; 3 – пластинчатый волновод; 4, 5 – волноводы; 6 – ультразвуковой преобразователь; 7 – нагреватель; 8 – ванна

В работе [126] описан способ пайки, в соответствии с которым для концентрации ультразвуковой энергии в паяемом изделии, погружаемом в ванну с припоем, между стенкой ванны и изделием располагают элемент, отражающий определенную часть ультразвуковой энергии, возбуждаемой наконечником ультразвукового инструмента, погруженного в припой.

Для малогабаритных ванн лужения используют ферритовые преобразователи ультразвука, характеризующиеся высоким электрическим к. п. д., простотой конструкции и малыми габаритами. Ферритовые преобразователи ввиду малых потерь и высокой точки Кюри могут работать в установках без систем охлаждения. Использование постоянных магнитов для подмагничивания снижает потребляемую преобразователями мощность. Для увеличения амплитуды колебаний, передаваемых в припой, волновод в установках лужения выполняют в форме ступенчатого концентратора [127].

В работе [124] описан вариант паяльной ванны (сотовой), состоящей из двух преобразователей 1 и большого количества (до 25 шт.) маленьких паяльных тиглей 2 емко-

стью 200—250 мл. Ультразвуковые колебания передаются к днищам тиглей по гибким волноводам 3 (рис. 4.21). Такая конструкция применяется при пайке и лужении малогабаритных деталей.

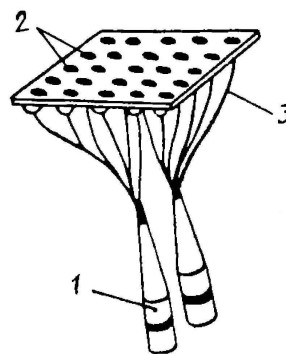


Рис. 4.21. Содовая УЗ ванна для пайки и лужения миниатюрных изделий: 1 - преобразователи; 2 – паяльные тигли; 3 – гибкие волноводы

В процессе ультразвуковой активации расплавленный припой подвергается повышенному окислению, в результате чего на его поверхности образуется пленка окислов, препятствующая лужению. Удаление пленки механическими скребками снижает производительность лужения и увеличивает расход припоя. Для уменьшения окисления припоя в ванне ее герметизируют уплотнением с образованием окна в рабочей зоне лужения, куда припой подается в момент лужения [128], либо подают инертный или восстановительный газ на поверхность припоя [129].

Помещением ультразвукового волновода и ванны с припоем в герметичный корпус, куда через специальный ввод подается инертный газ, достигают полной защиты расплавленного припоя от окисления и высокого качества лужения равномерным слоем. Время воздействия ультразвуковых колебаний на расплав припоя выбирают не более 2 с [130].

Точное позиционирование наконечника ультразвукового инструмента на объекте пайки осуществляют с применением иглы-индикатора, воздействующей на датчик, включающий подачу ультразвуковых колебаний в момент совмещения наконечника с объектом пайки. При этом возвратно-поступательное перемещение инструмента может быть механизировано, что позволит устранить ручной труд на операции ультразвуковой пайки и поручить оператору лишь функции контроля [131].

Для высокотемпературной ультразвуковой пайки разработана установка с локальным индукционным нагревом в высоком вакууме металлических деталей, в том числе из нержавеющей стали. Передача ультразвуковых колебаний от магнитострикционного преобразователя с частотой 44 кГц осуществляется гибким акустическим волноводом, представляющим собой пучок тонких металлических проводников, концы которых запаяны в наконечники. Ввод колебаний внутрь камеры обеспечивается фланцем с акустической развязкой, выполненной в виде четвертьволнового и полуволнового стаканов. Качество паяных соединений улучшается за счет дозированного внесения припоя в зону пайки с помощью манипулятора [132].

Анализ современных конструкций устройств для ультразвуковой пайки и металлизации показывает, что они еще не обеспечивают высокой производительности процессов, требуемой при серийном или массовом типах производства изделий радиоэлектроники. В большинстве конструкций устройств используются магнитострикционные преобразователи, имеющие значительные потери и габариты, требующие принудительного охлаждения. Перспективным направлением при разработке ультразвукового технологического оборудования является использование пьезоэлектрических преобразователей, питаемых от ши-

рокодиапазонных генераторов колебаний. Высокое качество пайки и металлизации можно достигнуть, лишь обеспечив высокую интенсивность и равномерность кавитации в рабочем объеме, а также надежные средства для измерения параметров ультразвукового воздействия.

4.6. СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Частота, амплитуда колебаний и интенсивность ультразвука, которые в процессе пайки необходимо контролировать,— основные параметры ультразвука, определяющие технологические режимы ультразвуковой пайки.

Частота ультразвука определяется двумя способами: измерением частоты электрических колебаний, генерированных ультразвуковым источником, и частоты механических упругих колебаний непосредственно в озвучиваемой среде. В первом способе используют серийно выпускаемые приборы — частотомеры, подключаемые непосредственно к ультразвуковому генератору, во втором применяют специальные датчики преобразующие механические колебания среды в электрические сигналы, которые затем регистрируются обычными частотомерами.

Амплитуду ультразвуковых колебаний измеряют также серийно выпускаемыми приборами на основе оптических, пьезоэлектрических и индуктивных датчиков [97]. Однако они имеют невысокую точность измерения и не позволяют осуществлять непрерывное измерение амплитуды колебаний ультразвуковых инструментов в процессе выполнения технологических операций пайки. Эти недостатки устранены в разработанном в Минском радиотехническом институте виброметре, в основу которого положен принцип регистрации амплитуды по изменению величины емкости между неподвижной поверхностью датчика и рабочей частью инструмента, колеблющейся с ультразвуковой частотой [133].

На рис. 4.22 приведена электрическая структурная схема виброметра, состоящего из емкостного датчика (Сд), выносного генератора (У1) и блока преобразования сигнала (У2—У4). Емкостный датчик выполнен в виде кольца, охватывающего свободную часть ультразвукового инструмента. Выносной генератор, собранный по схеме емкостной трехточки, с эмиттерным повторителем размещается в непосредственной близости от датчика и соединяется с ним кабелем. Наличие эмиттерного повторителя обеспечивает низкое выходное сопротивление и уменьшает влияние последующих каскадов схемы на работу генератора.

Частотно-модулированный сигнал генератора с глубиной модуляции, пропорциональной измеряемой амплитуде, подается по коаксиальному кабелю на блок преобразователя сигнала, который состоит из двухкаскадного резонансного усилителя высокой частоты (У2), частотного детектора (У3), усилителя низкой частоты (У4), амплитудного детектора с измерительной головкой и блоком питания (У5).

Избирательные контуры усилителя высокой частоты настроены на несущую частоту генератора 10 МГц, что позволяет исключить влияние на показания прибора наводок ультразвуковой частоты. Кроме того, из-за большого коэффициента усиления (порядка 3000) во втором каскаде усилителя высокой частоты происходит ограничение сигнала, что позволяет избежать влияния «паразитной» амплитудной модуляции на работу частотного детектора, резонансный контур которого также настроен на частоту 10 МГц. Переменная составляющая детектированного сигнала, пропорциональная измеряемой амплитуде, подается на вход усилителя низкой частоты. Постоянная составляющая выходного напряжения частотного детектора используется для установки зазора между датчиками и инструментом.

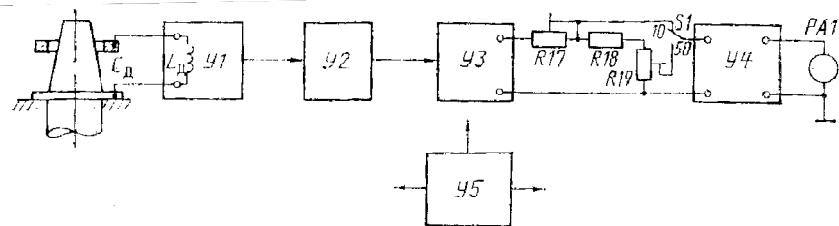


Рис. 4.22. Структурная схема прибора для измерения амплитуды УЗ колебаний

Прибор имеет два поддиапазона измерений (10 и 50 мкм), которые выбираются с помощью переключателя Si. Резисторы R17, R18, R19 предназначены для калибровки шкалы прибора в пределах поддиапазонов. К прибору можно подключать низкоомный осциллограф для визуального наблюдения формы колебаний инструмента. Питание схемы осуществляется от стабилизированного источника питания с выходным напряжением 11В. Диапазон измеряемых прибором амплитуд смещений $0—50 \cdot 10^{-6}$ м, погрешность измерений не более 2%, потребляемая мощность 0,45 Вт, масса 2,5 кг (рис. 4.23).

Как правило, ультразвуковая пайка проводится в кавитационных режимах. Существующие способы и устройства для измерения интенсивности ультразвука при пайке в кавитационных режимах могут быть систематизированы на две группы:

1) способы и устройства для измерения мощности ультразвуковых колебаний [134—136];

2) способы и устройства для измерения параметров явлений, сопровождающих кавитацию [97, 137—141].

Интенсивность ультразвуковых колебаний может быть измерена калориметрами [134] или термоакустическими приемниками [135]. Калориметр представляет собой сосуд с хорошей теплоизоляцией и звукопроницаемым окном для ультразвуковых колебаний внутрь сосуда. Интенсивность ультразвука определяется путем измерения скорости изменения температуры поглотителя термического приемника или путем измерения скорости поднятия жидкости по капилляру при ее нагревании в калориметре. Нижний частотный предел измерений интенсивности ультразвуковых колебаний калориметрами определяется их объемом, так как при снижении частоты уменьшается коэффициент поглощения и для обеспечения полного поглощения необходимо увеличивать объем теплопоглотителя. Верхний частотный предел измерений калориметрами зависит от появления кавитации в рабочей жидкости прибора, так как при кавитации объем жидкости изменяется не по закону теплового расширения. Калориметры могут измерять интенсивность ультразвуковых колебаний в диапазоне $(0,05—3,0) \cdot 10^4$ Вт/м². Общим недостатком калориметров является искажение их показаний при кавитации из-за покрытия газовыми пузырьками наружной стороны звукопроницаемого приемного окна, что приводит к экранированию ультразвуковых колебаний.



Рис. 4.23. Внешний вид виброметра

Термоакустические приемники используются для измерения интенсивности и мощности ультразвуковых колебаний в жидкости. В этом случае термоакустический приемник представляет собой щуп, на конце которого смонтированы термисторы. Диапазон измеряемых интенсивностей $(0,01 - 10) \cdot 10^4$ Вт/см². Термоакустический приемник для измерения мощности представляет собой пластину со звукопоглощающим слоем, на которой закреплены термочувствительные элементы. Термоакустические приемники в большей степени пригодны для измерения мощности или интенсивности ультразвуковых колебаний в режиме кавитации, чем калориметры, поскольку имеют возможность вывода информации на стрелочный прибор, что удобно для персонала, обслуживающего ультразвуковые установки. Недостатком является длительность проведения измерений, которая зависит от времени нагрева жидкости ультразвуковыми колебаниями.

Интенсивность ультразвуковых колебаний можно рассчитать по значению амплитуды колебаний излучателя [134]

$$I = 0.5A^2W^2\rho C_3 \quad (4.12)$$

Определение интенсивности, таким образом, в режимах кавитации приводит к ошибкам, так как в формуле (4.12) используется волновое сопротивление некавитирующей среды. Определение волнового сопротивления кавитирующей среды сопряжено со значительными трудностями. Контролировать энергетический режим работы ультразвуковых установок можно и по амплитуде колебаний излучателя без определения интенсивности. Однако такой способ не позволяет выбрать оптимальный режим работы ультразвукового технологического оборудования с точки зрения получения максимальной равномерности кавитационного поля.

Устройства, регистрирующие мощность на основе измерения звукового давления и колебательной скорости среды, реализуют зависимость [136]

$$I = P_a \cos \omega t [V_a \cos (\cos (\omega t + \varphi))].$$

Такие устройства состоят из сферического пьезоэлемента для измерения давления, внутри которого размещены два акселерометра. Электрический сигнал сферического

пьезоэлемента и проинтегрированные сигналы акселерометров поступают на умножающее устройство, сигнал с которого пропорционален интенсивности.

Рассмотренные способы и устройства могут использоваться для контроля и измерения энергетического режима работы ультразвуковых технологических установок, однако мощность или интенсивность ультразвука, измеренные на частоте возбуждения, не могут служить однозначным критерием эффективности воздействия кавитации, которая зависит от свойств расплавленного припоя, внешних условий и других факторов. Это является главным недостатком указанных способов и устройств измерения мощности или интенсивности.

При кавитации в припое наблюдается ряд явлений, которые могут в той или иной степени характеризовать ее эффективность: разрушение твердых тел; изменение физических параметров кавитирующего расплава; ускорение химических реакций; возникновение широкополосного шума. Все методы определения эффективности воздействия кавитации можно разделить на три группы [138]:

1) тест-методы, при которых сравниваются параметры образцов до и после воздействия на них кавитации;

2) пассивные акустические методы, основанные на регистрации и специальной обработке акустических сигналов, возникающих в расплаве;

3) активные акустические методы, предполагающие зондирование кавитационной зоны внешними сигналами.

Тест-методы широко используются для определения эффективности воздействия кавитации благодаря их высокой информативности. В качестве тест-образца используют алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм. Эффективность воздействия кавитации оценивается по величине эрозии тест-образца. Недостатки тест-методов заключаются в длительности измерений и в отсутствии непрерывного контроля за процессом разрушения образца.

Так как процесс кавитации характеризуется появлением шума, средняя мощность которого линейно связана с величиной эрозии, для определения эффективности воздействия кавитации предложено использовать приборы, измеряющие интенсивность шума [134]. Такие приборы состоят из широкополосного приемника ультразвуковых колебаний, усилителя, фильтра, детектора среднеквадратичных значений и индикатора. Однако методика измерений кавитационных шумов пока не регламентирована, что не позволяет сопоставить результаты измерений эффективности кавитации различных технологических установок.

Для определения эффективности воздействия кавитации предложено использовать максимальную амплитуду кавитационных импульсов давления, которая линейно связана с убылью массы образца под воздействием кавитации. Так как высокая корреляция между убылью массы образца и амплитудным спектром кавитационных импульсов наблюдается только при стабильных условиях проведения эксперимента, использование метода для контроля энергетического режима работы ультразвуковых установок затруднительно [142].

Для определения эффективности воздействия кавитации используются методы, основанные на зондировании кавитационной области внешними сигналами в виде ультразвуковых колебаний или лазерного излучения. Однако использование этих методов в производственных условиях малоперспективно из-за сложности их реализации. К тому же они дают информацию не только о кавитирующих пузырьках, но и о любых других неоднородностях, присутствующих в жидкости, что искажает результаты измерений.

Из всех рассмотренных методов наиболее перспективными для измерения энергетических режимов работы установок ультразвуковой пайки и металлизации являются пассивные акустические методы, позволяющие определить эффективность воздействия кавитации с мгновенным выводом информации на стрелочный прибор. Кавитационное поле в жидкостях и расплавах имеет сложный спектральный состав. Помимо основной частоты и

ее гармоник nf_0 ($n=1, 2, 3, \dots$) высоких частот в спектре содержатся серии субгармоник $nf_0/2, nf_0/3, nf_0/4$. Кроме указанных частот во всем диапазоне имеет место сплошной «белый» шум, генерируемый захлопывающимися кавитационными пузырьками различных резонансных размеров. Анализ спектрограмм показывает, что максимальный прирост в кавитационном спектре при увеличении излучаемой мощности дает сплошной шум, а также субгармоники. Наибольшая спектральная плотность кавитационного шума находится в полосе частот от 20-й до 40-й гармоники основной частоты ультразвукового преобразователя.

Для оценки кавитационного давления в жидкостях предложено измерять квадрат уровня шумов в диапазоне наибольшей спектральной плотности кавитационного шума и по их величине судить о величине давления. Разработаны схемы кавитометров, состоящие из пьезоэлектрического датчика, активного фильтра, создающего крутизну среза частотной характеристики не менее 24 дБ на октаву, квадратичного детектора и регистрирующего прибора. Показания такого прибора имеют линейную зависимость от активной мощности в диапазоне 0 – 2 кВт [143].

Для определения энергетических параметров ультразвукового поля в расплавах припоев разработан лококавитометр, позволяющий измерять кавитационные давления от 5 до $3 \cdot 10^4$ Па в диапазоне частот работы ультразвуковых преобразователей 18 – 50 кГц с точностью $\pm 10\%$. Давление в кавитационной области воспринимается измерительным щупом 1 с площадью $0,8 \text{ см}^2$, соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем 2 упругим волноводом. Для измерения давления кавитации в расплавах припоев датчик снабжен нагревателем 3, который позволяет поддерживать необходимую температуру воспринимающей поверхности измерительного щупа 1 и не вносит искажений в процесс пайки (рис 4.24, 4.25) [144].

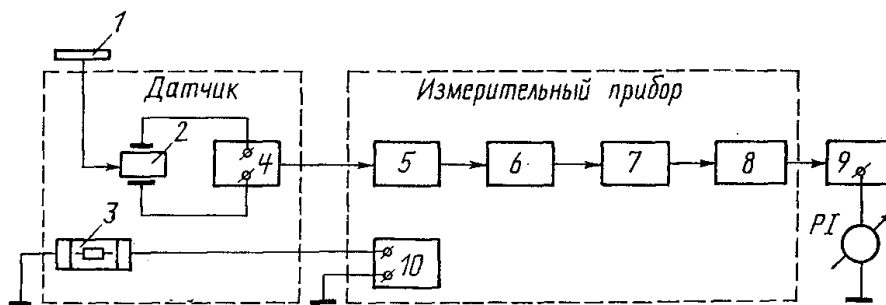


Рис. 4.24. Структурная схема лококавитометра: 1 — приемный элемент; 2 — пьезоэлектрический преобразователь; 3 — нагреватель; 4 — согласующий усилитель; 5 — аттенюатор; 6 — полосовой фильтр; 7 — усилитель; 8 — детектор; 9 — усилитель постоянного тока; 10 — блок питания

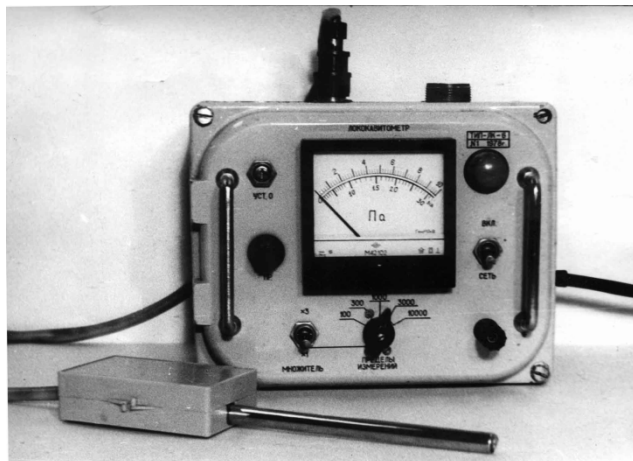


Рис. 4.25. Внешний вид лококавитометра

Лококавитометр работает следующим образом. Электрический сигнал с преобразователя 2 поступает на усилитель 4, расположенный в корпусе датчика и служащий для согласования высокоомной цепи пьезоэлектрического преобразователя со входом измерительного прибора. Атенюатор 5, расположенный на входе измерительного прибора и представляющий собой резистивный делитель напряжения на пять положений, служит для ослабления входного сигнала с датчика. Полосовой фильтр 6, выполненный по схеме фильтра Чебышева третьего порядка с полосой пропускания 100—200 кГц, выделяет часть спектра сигнала, характерную для кавитационных импульсов. После усиления сигнал проходит через цепи среднеквадратичного детектора 8, усилителя постоянного тока 9 и подается на стрелочный прибор. Блок 10 является источником питания измерительного прибора, датчика напряжением 12 В и нагревателя датчика напряжением 24 В.

Таким образом, из всех рассмотренных устройств для измерения интенсивности кавитации лококавитометр является наиболее эффективным, поскольку отличается высокой производительностью оценки интенсивности кавитации в рабочем объеме, вполне приемлемой точностью измерений в широком диапазоне давлений и частот ультразвуковых колебаний.

ГЛАВА 5

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАЙКИ

5.1. СПОСОБЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУЖЕНИЯ И ПАЙКИ

В первых научно-исследовательских работах по ультразвуковой пайке в качестве источника ультразвуковых колебаний при пайке алюминия и его сплавов использовались специальные ультразвуковые паяльники, в которых рабочая часть волновода, погруженного в припой, колебалась с частотой 16—22 кГц. Поскольку зона активной кавитации находилась в непосредственной близости от вибрирующего конца волновода, при лужении необходимо было перемещать паяльник вдоль поверхности.

Как показали исследования процесса ультразвуковой пайки, интенсивность кавитации увеличивается в низкочастотной области спектра ультразвуковых колебаний. С повышением частоты колебаний интенсивность кавитации в расплаве снижается, одновременно возрастают электромагнитные и магнитомеханические потери в преобразователях ультразвука. Уход частоты в область слышимых звуков повышает уровень шума, усложняет звукоизоляцию установок. Оптимальный частотный диапазон работы ультразвуковых технологических установок 18—44 кГц [Ш]. К факторам, обуславливающим эффективность ультразвуковой кавитации, в первую очередь относится мощность ультразвукового излучения, вводимого в расплав припоя, которая должна быть в пределах 100 Вт, и точная настройка ультразвукового инструмента на его собственную частоту. Время пайки или лужения составляет 5—10 с, скорость перемещения излучателя паяльника $(0,8 - 1,6) \cdot 10^{-2}$ м/с, а оптимальная величина зазора между торцом излучателя и паяемой поверхностью — 0,2—3,0 мм [7]. Необходимость постоянного поддержания этого зазора вызвана стремлением исключить образование макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов при их ультразвуковом лужении за счет динамического фактора ультразвука, особенно в результате возникновения жесткого акустического контакта излучателя с обрабатываемой поверхностью. Снижение динамического воздействия ультразвуковых колебаний на паяемый материал достигается путем изменения угла ввода колебаний с 90 до 30-40° или применения колебаний, параллельных паяемой поверхности. Кроме того, при применении ручного ультразвукового паяльника в процессах пайки и металлизации [145]: 1) невозможно определить оптимальную величину удельной акустической мощности, вводимой в расплав; 2) отсутствует точный контроль времени металлизации; 3) трудно поддержать наиболее эффективный угол наклона излучателя к паяемой поверхности в процессе работы. Эти недостатки вызывают значительный разброс в свойствах паяных соединений, а именно прочности сцепления припоя, что затрудняет использование процесса ультразвуковой металлизации в промышленности.

Позднее было разработано специальное ультразвуковое технологическое оборудование для пайки и металлизации изделий. Ультразвуковая установка для пайки и металлизации УММ-1 состоит из следующих основных элементов (рис. 5.1) [146]: ультразвукового генератора УМ-1-04 с излучателем магнестрикционного типа 4, электрических нагревателей изделия и инструмента 1—3, модернизированного металлообрабатывающего станка, на котором размещена система крепления и поворота преобразователя. В процессе металлизации вследствие нагрева преобразователя изменяется его резонансная частота, что приводит к уменьшению ультразвуковой энергии, вводимой в расплав. Для устранения этого явления в установке введена обратная связь. Настройка генератора на резонансную частоту излучателя, а также контроль высокочастотной мощности на выходе генератора осуществлялись с помощью вольтамперваттметра Т41/1. Нагреватели деталей и инструмента снабжены системой контроля, регулирования и стабилизации температуры с точностью $\pm 1\%$. Применение установки позволило определить и поддерживать оптимальные

параметры процесса ультразвуковой металлизации изделий из сплавов ВТ5-1 и АМГ-6.

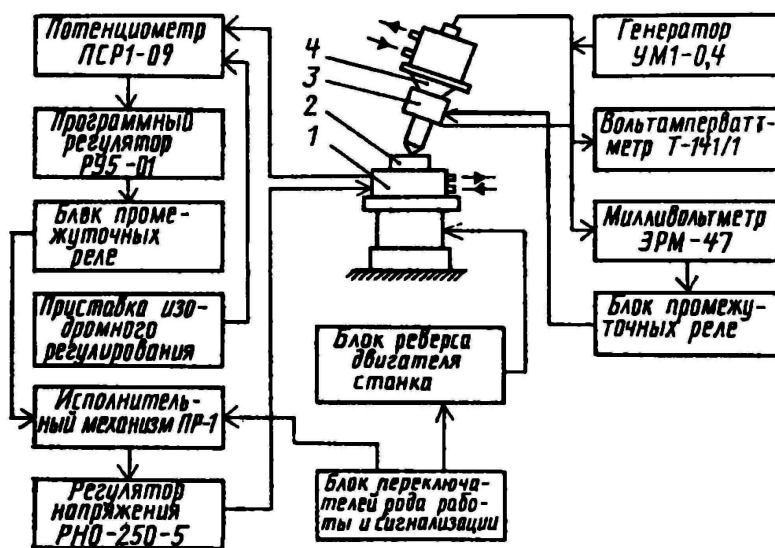


Рис. 5.1. Схема установки ультразвуковой металлизации УММ-1

Увеличение эффективности отделения окисной пленки с алюминия и его сплавов было достигнуто путем введения в расплав оловянно-цинкового припоя от 1—2 до 7—8% ферротитановых опилок с размером зерен 0,5—0,8 мм [147]. Для выявления механизма ультразвукового лужения и исследования количественных соотношений между кавитационной и абразивной эрозией были проведены опыты по лужению образцов из алюминиевого сплава АМЦ на экспериментальной установке (рис. 5.2) [148]. От генератора ультразвука 8 и источника подмагничивания 9 на магнитоstrictionный преобразователь 1 подавалось напряжение частотой 18—22 кГц. Ультразвуковые колебания посредством концентратора 2 передавались ванне лужения 3, где находился расплавленный припой при контролируемой температуре. В качестве приемника ультразвука применялся щуп с пьезоэлектрическим датчиком 4, сигнал с которого поступал на усилитель 5, анализатор спектра 6 и самописец 7. Возникновение кавитации в припое отмечалось появлением сигнала со сложным спектром на экране анализатора.

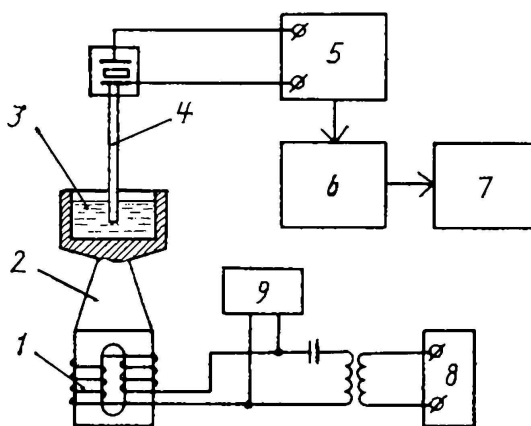


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки для исследования кавитационно-абразивного лужения

Изучение изменения весового коэффициента эрозии при ультразвуковом лужении алюминия в ванне с припоем, содержащим в качестве абразива опилки ферротитана, показало, что кроме кавитационной возможна также абразивно-кавитационная эрозия. Глубина общей эрозии образца в этих условиях возрастала от 0,50 до 0,76 мм. На графике зависимости ультразвукового давления в расплаве припоя от амплитуды колебаний видно, что в расплаве возникают две области состояния жидкого припоя: докавитационная I и кавитационная II (рис. 5.3) [20]. Обычное ультразвуковое лужение происходит при режимах, соответствующих области II при интенсивности $(10,8—11,6) \cdot 10^5$ Вт/м². При введении в расплав абразива лужение алюминия с применением ультразвука возможно и в области I при интенсивностях $(2—8) \cdot 10^3$ Вт/м². При этом кавитационный процесс возникает у поверхности образца и не наблюдается во всем расплаве. Вероятной причиной этого является снижение прочности расплава ввиду наличия в нем абразивных частиц, что вызывает кавитацию при меньшей подводимой мощности ультразвуковых колебаний.

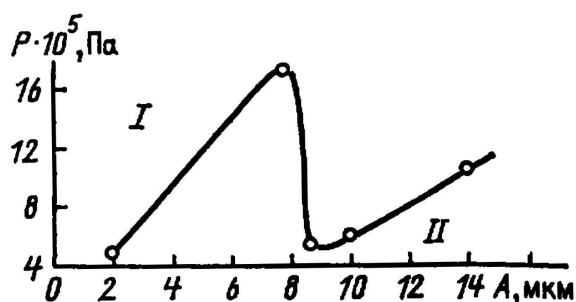


Рис. 5.3. Зависимость УЗ давления в расплаве припоя от амплитуды колебаний

Для пайки плат печатного монтажа волной припоя с применением ультразвука разработана установка, позволяющая возбуждать в волне припоя ультразвуковые колебания амплитудой до 20 мкм и направлять их перпендикулярно плоскости паяемых плат. В этой установке конструктивно «развязаны» акустическая система и устройство создания волны припоя, а также обеспечена регулировка ширины волны припоя в широких пределах, подача на волну припоя защитной пленки жидкости, предохраняющей его от окисления, и измерение амплитуды колебаний излучателей непосредственно в процессе пайки [149].

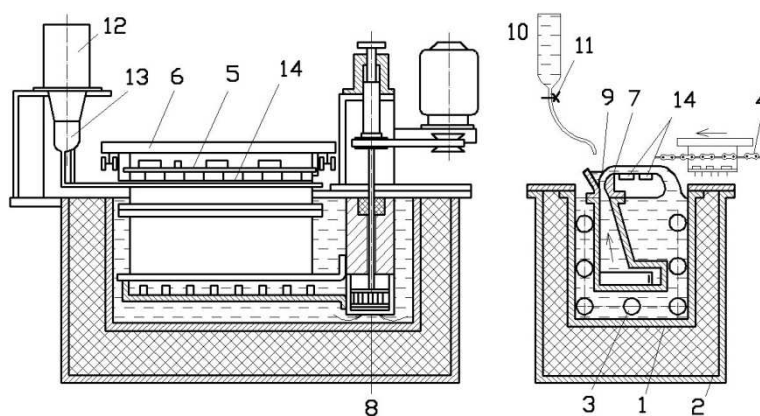


Рис. 5.4. Установка УЗ пайки плат волной припоя: 1—ванна с припоем, 2—теплоизолирующая камера, 4— транспортер, 5—платы, 6—приспособление для закрепления плат, 7—сопло, 8—насос, 9—паз для защитной жидкости, 10—сосуд, 11—кран, 12—УЗ преобразователь 13— волновод продольных колебаний, 14—волновод изгибных колебаний

На рис. 5.5, а показано влияние амплитуды колебаний на скорость смачивания плат,

покрытых флюсом ФКСп, 1, без покрытия 2 и без ультразвука 3 при расстоянии до излучателя 1,5 мм и температуре припоя 523 К. Наложение ультразвуковых колебаний в процессе пайки с флюсом позволяет увеличивать скорость смачивания в 1,5—2 раза. Повышение активности флюса происходит только в период действия ультразвука. Этот способ активации волны припоя ультразвуковыми колебаниями дает незначительные преимущества при больших энергетических затратах. Так как в настоящее время медные поверхности печатных плат покрываются легкопаяемыми покрытиями (горячее лужение, покрытие припоем ПОСВЗЗ и т. д.), используются водорастворимые флюсы, отличающиеся большей активностью, чем спиртоканифольный, применение способа ограничено.

Минимальное время контакта исследуемой платы с расплавленным припоем, за которое происходит полное ее смачивание, определялось по максимальной линейной скорости перемещения платы относительно волны припоя. Как видно из рис. 5.5, б, скорость смачивания медных плат при температуре припоя 523 К уменьшается с увеличением расстояния от платы до излучателя, что объясняется поглощением ультразвуковых колебаний расплавом припоя. Сопоставляя скорости смачивания в ультразвуковом поле 1 или с флюсом 2, можно сделать вывод, что для медных, не покрытых припоем плат условия пайки оптимальны при расстоянии от излучателя не более 1 мм и амплитуде смещений излучателя 10 мм.

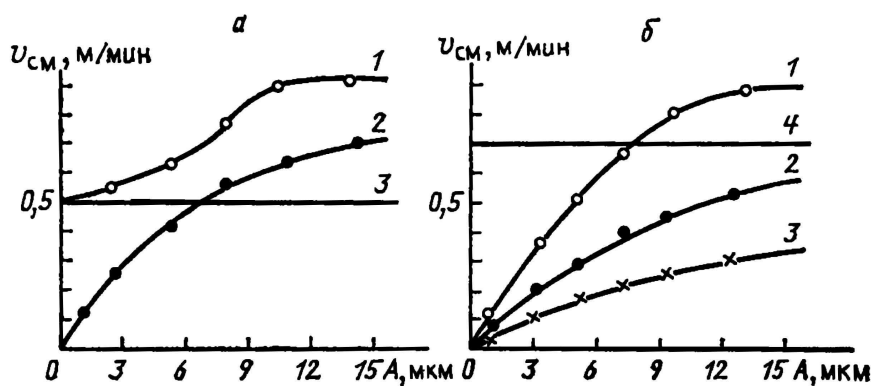


Рис. 5.5. Зависимость скорости смачивания плат: а – от амплитуды ультразвуковых колебаний (1 – с флюсом; 2 – без флюса; 3 – без ультразвука); б – при различных расстояниях плат от излучателя (1 – 1,5 мм; 2 – 3,0; 3 – 4,5 мм; 4 – с флюсом)

Ультразвуковое лужение и пайка применяются в технологических операциях сборки полупроводниковых приборов, например при посадке кристалла на корпус. Обычная флюсовая пайка вследствие трудности удаления остатков флюса ухудшает электрические параметры приборов, в результате чего брак составляет до 12% и более. Разработана установка ультразвукового лужения мест под напайку кристаллов полупроводниковых приборов средней и большой мощности, в которой припой переносится из ванночки на облуживаемый участок изделия с помощью наконечника инструмента за счет сил поверхностного натяжения. Лужение проводится в импульсном режиме в течение 1,5 с при мощности, подводимой к преобразователю, 140 Вт. Пайка кристаллов происходит сразу же после облуживания. Отрицательного влияния ультразвукового лужения на параметры и срок службы приборов не обнаружено [150].

Ультразвуковое лужение деталей можно осуществлять путем создания волны припоя высотой до 5 мм в жидком припое при интенсивности колебаний до $35 \cdot 10^3$ Вт/м², которая достигается за счет применения пьезоэлектрических преобразователей, а также последовательного соединения двух акустических трансформаторов скорости. Этим способом проводилось лужение окисленных медных поверхностей печатных плат, что позволило облуживать до 80% площади плат, находящихся в области воздействия ультразвука

[151].

Подача ультразвуковых колебаний большой интенсивности в расплав припоя, воздействие колебаний на весь его объем в ванне вызывают повышенное окисление припоя, причем наибольшее шлакообразование происходит у дна стенок ультразвуковых ванн. Образующиеся окислы создают демпферный слой, поглощающий определенную долю ультразвуковых колебаний, в результате чего качество лужения снижается. Необходимость удаления шлакового демпферного слоя скребком и повторное залуживание стенок увеличивают трудоемкость процесса лужения и приводят к повышенному расходу припоя. В работе [152] предложено подавать ультразвуковые колебания непосредственно на облуживаемые детали, погружаемые в расплав припоя, например на шасси телевизоров для лужения лепестков. При этом снижается акустическая мощность, необходимая для лужения, и уменьшается окисление припоя. Однако такой способ можно применять лишь для металлических деталей сравнительно простой конструкции (лепестки, уголки и т. д.), поскольку для деталей сложной геометрической формы наблюдаются суперпозиция волн и интерференционные явления, вследствие чего невозможно достичь равномерного смачивания припоем. Кроме того, подача ультразвуковых колебаний непосредственно на облуживаемые электрорадиоэлементы может привести к их повреждению из-за возникновения механических резонансов. Лужение выводов полупроводниковых приборов и интегральных схем в технологии радиоэлектронной аппаратуры применяется при их подготовке к пайке. Однако существующие технологические процессы лужения не обеспечивают высокого качества из-за снижения паяемости гальванических покрытий выводов и невысокой химической активности применяемых спиртоканифольных флюсов.

Как показали исследования процесса бесфлюсового лужения выводов интегральных схем в расплавах припоев ПОС61 и ПОСК50-18 с применением ультразвуковых колебаний частотой $44 \pm 0,15$ кГц и амплитудой 9 ± 1 мкм, температура нагрева выводов увеличивается на 10—16 К, что равносильно повышению температуры припоя на 20—30 К. Это позволяет снизить температуру лужения до 473 К, благодаря чему значительно облегчается защита припоя от окисления. Полная защита расплавленного припоя от окисления достигается созданием защитной среды в зоне лужения, например аргона в количестве $3 \cdot 10^{-5}$ м/с. Расстояние между излучающей поверхностью волновода и выводами интегральной схемы в процессе лужения должно быть не более 1,5—2,0 мм. Применение ультразвукового бесфлюсового лужения для выводов микросхем исключает их флюсование и последующую очистку, в результате чего трудоемкость работ снижается на 50—70% [153].

Процесс ультразвукового лужения деталей и элементов; РЭА испытан в модернизированной ультразвуковой ванне УЗВЛ-0,4, в которой за счет использования конического концентратора с коэффициентом трансформации 2,5 интенсивность ультразвуковых колебаний увеличилась в 1,5 раза. Для стабилизации температуры припоя был применен блок измерения и регулирования температуры, состоящий из прибора МЗОЗК, термодпары ХК и силового реле типа МКУ [123]. Интенсивность кавитации в расплавленном припое измеряли с помощью кавитометра и выносного пьезоэлектрического датчика, щуп которого при измерениях погружали в расплав припоя. Как показал анализ экспериментальных зависимостей, интенсивность кавитации P_K ; в расплаве припоя ПОС61 на резонансной частоте преобразователя 20,5 кГц линейно зависит от выходного напряжения ультразвукового генератора, т. е. от вводимой в расплав мощности ультразвука (рис. 5.6, а). Интенсивность кавитации достигает максимального значения на дне ванны и нелинейно падает при увеличении расстояния h от дна, являющегося мембраной преобразователя (рис. 5.6, б). Ультразвуковое лужение выводов резисторов типа МЛТ, микросхем типа 1ЛБ, конденсаторов К50, К53, диодов 2Д503А, блоков резисторов Б20, имеющих неудовлетворительную паяемость и требующих ручной зачистки, позволило в течение 2 с полностью восстановить их паяемость и получить ровный блестящий слой припоя на выводах [123].

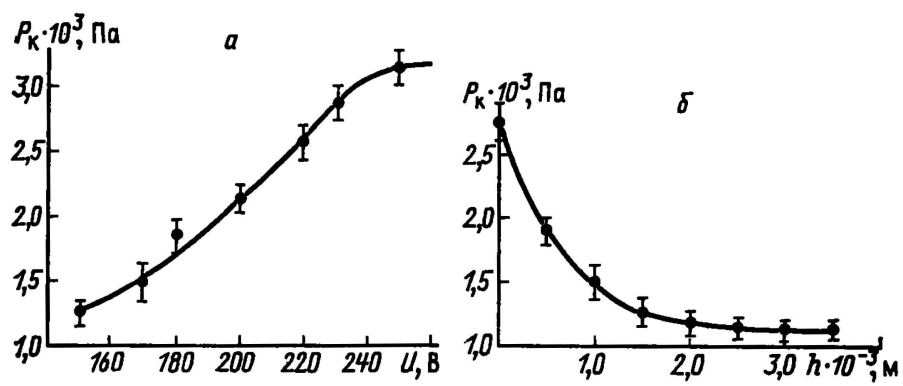


Рис. 5.6. Зависимости интенсивности кавитации в расплаве припоя от напряжения на выходе генератора (а) и расстояния до дна ванны (б)

При выполнении паяных соединений в процессах сборки полупроводниковых приборов и интегральных схем в зоне соединения контактируемых миниатюрных элементов возбуждают поверхностные акустические волны ультра- и гиперзвуковой частоты, длина которых не превышает суммарной толщины соединяемых элементов. Для повышения качества соединений используют различные сочетания акустических волн Рэля, Лэмба, Лява, Сезава, Стоили или электроакустические волны Гуляева — Блюстейна. Поверхностные акустические волны возбуждаются либо с помощью специального широкополосного пьезоэлектрического преобразователя либо с помощью СВЧ-резонатора, в пучности электрического или магнитного поля которых помещены тонкие пьезоэлектрические или магнитоstrictionные пленки [154].

Бесфлюсовую пайку и лужение изделий из алюминия и его сплавов осуществляют с использованием ультразвуковых колебаний в режиме бегущей волны при постоянной амплитуде и переменной частоте. С целью повышения производительности процесса и улучшения качества лужения частоту изменяют в пределах от $f_{\min} = \frac{4c}{\lambda} \cdot \frac{1}{n}$ до $f_{\max} = \frac{4c}{\lambda}$,

где c — скорость распространения ультразвуковой волны в материале изделия; λ — длина волны; n — целое нечетное число. При создании режима бегущей волны не возникает узлов и пучностей амплитуд смещений вдоль паяемой поверхности, что улучшает равномерность смачивания поверхности изделия по всей ее площади [155].

В схеме ультразвуковой бесфлюсовой пайки плат к основанию корпуса микросборки (рис. 5.7) корпус 3 устанавливался между двумя ультразвуковыми системами, расположенными соосно друг против друга. Для надежной передачи энергии ультразвуковых колебаний корпусу волноводы 2 обеих систем были прижаты к нему с усилием 100—150 Н. Напряжение ультразвуковой частоты от генератора УЗГ-3-0,4 мощностью 400 Вт поступало на обмотки магнитоstrictionных преобразователей 1, соединенные последовательно. Преобразователи настраивались на резонансную частоту 21,3 кГц путем применения параллельной схемы компенсации их реактивного сопротивления. Корпус нагревался инфракрасным излучением от двух кварцевых галогенных ламп КИ-220-1000 5, закрепленных в диффузных отражателях. В процессе пайки к плате 4 прикладывалось внешнее статическое давление величиной 1—5 Н, создаваемое подпружиненными штырьками в четырех точках платы. Внешний вид установки УЗ пайки микроплат в корпуса микросборок и многофункциональных модулей приведен на рис.5.8.

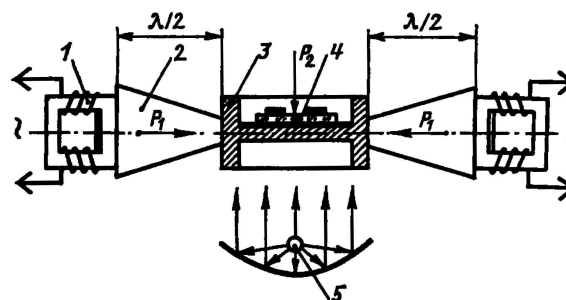


Рис. 5.7. Схема УЗ бесфлюсовой пайки подложек ГИС в корпусе микросборок



Рис. 5.8. Установка УЗ пайки микроплат в корпусе микросборок

Степень смачиваемости плат S_{II}/S_0 исследовалась в зависимости от факторов ультразвукового воздействия (амплитуды и частоты колебаний, времени воздействия ультразвука) и технологических (температуры пайки, усилия прижима плат к корпусу, толщины прокладки дозированного припоя) [156]. В результате исследования зависимости степени смачиваемости от амплитуды ультразвуковых колебаний установлено, что достаточно хорошее смачивание для всех типов покрытий и припоев достигается при амплитуде ультразвуковых колебаний, равной 10 мкм, что соответствует выходному напряжению генератора 50В и току подмагничивания 2 А. При увеличении амплитуды колебаний до 20 мкм возрастания степени смачивания не происходит, так как при значительной интенсивности ультразвуковых колебаний, вводимых в припой, интенсифицируются и процессы окисления припоя. При амплитуде выше 20 мкм возможно распыление припоя в местах пучностей колебаний и загрязнение им поверхности плат. Поэтому рекомендуемая амплитуда ультразвуковых колебаний должна находиться в пределах 10—15 мкм. Контроль амплитуды колебаний можно осуществлять оптическим методом на микроскопе с увеличением в 200 раз и более или с помощью виброметров.

Высокая смачиваемость паяемой поверхности микрополосковых плат получена при воздействии ультразвуковых колебаний в течение 15с на резонансной частоте преобразователя. Изменение частоты колебаний на величину, соответствующую $\lambda/16$, снижает кавитационное давление в припое с 6 до 2,8 кПа, однако этого давления достаточно для эффективного удаления окисных пленок. Оптимальное усилие прижима микрополосковых плат к основанию корпуса составило для припоя ПОС61 3—5Н в интервале температур процесса пайки 493—513К, для припоя ПОИ50—1—2Н при 433—453К (рис. 5.9). Разработанный способ ультразвуковой бесфлюсовой пайки микрополосковых плат в режиме бегущей волны при постоянной амплитуде и переменной частоте колебаний обеспечивает высокую производительность процесса и не оказывает отрицательного влияния на рабочие параметры изделий.

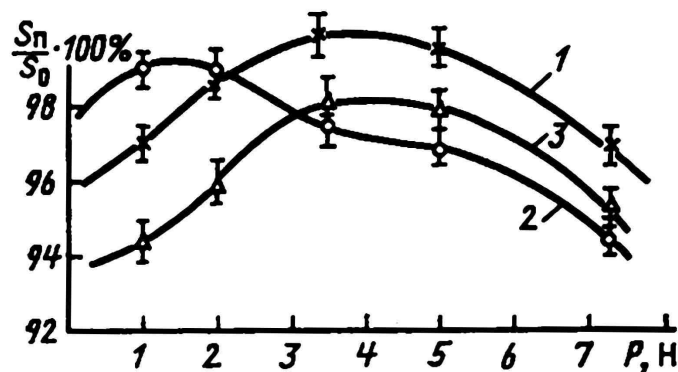


Рис. 5.9. Зависимости степени смачиваемости подложек припоем от усилия прижима их к корпусу микросборки: 1 – покрытие олово – висмут, припой ПОС-61; 2 – припой ПОИ-50; 3 – покрытие золотом, припой ПОС-61

5.2. ПОДГОТОВКА ПАЯЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЛУЖЕНИЕМ И ПАЙКОЙ

Химическая чистота поверхности, подвергаемой пайке, - один из важных факторов, обеспечивающих высококачественную ультразвуковую пайку, который не всегда учитывают. Она гарантирует полное смачивание поверхности расплавом припоя и образование физического контакта между паяемой поверхностью и припоем, что является необходимым условием для протекания процессов химического взаимодействия между основным металлом и припоем и образованием прочных связей между ними. Однако вопрос о необходимости подготовки паяемых поверхностей к ультразвуковой пайке до сих пор остается дискуссионным. Авторы работ [7,157] считают, что в результате интенсивной кавитации захлопывающиеся кавитационные полости создают ударные волны с давлением до 10^5 МПа, которые разрушают пленки окислов и загрязнений на паяемой поверхности. Возникающие в кавитационной области микропотоки уносят частицы окислов и загрязнений из зоны пайки. Таким образом, кавитационные явления, разрушая окисные пленки, очищают и активируют поверхность основного металла, улучшая смачивание ее жидким припоем. В работах [2, 6, 113] указывается на необходимость предварительной обработки: удаления ржавчины, раковин, царапин, следов краски, загрязненности маслами и т. д.

Поскольку при ультразвуковой очистке происходит не только механическое разрушение пленок загрязнений пол, действием кавитации, но и ускоряется процесс химического взаимодействия моющей жидкости с загрязнением под действием акустических течений, предложено классифицировать» все загрязнения по трем основным признакам [11]:

- 1) способности противостоять микроударным нагрузкам;
- 2) прочности связи пленки загрязнений с очищаемой поверхностью;
- 3) характеру взаимодействия с моющей жидкостью.

По первому признаку загрязнения подразделяются на кавитационно-стойкие и кавитационно-нестойкие, по второму — на прочно и слабо связанные с очищаемой поверхностью, по третьему — на химически взаимодействующие и не взаимодействующие с моющей жидкостью. Согласно данной классификации, жировые пленки относятся к числу кавитационно-стойких, слабо связанных с очищаемой поверхностью, химически взаимодействующих с моющей жидкостью.

В процессе ультразвуковой очистки в моющей жидкости под действием микроударного воздействия кавитационных. пузырьков, локальных микропотоков у очищаемой поверхности происходит отслоение и растворение жировых загрязнений в моющей среде. Интенсификация процесса растворения в ультразвуковом поле учитывается с помощью двух коэффициентов кавитационной диффузии: молекулярного D_{mk} , определяющего перенос вещества микропотоками в диффузионном слое, и конвективного D_{kk} , определяющего

щего перенос вещества макропотоками. В пределах диффузионного слоя перенос описывается уравнением [158]

$$v_x = \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial x} = D_{\Sigma} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2},$$

где v_x , v_y —тангенциальная и нормальная составляющие скорости потока к поверхности раздела фаз; C — концентрация; x , y — координаты; D_{Σ} — суммарный коэффициент D_{mk} и D_{kk} . При постоянстве энергетического режима ультразвуковой очистки во времени и равномерности кавитационного поля в пространстве с учетом незначительного вклада конвективной составляющей время очистки T можно определить так:

$$T = \frac{\rho h}{C_S K_{mk}},$$

где ρ — удельная плотность загрязнений; h — средняя высота слоя загрязнений; C_S —концентрация насыщения; K_{mk} — коэффициент скорости растворения вещества микропотоками в диффузионном слое. Одновременно воздействие микропотоков, обусловленных кавитацией, интенсифицирует в жидкости процесс очистки и обеспечивает удаление загрязнений с труднодоступных для растворителя участков изделий.

Анализ процессов, происходящих при воздействии ультразвуковых колебаний на расплав припоя (см. гл. 1), позволяет выявить их различие по сравнению с механизмом ультразвуковой очистки в моющей жидкости. В первую очередь необходимо учитывать температурный фактор, в результате которого жировые загрязнения и лаковые пленки превращаются в кавитационно-стойкий нагар, прочно связанный с очищаемой поверхностью загрязнением, химически взаимодействующим только с агрессивными жидкостями.

При ультразвуковой очистке в объеме ванны реализуется близкая к однородному значению интенсивность кавитации. Увеличение же вязкости среды в случае использования расплава припоя приводит к увеличению декремента затухания колебаний, в результате чего необходимо уменьшать расстояние между паяемой поверхностью и излучателем до 2—5 мм. Ограниченная рабочая поверхность волноводов, излучающих колебания в припое, приводит к появлению в нем градиента интенсивности ультразвука, что отрицательно сказывается на процессе разрушения окисных пленок и загрязнений. Если в непосредственной близости от излучающего торца волновода одновременно будут происходить удаление окисных пленок и эрозия паяемой поверхности за счет интенсивного микроударного воздействия кавитации, то за пределами участка поверхности, определяемого проекцией излучающей поверхности волновода на обрабатываемую поверхность детали, интенсивность кавитационных процессов будет резко снижена и поэтому недостаточна для эффективного удаления как окисных пленок, так и загрязнений. Перемещение излучающего волновода вдоль паяемой поверхности позволяет в некоторой степени устранить этот недостаток, однако высокой равномерности обработки это не обеспечивает, зато увеличивается время обработки.

Увеличение плотности и вязкости жидкой среды приводит также к ограничению размеров ультразвуковых течений и макропотоков и ослаблению их интенсивности. Область действия локальных микропотоков ограничивается до 5—7 мм в зависимости от интенсивности ультразвука. Расплав припоя не вступает в химическое взаимодействие с поверхностными загрязнениями на обслуживаемых изделиях, что также затрудняет удаление загрязнений.

Таким образом, из сказанного следует, что для обеспечения надежности и долговечности паяных соединений, получаемых в ультразвуковом поле, необходимо проведение определенных подготовительных работ, характерных для операций обычной пайки и связанных с предварительной тщательной очисткой паяемых поверхностей от различных загрязнений.

Механическая очистка поверхности крупногабаритных изделий от ржавчины и грубых окислов может осуществляться гидропескоструйной обработкой, пневматической об-

работкой чугунами опилками или абразивными зернами, металлическими щетками. Шероховатость паяемой поверхности после механической очистки повышается, что способствует увеличению площади контакта основной металл — припой и улучшению сцепления между ними. Однако механические способы не применимы для очистки микроминиатюрных деталей и компонент РЭА и приборов. Подготовка к пайке включает также обезжиривание, которое обеспечивает полное удаление жировых пленок. Для обезжиривания стальных деталей чаще всего используют горячие щелочные растворы, например 10%-ный раствор едкого натра при температуре 343—353 К. Детали из меди и медных сплавов обезжиривают в ваннах следующего состава: тринатрийфосфат — 50 г/л, кальцинированная сода — 50, жидкое стекло — 15 г/л при температуре 333—353 К в течение 1—30 мин в зависимости от состояния поверхности. Для электрохимического обезжиривания алюминия применяют электролиты, включающие по 20 г/л углекислого натрия и тринатрийфосфата. Однако эти химические реактивы в технологии РЭА и приборов применять не рекомендуется из-за их химической активности, приводящей к коррозии.

Обезжиривание деталей РЭА и приборов осуществляют в органических растворителях, например в спиртобензиновой смеси, трихлорэтилене, ацетоне, четыреххлористом углероде. Эти растворители хорошо растворяют жировые пленки, легко поддаются регенерации, не способствуют коррозии изделий, однако вследствие токсичности и пожароопасности требуют специальных условий работы. Составы ванн и режим химического обезжиривания различных металлов и сплавов приведены в работе [90]. Ускорение процесса очистки от жировых загрязнений и повышение ее качества достигается применением ультразвуковых колебаний [158, 159].

5.3. ВЛИЯНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПАЯЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Гальванические покрытия сплавами на основе олова, никеля, серебра, золота и других металлов широко используются в технологии радиоэлектронной аппаратуры и приборов для защиты поверхности токоведущих деталей и, в частности, выводов изделий электронной техники от воздействий окружающей среды, а также для обеспечения их паяемости. Паяемость характеризует способность паяемого материала вступать в физико-химическое взаимодействие с расплавленным припоем и образовывать надежное паяное соединение. С точки зрения технологии пайки паяемость — это отношение паяемых материалов и припоя к основным процессам, происходящим при пайке (нагрев, плавление, смачивание, капиллярное течение, растворно-диффузионное взаимодействие, кристаллизация и др.). Таким образом, паяемость зависит не только от физико-химической природы металлов и припоя, но и от способа и режима пайки, от флюсующих сред, условий подготовки паяемых поверхностей и т.д. [159].

Для образования спая необходимо и достаточно смачивания поверхности основного металла расплавом припоя, что определяет возможность дальнейшего образования между ними химических связей. При физической возможности образования спая гарантируется паяемость и с технологической точки зрения при условии обеспечения выполнения режимов процесса пайки.

Паяемость материалов оценивают несколькими методами: определением смачивающей способности припоев, например замером площади растекания припоя или крайним углом смачивания; определением глубины затекания припоя в зазор горизонтального типа или высоты подъема припоя в капиллярном зазоре при вертикальном расположении образца; измерением усилия, действующего на образец основного металла, частично погруженного в расплав припоя.

Основной показатель оценки паяемости гальванических покрытий, рекомендованный отраслевыми стандартами, — коэффициент растекания припоя K_p (см. формулу (2.2)). Паяемость определяется на образцах-спутниках размером 25×25×1 мм, изготовленных из

исследуемого материала с покрытием (рис. 3.8, а). Образцы 1 предварительно обезжириваются в органическом растворителе, твердый припой 3 прокатывается до толщины листа 0,3 мм, доза его в виде диска диаметром 8 мм вырубается с помощью штампа или пробойника. Температура испытаний устанавливается на 65—70 К выше температуры ликвидуса припоя. Время испытаний не более 3 с. После испытаний на образце микрометром измеряется высота капли 2, площадь смачивания рассчитывается по среднему диаметру растекшейся капли припоя. Паяемость считается удовлетворительной, если коэффициент растекания составляет не менее 0,9, а высота растекшейся капли припоя не более 0,6 мм.

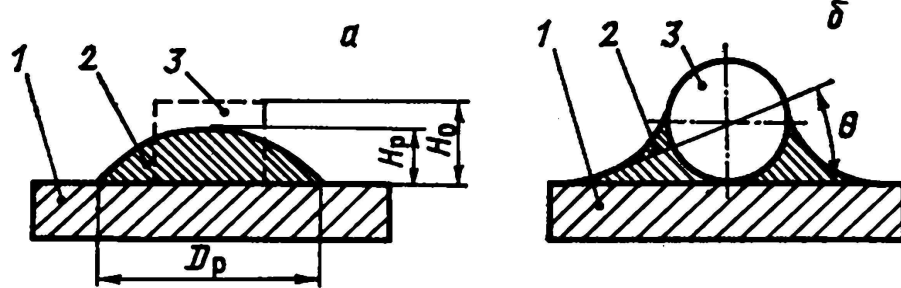


Рис. 5.10. Схема определения коэффициента растекания припоя (а) и угла смачивания (б)

Для определения угла смачивания на образец-спутник 1 укладывают предварительно облуженную в припое ПОС61 медную проволоку диаметром 0,5—0,8 мм и длиной 15—20 мм. На проволоку наносят пипеткой две капли флюса объемом 0,025 мл каждая и включают нагрев. После оплавления слоя припоя на проволоке и образования паяного шва образец снимают с установки и охлаждают. Угол смачивания определяют на срезе образца, перпендикулярном оси (рис. 5.10, б). Паяемость считается удовлетворительной, если угол смачивания составляет не более 30°.

Для оценки паяемости высокотемпературными припоями применяют нахлесточные или уголкового образцы, образующие горизонтальный зазор. Коэффициент проникновения K припоя в зазор горизонтального типа в присутствии флюса определяется по формуле [160] $K=3l^2/2td$, где l —глубина затекания припоя; d — зазор между образцами; t — время испытаний.

Припой в капиллярном зазоре при вертикальном его расположении поднимается на высоту H : $H= (2\sigma\cos\theta)/R\rho g$, где σ — поверхностное натяжение припоя; θ — угол смачивания; R — радиус капилляра.

Скорость течения в капилляре выражается соотношением

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{R\sigma}{4\eta l}, \quad (5.1)$$

где l — расстояние, на которое припой проник в капилляр за время t ; η — вязкость припоя. Интегрирование выражения (5.1) дает

$$l = \left(\frac{\sigma}{\eta} \cdot \frac{\cos\theta}{2} \right) Rt.$$

Коэффициентом проникновения припоя в данном случае будет величина

$$K = \left(\frac{\sigma}{\eta} \cdot \frac{\cos\theta}{2} \right).$$

Если в процессе капиллярного проникновения припой должен вытеснять жидкий флюс, то коэффициент проникновения, равен [160]

$$K = \frac{\sigma_{np.\phi} \cos\theta}{2(\eta_{np} + \eta_{\phi})},$$

где η_{np} , η_{ϕ} —вязкость припоя и флюса.

Таким образом, значение коэффициента проникновения прямо пропорционально поверхностному натяжению припоя, косинусу угла смачивания и обратно пропорционально вязкостям припоя и флюса.

Для контроля характеристик смачивания и растекания припоя по паяемой поверхности предложен ультразвуковой метод, основанный на особенностях распространения ультразвуковых волн в пластинах образцов, контактирующих с жидким припоем [151].

Установка для определения способности припоя к смачиванию ультразвуковым методом (рис. 3.9) состоит из ультразвукового дефектоскопа УДМ-1М с излучающим 1 и приемным 2 датчиками; самопишущего прибора Н-110 для регистрации изменений величины амплитуды ультразвуковых импульсов, прошедших через зону испытания образца; самопишущего потенциометра ПСП-01 с термопарой типа ХК для измерения температуры образца, электропаяльника 3 типа ПЭТ-50 с терморегулятором РТП-2М. Излучение и прием ультразвуковых волн в исследуемых образцах осуществляли методом сквозного прозвучивания на частоте 1,8 МГц с помощью датчиков гребенчатого типа. Синхронная регистрация изменений величины амплитуды ультразвуковых импульсов и температуры образца была достигнута за счет механического привода от прибора Н-110 к потенциометру ПСП-0,1.

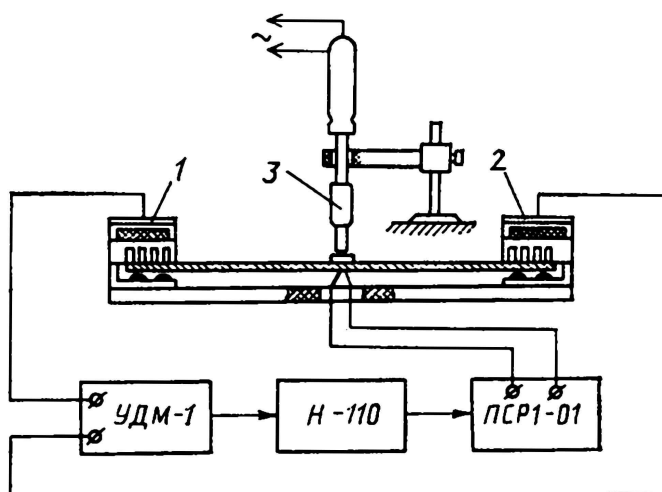


Рис. 5.11. Схема установки для определения способности припоя к смачиванию ультразвуковым методом

Анализ совмещенных кривых синхронной записи изменений во времени температуры образца T и величины амплитуды ультразвуковых импульсов L (рис. 5.11) показывает, что началу физического контакта между расплавом припоя и поверхностью образца соответствует момент времени t_3 , когда амплитуда ультразвуковых импульсов начинает резко уменьшаться. Этот момент характеризует минимальную температуру, при которой начинается смачивание. Дальнейшее увеличение температуры в зоне испытаний в течение временного интервала $t_3—t_4$ приводит к растеканию припоя, что выражается ослаблением амплитуды ультразвуковых импульсов до значения A_4 . Результаты определения минимальной температуры смачивания медных и стальных образцов размером $100 \times 20 \times 1,5$ мм расплавами оловянно-свинцовых припоев с флюсом «Прима-2» приведены в табл. 5.1

Реальная чувствительность ультразвукового метода зависит от минимальной площади контакта расплава припоя с поверхностью образца в зоне испытаний, которая должна быть не менее 4—6 мм². Для получения стабильных результатов эксперимента расстояние между датчиками выбирается не менее 40 мм.

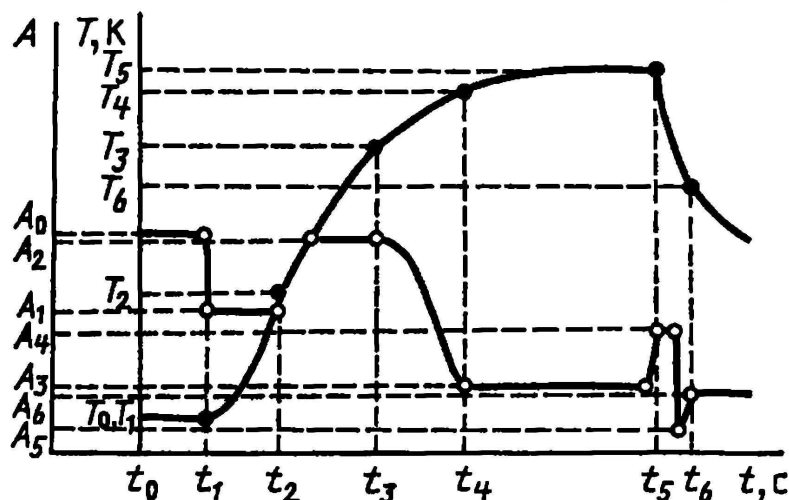


Рис. 5.12. Временные зависимости температуры образца и амплитуды ультразвуковых импульсов, прошедших через зону испытаний

Поскольку коэффициент растекания по формуле (5.2) зависит от массы исходного припоя и не дает наглядного представления о характере изменения паяемости, а метод определения достаточно трудоемок, то предложена другая методика его определения:

$$K_p = \frac{H_0 - H_p}{H_0},$$

где H_0 - высота "лежащей" капли припоя до растекания, которая находится из условий несмачивания поверхности:

$$H_0 = \sqrt{\frac{2\sigma_{1,2}(1 - \cos\Theta)}{\rho g}},$$

где ρ - плотность припоя, g - ускорение силы тяжести.

По данной методике отличной паяемости соответствует $K_p = 1$ и появляется возможность контролировать процесс растекания по высоте капли припоя. Для измерения высоты капли припоя после растекания предложен принцип бесконтактного измерения высоты капли припоя с помощью индуктивного преобразователя (рис. 5.12). Для этого применены два индуктивных преобразователя 1, закрепленные на подвижной панели 2, перемещаемой по направляющим 3 относительно основания 4. Схема включает два высокочастотных генератора, смеситель, генератор прямоугольных импульсов, интегратор и регистрирующий прибор. Балансная схема включения генераторов позволяет компенсировать изменение частоты в результате нагрева индуктивных преобразователей и повысить точность измерений. Регистрирующий прибор измеряет разностную частоту, получаемую в смесителе. В осевом отверстии катушки индуктивного преобразователя жестко закреплена игла из материала, смачиваемого припоем 8, для центрирования капли припоя относительно датчика. Игла устанавливается на исследуемую поверхность образца 7, длина иглы должна превышать высоту капель припоя при полной несмачиваемости поверхности.

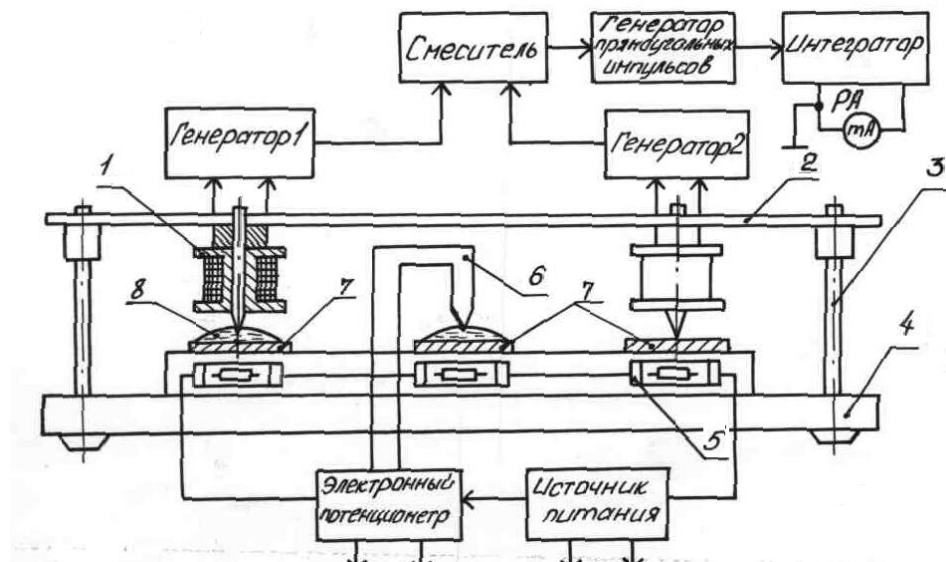


Рис. 5.12. Схема индикатора растекания припоя

Припой расплавляется резистивным нагревательным элементом 5, на котором размещаются исследуемые образцы 7. Контроль температуры осуществляют с помощью термопары 6 типа ХК, погруженной в дозированную навеску припоя на образце-свидетеле, и подключенной к электронному потенциометру—измерителю температуры, который стабилизирует температуру процесса. Перед началом испытаний в центре образца с покрытием наносят навеску припоя дозированной массы 250 мг и дозированный объем флюса 0,01 мл. Индуктивный преобразователь располагают на плоской заготовке припоя таким образом, чтобы игла фиксировала осевую симметрию преобразователя и заготовки припоя. Секундомер фиксируют начало и конец растекания припоя, а высоту капли припоя определяют по показаниям прибора (рис. 5.13,а). Для удобства работы с прибором построен градуировочный график (рис.5.13,б)

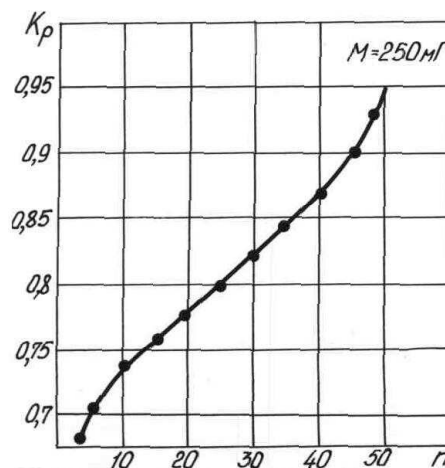
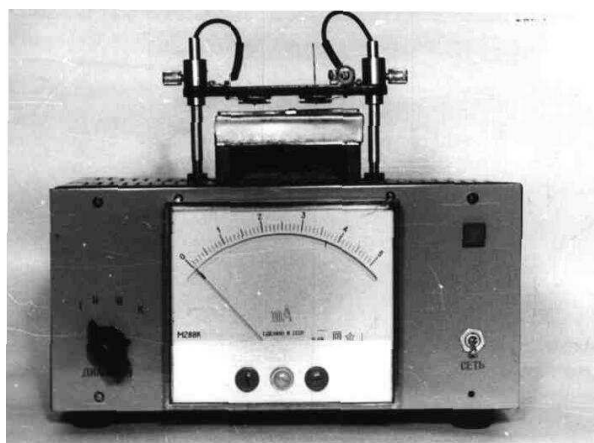


Рис. 5.13. Индикатор растекания припоя (а) и градуировочный график (б)

Исследования паяемости металлических покрытий, используемых в электронике, в зависимости от искусственного старения в течение 24 ч в атмосфере насыщенного водяного пара при 373 К и старения в нормальных условиях в течение 6 месяцев показали, что наилучшую паяемость имеет горячее лужение оловом или сплавом олово—свинец [162]. Установлено, что способность к пайке большинства гальванических покрытий при старе-

нии уменьшилась в результате: 1) потускнения их поверхности вследствие образования сульфидных и окисных пленок под воздействием атмосферы; 2) диффузии металла покрытия в основной металл, что приводило к уменьшению толщины покрытия; 3) диффузии основного металла в покрытие, что служило причиной окисления или коррозии покрытия.

Таблица 5.1. – Минимальные температуры смачивания припоями типа ПОС

Тип припоя	Температуры перегрева припоя выше ликвидуса	Минимальная температура смачивания	
		медь М1	сталь 20
ПОС30	20	501	510
	60	498	512
	100	503	513
ПОС40	20	481	488
	60	476	480
	100	480	485
ПОС61	20	458	463
	60	453	458
	100	459	466

Покрытия из благородных металлов (золота, палладия, родия) характеризуются высокой паяемостью и устойчивостью в агрессивной атмосфере, однако из-за высокой стоимости этих металлов применяются очень тонкие (1—3 мкм) их слои, которые не предотвращают диффузию металлов из основы, что ухудшает пайку покрытых деталей после продолжительного хранения (например, латунных). Кроме того, тонкое покрытие из благородного металла легко растворяется в расплавленном припое. В связи с этим целесообразно покрытия золотом, платиной, палладием, серебром корпусов и выводов интегральных схем, полупроводниковых приборов и других изделий электронной техники заменять покрытием из менее дефицитных и более дешевых сплавов на основе олова, никеля и других металлов.

Стойкость серебряного покрытия во многом зависит от его пористости. Чем выше пористость, тем быстрее развивается коррозия и образуются сернистые соединения серебра типа Ag_2S . К ускоренной коррозии серебряных покрытий приводит также наличие в атмосфере озона, хлора, сернистых соединений. Для развития процессов коррозии и образования соединения Ag_2S , препятствующего пайке, достаточно 5 мм^3 паров сернистых соединений в кубометре воздуха. Источником серы являются оберточная бумага, картон упаковочных коробок для радиоэлементов, а также клеящий состав липких лент, используемых при машинной установке элементов на плате. При опрессовке элементов из пресс-порошка могут выделяться пары хлористого водорода, хлористого винила и фенола, вступающие в реакцию с гальваническим серебряным покрытием выводов. Линолеумные и поливинилхлоридные покрытия полов в помещениях также выделяют серу, хлор и другие летучие вещества [163].

Качественная пайка деталей, имеющих серебряные покрытия и не прошедших специальной обработки, возможна в присутствии спиртоканифольного флюса не более чем после 10—15 сут складского хранения. Для сохранения паяемости в течение более длительного срока (до 2,5 лет) рекомендуется проводить обработку покрытий в водном растворе ингибитора с последующей упаковкой в конденсаторную бумагу [164].

Существуют два основных метода определения коррозионной стойкости гальванопокрытий — качественный и количественный. Оба метода без увеличения или с увеличением в 50—200 раз устанавливают факт наличия или отсутствия зон коррозии, их распространенность и интенсивность. Качественный метод реализуется визуальным и мик-

роскопическими способами. При количественном методе оценка коррозионной стойкости может определяться: 1) интервалом времени, через который появляются первые очаги коррозии; 2) изменением механических и электрических свойств, отражательной способности покрытий; 3) числом коррозионных очагов на единице площади; 4) изменением массы или толщины покрытия при условии удаления с образца продуктов коррозии, что достигается подбором соответствующих растворителей.

Наиболее правильное представление о коррозионной стойкости покрытий дают полевые испытания в естественных условиях, однако их продолжительность очень велика. Поэтому в производственных условиях предпочтительны ускоренные коррозионные испытания в специальных камерах или сосудах, с помощью специальных паст.

Гальванические покрытия оловом и сплавом олово — свинец сразу после осаждения имеют высокую паяемость, однако вследствие рыхлой и пористой структуры покрытий в процессе хранения протекает диффузия цинка из латунной основы к поверхности. Поэтому способность к пайке таких покрытий значительно ухудшается в течение трех месяцев складского хранения. Оловянно-цинковые и оловянно-висмутовые гальванические покрытия обладают хорошей паяемостью и сохраняют способность к пайке в течение более длительного времени. Исследования показали, что снижение паяемости оловянно-цинкового покрытия на 25% наблюдается через 9 месяцев складского хранения, а у оловянно-висмутового — через три года хранения [165].

Оплавлением свежесаженных гальванических покрытий, например, с помощью инфракрасного излучения можно значительно улучшить паяемость и увеличить стойкость к окислению. При этом совершенствуется структура покрытия, которая по своим свойствам приближается к структуре металлургического сплава.

При подготовке к пайке элементов и деталей с ухудшенной паяемостью возникают трудности при лужении паяемых поверхностей (несмачивание их припоем), а при введении дополнительной операции зачистки поверхностей увеличиваются длительность и трудоемкость процесса лужения. При подготовке выводов радиоэлементов к пайке перспективна активация расплавленного припоя ультразвуковыми колебаниями. При этом в припое возникают интенсивные кавитационные процессы, разрушающие пленки окислов и других соединений на облуживаемых поверхностях и увеличивающие химическую активность припоя и паяемой поверхности.

На партии резисторов типа МЛТ, имеющих серебряное покрытие и хранящихся в течение 24 месяцев в картонной коробке, было определено время смачивания в присутствии 20%-ного спиртоканифольного флюса. Для оценки времени смачивания использовали установку АП-6048, предназначенную для измерения времени смачивания вывода в капле припоя. Паяемость выводов из-за потемнения серебряного покрытия оказалась неудовлетворительной [123].

Применение активных флюсов типа ЛТИ-120 и механической зачистки выводов улучшило паяемость и сократило время смачивания до 1 с, однако эти методы либо трудоемки, либо не допустимы по существующим требованиям, предъявляемым к технологическому процессу лужения изделий РЭА и приборов (табл. 5.2).

Выводы резисторов МЛТ, которые имели неудовлетворительную паяемость в припое ПОС61, при ультразвуковом лужении в модернизированной ванне УЗВЛ-0,4 в течение 2 с полностью восстановили паяемость. Слой припоя на выводах был ровным, блестящим, без пор и несмоченных участков. Эффективным оказалось также применение ультразвукового лужения для выводов конденсаторов К50, К53, диодов 2Б503А, имеющих серебряное покрытие, микросхем типа 1ЛБ и блоков резисторов Б20 с покрытием горячим лужением.

Таким образом, применение ультразвуковых колебаний позволяет осуществлять бесфлюсовое лужение паяемых поверхностей электрорадиоэлементов и деталей с достаточно высокой производительностью и восстанавливать паяемость покрытий после длительного срока хранения, а также снизить трудоемкость подготовки их к монтажу.

Таблица 5.2. – Паяемость выводов резисторов, имеющих серебряное покрытие после 24 месяцев хранения

Вид обработки	Время смачивания, с			Среднее время смачивания, с		Оценка паяемости
Флюсование ФКСп	8,3	13,0	12,6	11,3	3,9	Неудовлетворительная
ФГСп	3,6	3,1	5,0	1,0		Плохая
ЛТИ-120	1,3	0,95	0,8			Удовлетворительная
Механическая зачистка, флюсование ФКСп				0,63		Хорошая
Ультразвуковое лужение	0,3	0,25	0,2	0,25		Отличная

5.4. ВЫБОР СПОСОБА НАГРЕВА

Образование паяного соединения сопровождается вызываемыми тепловым воздействием процессами активации поверхностей материалов и припоя, перехода припоя в жидкое состояние, смачивания и растекания его по паяемым поверхностям и взаимодействия с паяемыми материалами. Поэтому, главным фактором образования надежного паяного соединения является тепловая энергия. При пайке нагрев материалов и припоя можно осуществлять различными источниками энергии, которые определяют способ нагрева и метод пайки. Процесс ультразвуковой пайки в зависимости от свойств паяемых материалов и применяемого припоя требует рационального выбора способа нагрева (рис. 5.14).

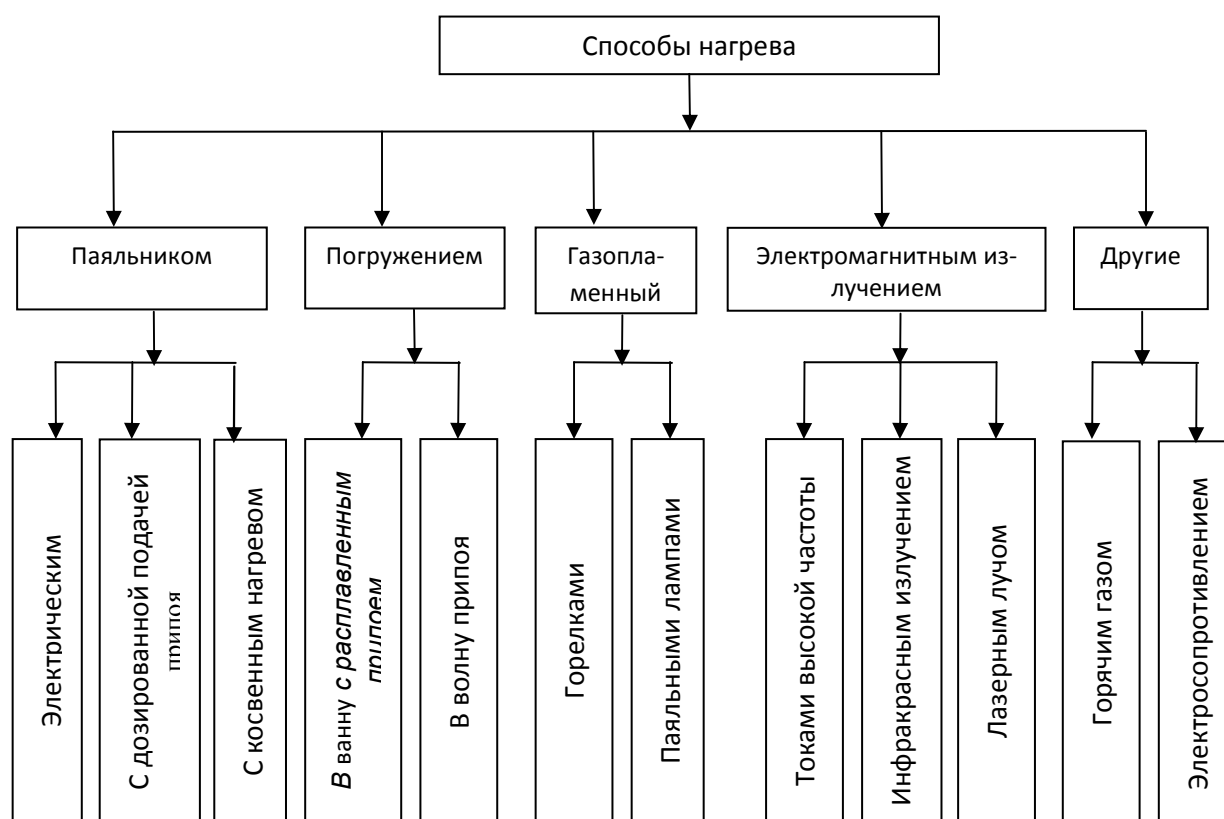


Рис. 5.14. Классификация способов нагрева при ультразвуковой пайке

Нагрев паяемых изделий электропаяльником требует тщательного контроля за его термическими характеристиками, поскольку необходимый термический режим пайки обеспечивается взаимосвязью между теплоемкостью, теплопроводностью и скоростью восстановления на жале паяльника. Скорость восстановления температуры рабочего конца жала пропорциональна мощности, теплопроводности и обратно пропорциональна теплоемкости паяемых деталей. Изменение напряжения питания нагревателя паяльника на $\pm 10\%$ изменяет температуру жала также примерно на $\pm 10\%$, при большем значении отклонения напряжения питания характер зависимости отличается от линейной (рис. 5.15).

При пайке ультразвуковым паяльником необходимо учитывать, что активация расплавленного припоя ультразвуковыми колебаниями сопровождается его дополнительным нагревом за счет рассеивания части ультразвуковой энергии в припое и ее превращения в теплоту. Поэтому термические циклы ультразвукового паяльника при отсутствии ультразвуковых колебаний при их наличии в процессе пайки отличаются временем восстановления температурного режима и рабочими температурами (рис. 3.15).

Ограниченная мощность ультразвуковых паяльников (35— 50 Вт) заставляет использовать для нагрева массивных деталей косвенные источники нагрева, например горелки, паяльные лампы и т. д. Пламя горелки можно рассматривать как конвективный теплообменный источник нагрева. Интенсивность вынужденного конвективного теплообмена зависит от разности температур пламени и нагреваемой поверхности и скорости ее перемещения относительно потока пламени. Удельный тепловой поток пламени q можно выразить через соотношение [166]: $q = a(T_{II} - T)$, где a — коэффициент теплоотдачи между пламенем и нагреваемым материалом; T_{II} , T — температуры потока газов пламени и поверхности материала.

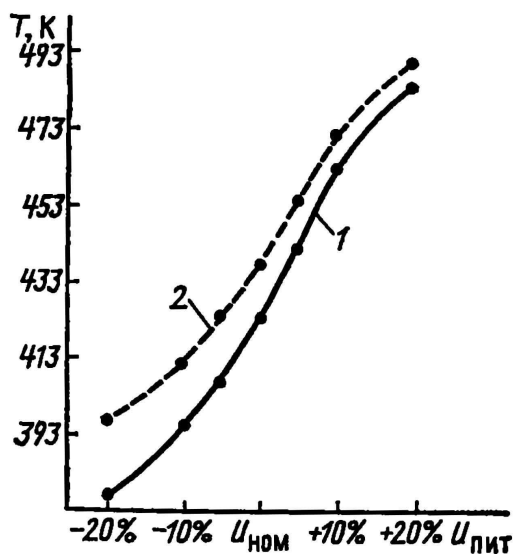


Рис. 5.15. Зависимость температуры жала ультразвукового паяльника УЗП2-0,025 от напряжения питания нагревателя: 1 — при отсутствии колебаний; 2 — при наличии

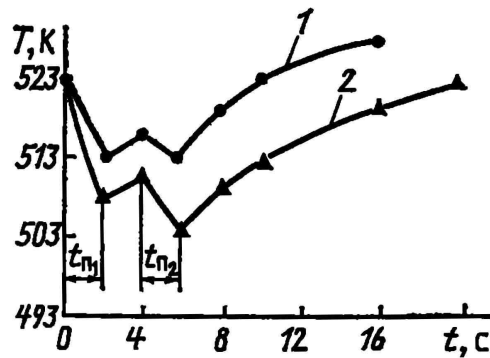


Рис. 5.16. Термический цикл пайки ультразвуковым паяльником: 1 – при наличии ультразвуковых колебаний; 2 – при отсутствии

Эффективность газопламенного нагрева оценивается к.п.д., представляющим собой отношение эффективной мощности пламени к полной тепловой мощности q_H , подсчитываемой по теплотворной способности горючего газа: $\eta = q/q_H = q/3,5 V_r$, где V_r — расход горючего газа.

Следовательно, расход горючего газа будет определять производительность газопламенного нагрева. Ручной газопламенный нагрев горелкой 1 (рис. 5.17) не обеспечивает равномерности температурного поля по всей паяемой поверхности детали 3. В зоне непосредственного воздействия пламени возможны пережог и повышенное окисление припоя 4 и волновода паяльника 2. Поэтому для пайки крупногабаритных деталей используют чаще косвенный нагрев зоны пайки, чем прямой.

Более перспективны бесконтактные способы нагрева паяемых поверхностей: токами высокой частоты, инфракрасным излучением, лазерным лучом. Индуцированные в металле детали токи высокой частоты протекают главным образом по поверхности, поэтому выделяемая тепловая энергия локализуется в поверхностном слое, толщина которого зависит от частоты электромагнитных колебаний, электрических и магнитных свойств металла:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho \cdot \mu f},$$

где δ — глубина проникновения тока высокой частоты; f — частота тока; ρ — удельное электрическое сопротивление металла; μ — магнитная проницаемость металла.

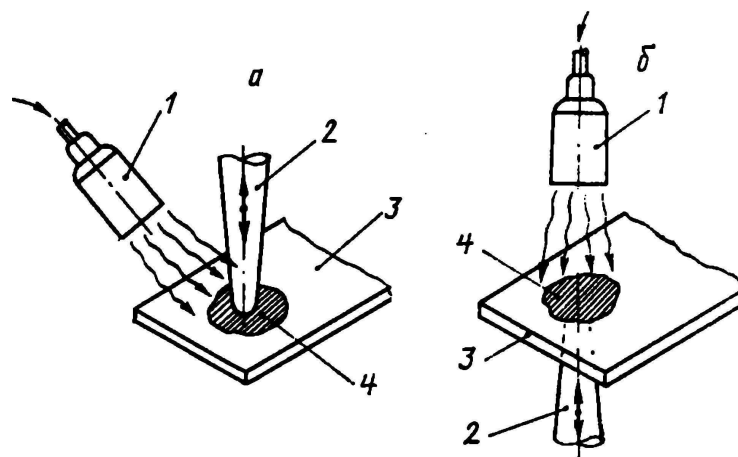


Рис. 5.17. Прямой (а) и косвенный (б) нагрев горелкой при ультразвуковой пайке

Термический к. п. д. системы нагрева индуктор—деталь для кругового индуктора рассчитывается по формуле [167]

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left(1 + 6,25 \frac{\delta^2}{d^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}}, \quad (5.2)$$

где D, d — диаметры индуктора и детали; ρ_1, ρ_2 — удельные электрические сопротивления индуктора и детали.

Анализ выражения (5.2) показывает, что увеличение к. п. д. нагрева достигается при нагреве деталей с высокими электрическим сопротивлением и магнитной проницаемостью, а также при использовании для изготовления индуктора хорошо проводящих металлов, например меди. Выражение $(1 + 0,25 \delta^2/d^2)$ достигает максимального значения, равного 1,1, при выполнении требования

$$\delta / d \leq 1 / \sqrt{6,25} \approx 1,8. \quad (5.3)$$

Таким образом, для достижения высокого к. п. д. системы нагрева частота тока должна быть такой, чтобы глубина нагрева не была больше 1/8 толщины детали. Из выражения (5.3) следует, что минимальное значение частоты равно

$$f_{\text{min}} = 16 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\mu d^2}.$$

К. п. д. системы нагрева также увеличивается при уменьшении отношения D/d , что достигается конструктивным подбором минимального зазора между ТВЧ-индуктором и деталью (рис.3.17).

Мощность, выделяемая при высокочастотном нагреве, определяется как [168]

$$P_{\text{над}} = \frac{(V_{\text{эф}} \cos \varphi \eta)^2}{n^2 R_{\text{изд}}},$$

где $V_{\text{эф}}$ — эффективное напряжение, подаваемое на индуктор; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; n — число витков индуктора; $R_{\text{изд}}$ — электрическое сопротивление изделия.

При заданной номинальной мощности высокочастотной установки и постоянном значении коэффициента мощности, определяемом электрическими и магнитными характеристиками нагреваемого металла, а также расстоянием между изделием и индуктором, которое по конструктивным ограничениям не может быть менее 1—2 мм, повышение эффективности высокочастотного нагрева может быть достигнуто путем снижения электрического сопротивления изделия, определяемого из выражения [169]

$$R_{\text{изд}} = \frac{2\pi L_{\text{изд}}}{c} \sqrt{\rho \mu f},$$

где $L_{\text{изд}}$ — средняя длина нагреваемого участка изделия; c — ширина зоны нагрева. Снижение электрического сопротивления изделия путем увеличения ширины зоны нагрева не всегда желательно, так как требует увеличения числа витков индуктора и приводит к перегреву изделия. Более рациональным является создание электрически замкнутого контура, обладающего малым электрическим сопротивлением и расположенным вдоль паяемого соединения. Снижение электрического сопротивления изделия при $L_k = L_{\text{изд}}$ будет определяться соотношением

$$R_{\text{изд}} / R_k = \sqrt{\rho \mu / \rho_k},$$

где ρ_k — удельное электрическое сопротивление материала контура.

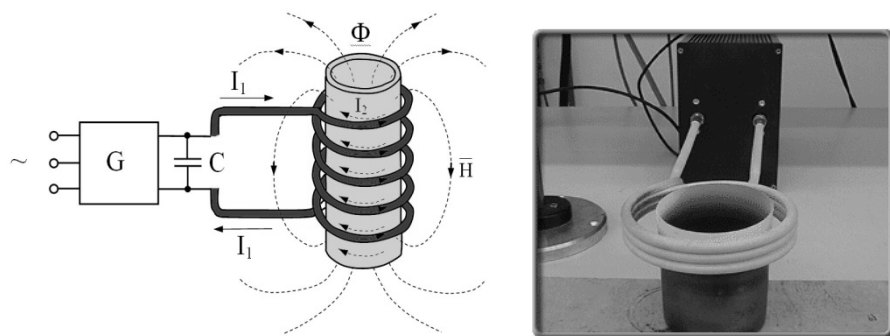


Рис.5.18. Схема (а) и внешний вид (б) индукционной системы нагрева

Повышение эффективности нагрева в случае применения электрического контура в большей степени достигается при использовании в качестве материала контура металла с низким электрическим сопротивлением (например, медь), наносимого любым известным способом, например путем гальванического осаждения покрытия толщиной, большей или равной глубине проникновения токов высокой частоты в металл покрытия [170]. Медное покрытие толщиной до 25—30 мкм позволяет увеличить скорость нагрева изделий из кобальта (сплав 29НК) в 1,3—1,5 раза. Дальнейшее повышение эффективности нагрева может быть достигнуто путем применения специальных насадок, жестко контактирующих с поверхностью нагреваемого изделия и имеющих толщину большую, чем глубина проникновения токов высокой частоты в металл насадки.

Использование высокочастотных электромагнитных колебаний (150—1000 кГц) позволяет увеличить скорость нагрева изделий при пайке более чем в 10 раз по сравнению с пайкой паяльником и до 100 раз по сравнению с пайкой в электропечи. При этом локализуется зона нагрева, уменьшается общий нагрев и коробление изделий, улучшаются условия труда обслуживающего персонала. Электромагнитное излучение, воздействуя на расплавленный припой, наводит в нем вихревые токи, вызывающие эффекты перемешивания металла и снижения краевого угла смачивания.

СВЧ-излучение сантиметровой и миллиметровой диапазонов используют для образования низкотемпературного плазменного стержня, используемого в качестве источника нагрева. Воздействие СВЧ-излучения мощностью 5—10 Вт на атмосферу воздуха или рабочего газа приводит к их ионизации, что дает возможность получить плазменный стержень диаметром 0,01—10 мм при скорости подачи рабочего газа 1—5 л/мин. Температура по длине стержня составляет 533—623 К, однако в радиальном направлении имеет место высокий градиент температур. Максимальная плотность потока СВЧ-энергии на расстоянии 0,25 м от места пайки не превышает 30 мкВт/см², что входит в допустимые нормы облучения СВЧ-полями [171].

Технологические возможности нагрева плазмой тлеющего разряда, возбужденного СВЧ-энергией, обеспечивают [172]: 1) широкий диапазон температур нагрева изделий (до 3000 К); 2) высокую точность дозирования энергии нагрева; 3) уникальную возможность нагрева полых изделий изнутри в случае, когда энергия газоразрядной плазмы выделяется на внутренней поверхности изделий; 4) простоту и универсальность оборудования. Однако отсутствие специально выпускаемого оборудования и необходимость защиты обслуживающего персонала от СВЧ-излучения ограничивает применение данного метода.

Инфракрасное излучение с длинами электромагнитных волн $0,8 \cdot 10^{-3}$ –0,8 мм применяют при нагреве деталей в процессе пайки. Нагрев с использованием инфракрасного излучения имеет ряд преимуществ: бесконтактный подвод энергии, позволяющий осуществлять пайку в любых условиях (на воздухе, в контролируемых атмосферах, в вакууме); точная регулировка времени и температуры нагрева; широкий диапазон температур нагрева, позволяющий применять любые припои; локализация нагрева в зоне пайки изделия, высокие скорости нагрева.

Зависимость интенсивности излучения I от температуры и длины волны источника

инфракрасного излучения устанавливает закон Планка:

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

где C_1 , C_2 — постоянные Планка, равные $0,3741 \cdot 10^{-15}$ Вт·м² и $1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К; λ — длина волны излучения; T — абсолютная температура. Наибольшая эффективность теплового излучения лежит в пределах длин волн 0,76—1000 мкм. С повышением температуры источника интенсивность инфракрасного излучения значительно увеличивается.

В соответствии с законом Стефана — Больцмана плотность полусферического интегрального излучения E_Σ пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени:

$$E_0 = eC_0 (T/100)^4 = C(T/100)^4,$$

где e — интегральная степень черноты «серого» тела; $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) — коэффициент излучения абсолютно черного тела; C — коэффициент излучения «серого» тела.

Падающее на металл инфракрасное излучение вследствие поглощения незначительно проникает в глубь металла и в основном отражается от его поверхности. Нормальная отражательная способность гладких поверхностей чистых металлов зависит от их удельного электрического сопротивления и температуры поверхности [173]: $\zeta = 1 - 0,576\rho T + 0,124\rho T$. В инфракрасной области спектра с увеличением электропроводности металлов их отражательная способность возрастает. Так, среди чистых металлов полированные серебро, медь, алюминий являются лучшими отражателями, что используется при изготовлении рефлекторов печей инфракрасного нагрева.

В качестве источника инфракрасной энергии обычно используют галогенные кварцевые лампы мощностью 100—650 Вт для точечных и 1000—5000 Вт для полосовых излучателей, применяют также дуговые ксеноновые лампы сверхвысокого давления мощностью 0,5—10 кВт. Более полное использование мощности ламп достигается с помощью рефлекторов, рабочие поверхности которых в целях повышения отражающей способности полируют и покрывают серебром или алюминием. Поскольку неотраженная часть излучения поглощается рефлектором, в установках инфракрасного нагрева предусматривается их водяное или воздушное охлаждение.

Основной способ создания зоны интенсивного инфракрасного нагрева — оптическая фокусировка излучения ламп (рис. 5.19). В плоскости поперечного сечения пучка интенсивность излучения изменяется в соответствии с законом распределения Гаусса, в результате чего вне области фокусировки она падает по закону, близкому к экспоненциальному. Для локализации зоны нагрева с точностью до $\pm 0,125$ мм применяют защитные диафрагмы, изготовленные из металлов с высоким коэффициентом отражения. Высокой однородности инфракрасного излучения можно достичь путем использования так называемого калейдоскопического перемещения пучка внутри трубы, внутренняя поверхность которой имеет высокий коэффициент отражения. В результате многократного отражения внутри трубы достигается весьма однородное распределение интенсивности излучения с отклонением от среднего уровня $\pm 1\%$. Основным недостатком способа — большие потери энергии пучка (до 50%) [56].

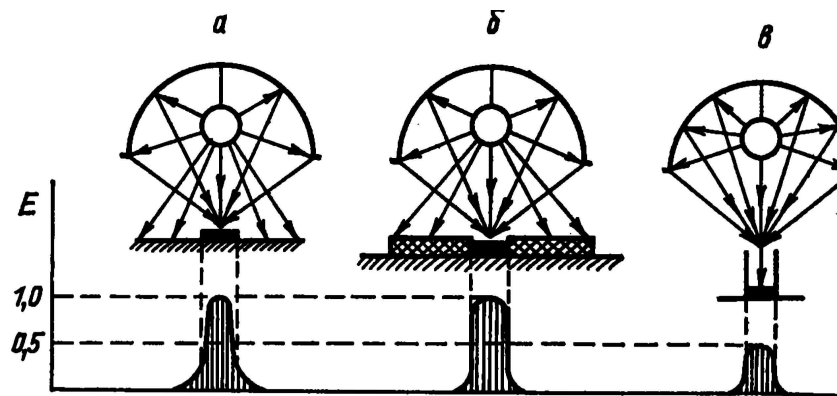


Рис. 5.19. Фокусировка ИК излучения: оптическая (а); локальная (б); калейдоскопическая (в)

Применение сфокусированного инфракрасного излучения позволяет осуществлять локальный нагрев в зоне диаметром до 2—3 мм или в узкой полосе шириной до 2 мм. Время разогрева до температуры пайки составляет 1—6 с, рабочая температура пайки может поддерживаться с высокой точностью. Отсутствие серийно выпускаемых установок инфракрасного нагрева заставляет конструировать их в каждом отдельном случае с учетом требований конкретной технологии.

Лазерное излучение в настоящее время — удобное, надежное и экономичное средство бесконтактного нагрева. Источником нагрева служит оптический квантовый генератор, создающий монохроматическое излучение. Нагрев с помощью лазерного луча не требует вакуума и позволяет соединять пайкой изделия из разнотолщинных элементов. В технологических целях используют как непрерывное, так и импульсное лазерное излучение. Управление интенсивностью излучения осуществляют регулированием частоты импульсов, длительностью их воздействия и выходной энергией. Расфокусировка луча обеспечивает пониженный, необходимый для пайки уровень плотности энергии.

Величина средней плотности потока излучения I для круглой формы луча с гауссовой кривой распределения плотности и при перемещении детали относительно луча определяется по формуле [174]

$$I = 1,36 \frac{P}{vD},$$

где P — падающая мощность излучения; v — скорость перемещения детали; D — диаметр луча в зоне нагрева.

При пайке радиоэлементов и микросхем на печатные платы с помощью лазерного излучения, получаемого от оптического квантового генератора типа ЛТН-101 непрерывного действия с длиной волны 1,06 мкм и мощностью 63 Вт, перемещение платы со скоростью 8 мм/с обеспечивало производительность процесса до 400 паек/мин. Средняя плотность потока излучения при этом составляла $1,9510 \cdot 10^6$ Дж/м².

Для низкотемпературной пайки используют установки многоточечного нагрева с голографическим делением луча (рис. 5.20). Луч лазера 1 с помощью телецентрической оптики 2 расширяется до значительного диаметра, а затем как плотнопараллельный поток направляется на голограмму 3. Для каждого случая нагрева создается специальная голограмма, с помощью которой лучевой поток раскладывается на ряд элементарных лучей, направляемых с помощью управляемого отражателя 4 на паяемые изделия 5. Для пайки легкоплавкими припоями изделий электронной техники достаточна мощность 5 Вт, выделяемая в зоне нагрева изделия. Поэтому одним импульсом промышленного лазера мощностью 20—50 Вт можно вести пайку одновременно в нескольких точках.

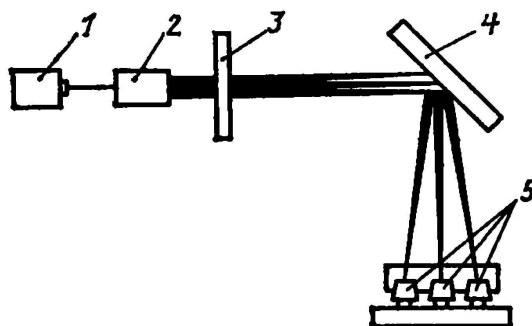


Рис. 5.20. Схема лазерной установки с голографическим делением луча

Применение лазерного излучения особенно эффективно в технологии прецизионной пайки, особенно для приборов и изделий электронной техники в микроминиатюрном исполнении.

5.5. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Как показал анализ литературных источников, высокотемпературной пайке металлов и сплавов уделялось значительно меньше внимания по сравнению с низкотемпературной. Это объясняется прежде всего тем, что при высокотемпературной пайке существенно усложняются процессы расплавления твердых припоев. Так как масса дозированного припоя значительно меньше детали и массы элементов волноводной системы, вводящих ультразвук в расплав припоя, необходимо применение высокоскоростных эффективных методов нагрева. При этом скорость нагрева, как правило, должна превышать скорость теплопереноса, так как только при таком условии обеспечивается локализация высоких температур в очаге пайки. Следовательно, в этом случае теплопроводность паяемых металлов и элементов, вводящих ультразвук в расплав припоя, должна быть предельно низкой. Однако в действительности паяные металлы и металлические элементы акустических систем (концентраторы, волноводы) обладают высокой теплопроводностью, что требует дополнительных затрат энергии для их нагрева, который по эксплуатационным соображениям недопустим. Подвод теплоты в припой через жало паяльника (в ряде способов низкотемпературной ультразвуковой пайки) при высокотемпературной пайке невозможен, так как высокие температуры нагрева жала за счет теплопроводности металлических элементов акустической системы паяльника выведут из строя ультразвуковую преобразователь. В силу этих и некоторых других трудностей реализации высокотемпературной ультразвуковой пайки ее заменяли сваркой или обычной высокотемпературной пайкой (без ультразвука). Однако такая замена не приемлема для многих радиоэлектронных изделий и приборов. Особенно критичны к действию высоких температур вакуумплотные соединения, широко используемые в современной РЭА и электровакуумных приборах. Более того, при длительном нагреве многие металлы и сплавы, применяемые в РЭА и приборах, могут необратимо изменять свои свойства. Так, например, при длительном нагреве в диапазоне температур 873—1073 К высоколегированные аустенитные стали (Склонны к точечности межкристаллитной коррозии, что может повлечь за собой образование течи.

Высокотемпературную пайку металлов и сплавов следует вести с использованием высокоэффективных, быстродействующих, безынерционных методов нагрева (токи высокой частоты, лазерное и инфракрасное излучение). При пайке функциональных элементов РЭА и приборов (например, отдельных электровакуумных приборов) наиболее целесообразно использовать нагрев токами высокой частоты (ТВЧ), так как он позволяет сравнительно простыми техническими средствами и приемами (форма индуктора, частота ТВЧ,

расстояние ют индуктора до изделия) легко управлять степенью локализации нагрева.

Поверхность нержавеющей сталей и многих других высокотемпературных сплавов, как правило, покрыта пленками прочных окислов Cr, Al, Ti, которые не смачиваются припоями. Так как применение флюсов при пайке РЭА и приборов недопустимо, поверхность металла от окисных пленок следует освобождать за счет диссоциации окислов в защитных средах или в вакууме либо путем защиты поверхности металла гальванопокрытиями.

Наложение ультразвуковых колебаний при индукционной пайке улучшает смачивание и растекание припоя по подложке, а за счет повышения капиллярного давления обеспечивает полное и равномерное заполнение капиллярного зазора припоем [222, 223]. Для реализации процесса высокотемпературной ультразвуковой пайки с индукционным нагревом в вакууме разработана универсальная установка с использованием манипулятора для подачи дозированного припоя [224].

При высокотемпературной пайке пленки окислов, имеющиеся на поверхности металла, не успевают диссоциировать к моменту перехода припоя в жидкое состояние. Для осуществления смачивания и растекания припоя по поверхности основного металла необходимы значительный перегрев и длительная выдержка, в результате чего достигается необходимая термическая активация для обеспечения физико-химического взаимодействия между твердым и жидким металлами [225].

Окисные пленки при высоких температурах (перегреве) диссоциируют, образуя дефекты в виде совокупности капилляров на своей поверхности, что создает условия для проникновения через капиллярные несплошности жидкого припоя к поверхностным слоям металла, а это благотворно влияет на процесс пайки толстостенных деталей. Однако при пайке тонкостенных деталей их перегрев может иметь отрицательные последствия вследствие сильного межкристаллитного проникновения припоя в паяемый металл, что может повлечь за собой эрозию, а иногда и появление трещин основного металла.

Введение ультразвуковых колебаний в расплав припоя снижает вязкость и краевой угол смачивания, повышает жидкотекучесть, а кавитационные явления разрушают окисные пленки, что в совокупности резко интенсифицирует процесс высокотемпературной пайки. Так, например, полное растекание припоя ПСрМИн-63В на подложке из стали 12Х18Н9Т без воздействия ультразвука происходит при температуре 1323—1373 К, а температура плавления припоя при этом составляет 958—983 К. При тех же условиях, но с наложением ультразвуковых колебаний полное растекание припоя происходит при температуре 1183—1223 К [226].

Как указывалось, необходимыми условиями для создания высокопрочных, вакуумплотных высокотемпературных паяных соединений являются вакуум, ультразвук и нагрев ТВЧ. Однако если высокотемпературную пайку невозможно осуществлять в вакууме (большие габариты изделия, отсутствие вакуумного оборудования), то ее можно проводить в форми-газе (смесь Н₂ и N₂). При этом на паяемые поверхности основного металла рекомендуется наносить никелевые гальванопокрытия. Так как окислы никеля обладают высокой способностью диссоциировать при высоких температурах, это резко улучшает формирование высокотемпературного паяного шва, не требуется большого перегрева и процессы физико-химического взаимодействия припоя с паяным металлом ограничиваются лишь растворением никелевого покрытия в припое. Припои ПМГрК-2,5 и ПМГрН-2,5 при высоких температурах обладают способностью достаточно глубоко проникать в капиллярный зазор паяемого соединения. Компоненты этих припоев кремний и германий улучшают смачивание поверхности нержавеющей стали, а сами припои не склонны к растворению основного металла.

При высокотемпературной ультразвуковой пайке в вакууме образцов, изготовленных из сплава 36НХТЮ, нержавеющей стали 12Х18Н9Т и малоуглеродистой стали 10, при индукционном нагреве можно получать высокопрочные, вакуумплотные паяные соединения. При пайке в ультразвуковом поле спаиваемые поверхности могут быть без никелевого покрытия [227]. В большинстве случаев нарушение вакуумной плотности и раз-

рушение высокотемпературных соединений, полученных в ультразвуковом поле, происходит не по спаю, а по основному металлу или сплаву.

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования по высокотемпературной ультразвуковой пайке металлов и сплавов свидетельствуют о ее значительных преимуществах перед всеми известными другими способами пайки.

5.6. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Контроль качества предусматривает следующие способы оценки паяных соединений [175]: 1) по внешнему виду с использованием эталона паяного соединения с углом смачивания $5\text{--}10^\circ$ при 100%-ном контроле; 2) по прочности на отрыв при выборочном контроле на образцах-свидетелях; 3) анализ структуры припоя и характера диффузионной зоны выборочно для образцов-свидетелей; 4) по переходному сопротивлению контакта выборочно для различных проводников; 5) по надежности соединения путем определения интенсивности отказов в течение заданного срока испытаний.

Качество паяных соединений по внешнему виду проверяется при помощи бинокулярного микроскопа типа МБС-2 с кратностью увеличения $8\text{--}56$. Соединения с гладкой блестящей поверхностью без трещин и следов перегрева, с полностью заполненным зазором между паяемыми деталями (при угле смачивания $5\text{--}10^\circ$) считаются высококачественными. Одновременно отмечают такие дефекты, как холодный непрогретый спай, избыток или недостаток припоя, короткозамыкающее паяное соединение.

Критериями оценки прочности паяных соединений являются величина усилия отрыва, устойчивость соединений при воздействии знакопеременных нагрузок и вибропрочность. Прочность на отрыв определяют по среднему значению усилия отрыва, которое для паяного соединения меди припоем ПОСб1 при оптимальных режимах оказывается не менее 30 МПа. Оценку устойчивости паяного соединения при воздействии знакопеременных нагрузок проводят по среднему числу циклов закручивания на угол $\varphi = \pm 0,75$ град/мм и среднему числу циклов изгиба вывода 1 на угол $\alpha = \pm 10^\circ$ относительно платы 2 с частотой 50—100 циклов в минуту и одновременным воздействием осевой нагрузки P , равной 0,1—0,5 величины усилия статического разрыва припоя 3 (рис. 3.20). Вибропрочность оценивают по времени, в течение которого паяные соединения противостоят разрушению под действием вибрации с частотой 50 – 2000 Гц и ускорением, соответствующим максимальным ускорениям при нормальной эксплуатации аппаратуры.

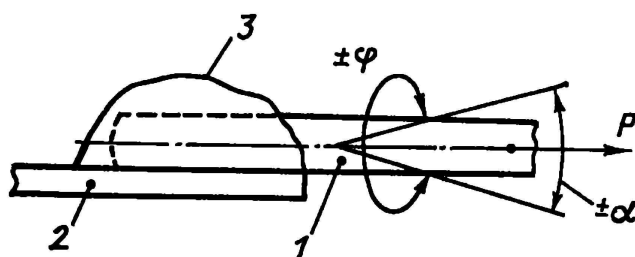
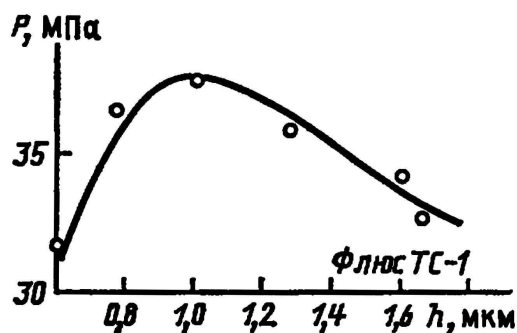


Рис. 5.21. Схема приложения знакопеременных нагрузок при испытании паяного соединения

Для оценки структуры припоя приготавливают металлографические шлифы, которые исследуют с помощью микроскопов МИМ-7, ММР-2Р. При этом обращают внимание



на то, что надежному паяному соединению соответствует мелкозернистая плотная структура припоя, что свидетельствует об оптимальных режимах процесса пайки и охлаждения. Путем химического травления микрошлифов паяных соединений выявляют диффузионную зону между припоем и основным металлом, в зависимости от ширины которой судят о качестве паяного соединения. При перегреве происходит глубокая взаимная диффузия основного металла и припоя, частичное растворение (эрозия) металла в припое, что приводит к образованию в нем интерметаллидов, снижающих прочность соединения. При недогреве глубина диффузии чрезвычайно мала, прочность чисто адгезионного спая недостаточна для обеспечения требуемой надежности соединения. Исследования прочности на разрыв P в паяных соединениях меди припоем ПОС61 показывают, что достаточная прочность обеспечивается при ширине диффузионной зоны 0,8—1,2 мкм (рис. 5.22) [175].

Рис. 5.22. Зависимость предела прочности паяного соединения меди припоем ПОС61 от ширины диффузионной зоны

Переходное сопротивление паяного соединения измеряется по методу разности потенциалов между двумя точками, расположенными на расстояниях X и Y от границы раздела соединяемых металлов (рис. 5.23). При этом величина переходного сопротивления R_{II} определяется по формуле: $R_{II} = U/I - R_X - R_Y$, где U — величина измеренного напряжения; I — ток, протекающий через соединение; R_X , R_Y — сопротивления участков X и Y . Измерения проводят на постоянном токе, так как на переменном возникает поверхностный эффект, искажающий значения измерений. Величина переходного сопротивления надежного паяного соединения $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Ом.

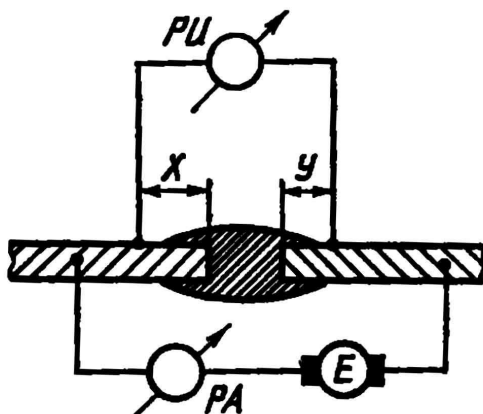


Рис. 5.23. Схема измерения переходного сопротивления паяного соединения

Интенсивность отказов позволяет количественно оценить надежность паяных соединений и показывает, какая доля от работающих в период времени t паяных соединений выходит из строя в единицу времени после периода t : $\lambda(t) = f(t)/P(t)$, где $f(t)$ — плотность вероятности времени безотказной работы; $P(t)$ — вероятность безотказной работы.

За критерий отказа при испытаниях на надежность принимается полный обрыв соединения или увеличения падения напряжения на нем на один порядок. Примерный временной график (рис. 3.23) проведения испытаний паяных соединений на надежность включает термоциклирование от 353 до 213 К с длительностью цикла 1 ч 1, нормальные условия 2, нагрев до 353 К, выдержку в атмосфере тропической влажности 3 (98%-ная относительная влажность и 313 К 4).

Дефекты в паяных соединениях (поры, раковины, трещины) могут быть обнаружены с помощью телевизионно-рентгеновского микроскопа МТР-3 или ультразвуковым контролем. Ультразвуковой контроль основан на изменении структуры акустического поля частотой 0,5-25 МГц при наличии в паяном соединении дефектов, отражающих ультра-

звуковые колебания. Универсальные ультразвуковые дефектоскопы типа УДМ-1М позволяют обнаруживать и определять раковины, трещины, поры, расслоения и другие дефекты в паяных соединениях.

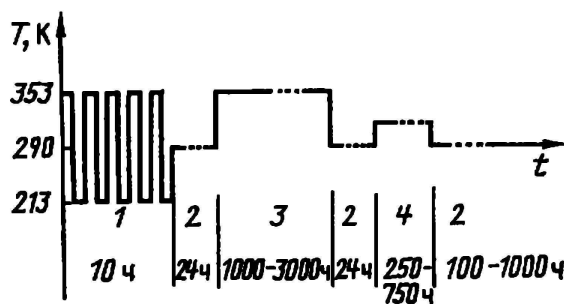


Рис. 5.24. Временной график испытаний паяных соединений на надежность

Определенная часть дефектов (иногда до 60%) может быть выявлена методом модуляции электрического сигнала, который основан на свойстве дефектов паяных соединений служить модуляторами сигнала. Контрольная аппаратура включает генератор с регулируемым переменным напряжением частотой 10—100 кГц; блок индикатора, состоящий из двухкаскадного предварительного усилителя, детектора и указателя уровня: фильтр-пробку, настроенную на фиксированную частоту (например, 3,2 кГц); двухкаскадный оконечный усилитель, осциллограф или громкоговоритель. После настройки генератора на частоту фильтр-пробки контролируемую схему подвергают вибрациям, при этом любое изменение омического сопротивления паяного соединения вызывает появление электрического сигнала другой частоты, отличной от частоты генератора.

Одним из перспективных методов объективного контроля паяных соединений является оценка их температурного перепада. В данном методе контролируемую плату подключают к источнику питания и генератору импульсов фиксированной частоты. После установления теплового равновесия плату со стороны паек сканируют инфракрасным датчиком тепловизора. Тепловизор позволяет воспроизводить перепады температур на поверхности исследуемого изделия, используя естественное инфракрасное излучение. Таким образом обнаруживаются зоны локальных перегревов, соответствующие дефектным паяным соединениям, которые имеют температуру на 1—5 К выше номинальной. В качестве датчиков используют фотоболометры и другие инфракрасные детекторы. Тепловизор ТВ-03 (СССР) имеет температурное разрешение 0,2 К в диапазоне измеряемых температур 253—473 К [176].

Повышение качества контроля паяных соединений достигается путем применения лазерной системы контроля дефектов (рис. 5.25) [177]. С помощью гелий-неонового лазера устанавливают точное местоположение контролируемого элемента 3 в системе $X—Y$ координат передвижного столика 4. Контрольные лучи излучает мощный неодимовый лазер, работающий в инфракрасной области с длительностью излучения, которую задает микропроцессор, связанный с затвором 1. Луч, управляемый зеркалом 2, падает на место пайки на контрольном элементе, причем большая часть света отражается от блестящей и однородной поверхности пайки. Если структура пайки зернистая, то она начинает поглощать энергию луча, нагревается и посылает инфракрасное вторичное излучение. Собранное в линзах 5 и отраженное зеркалом излучение воспринимается инфракрасным датчиком 6, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы. Лазерным контролем обнаруживаются такие дефекты соединения, как раковины, внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения.

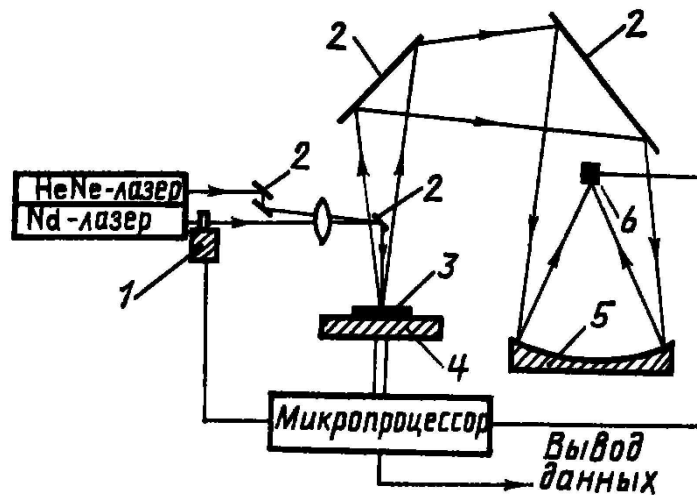


Рис. 5.25. Схемы лазерной системы контроля паяных соединений

Разогревание паяного соединения с помощью неодимового лазера выходной мощностью 60 Вт происходит за 50 мс. В итоге удается контролировать в секунду около десяти паяных соединений, которые расположены на расстоянии 1,25мм друг от друга. Если в дополнение к лазерной установке предусмотреть ультразвуковой контроль, то можно определить и те дефекты, которые не могут быть обнаружены с помощью лазера. Автоматизированный контроль паяных соединений с помощью комбинированной лазерно-ультразвуковой системы позволяет значительно увеличить производительность контроля паяных соединений печатных плат, для чего микропроцессору задается программа расположения паяных соединений на плате.

ГЛАВА 6 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

6.1. СПОСОБЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ И СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Одновременно с разработкой процессов ультразвуковой пайки металлов ультразвук был применен для металлизации неметаллических материалов, стекла, керамики, ферритов. С этой целью поверхность паяемых деталей подвергалась предварительной обработке, например пескоструйной, для образования развитого микрорельефа. После подогрева деталей до температуры плавления припоя они погружались в ультразвуковую ванну с расплавом припоя или облуживались с помощью ультразвукового паяльника. Для ультразвуковой металлизации использовались оловянно-цинковый (П200А) и свинцово-серебряный (ПСрЗ) припои (табл. 6.1) [178].

Механическая прочность на разрыв соединений, полученных ультразвуковой пайкой, почти в 2 раза превышала прочность соединений, полученных обычной пайкой по слою серебра, нанесенного вжиганием.

На прочность сцепления металлизации с паяемой поверхностью неметаллического материала оказывают влияние степень шероховатости поверхности и длительность кавитационного воздействия. Более развитые поверхности увеличивают общую площадь сцепления и соответственно повышают величину разрывного усилия. Под действием кавитационных микроударов поверхность керамики очищалась от мелкой фракции основного материала, открывался доступ к порам, которые под действием возникающих в припое высоких давлений заполнялись припоем, обеспечивая тем самым достаточную прочность сцепления. Время кавитационного воздействия составляло 0,5—5 мин.

Отмечено, что после ультразвукового воздействия механическая прочность керамики резко снижается. Под воздействием кавитационных микроударов в ней образуются зоны ослабленной прочности, величина которых зависит от типа керамики, мощности, вида ультразвуковых волн и длительности ультразвукового воздействия. Поэтому длительность кавитационного воздействия должна быть ограничена временем получения оптимальной прочности спаев.

Таблица 6.1 – Прочность соединений, полученных ультразвуковой пайкой неметаллических материалов

Материал соединения	Припой	Вид паяного соединения	Предел прочности при растяжении, МПа	Место разрыва
Керамика — керамика	П200А	Встык	7,8—11,7	По месту пайки
	П200А	Внахлест	9,3—12,7	По керамике
	ПСрЗ		10,8—13,7	
Керамика — стекло	П200А	Встык	2,9—4,1	По месту пайки
	П200А	Внахлест	5,6—7,4	По стеклу
	ПСрЗ		5,6—6,9	
Феррит — феррит	П200	Встык	2,9—17,6	По ферриту
	ПСрЗ		17,6—19,6	

Исследование механической прочности ультразвуковых спаев различных типов припоев с установочной керамикой свидетельствует о том, что выбор припоя для металлизации играет важную роль (табл. 6.2) [б]. Как показал анализ, только применение оловянно-

но-цинковых припоев обеспечивает получение достаточной прочности спая с керамикой. Для стеатитовой керамики прочность сцепления металлизации: припоями ПОС30, ПОС61 и П250А зависит от степени шероховатости поверхности керамики (рис. 6.1). Наибольшая прочность спая, которая составила 17,9 МПа, была достигнута для шероховатых поверхностей, подвергнутых дробеструйной обработке и металлизированных припоем П250А 1, по сравнению с обычными не обработанными поверхностями 2, что в 2—2,5 раза выше прочности сцепления серебряных покрытий с керамикой [84].

Таблица 6.2. – Механическая прочность ультразвуковых спаев керамики

Тип припоя	Температура плавления, К	Температура металлизации, К	Предел прочности при растяжении, МПа
Bi—Sn	276	423	2,78
Sn—Bi	438	493	5,89
ПОС61	458	513	3,13
П200А	478	533	15,0
Sn — Zn — Al	598	653	18,4

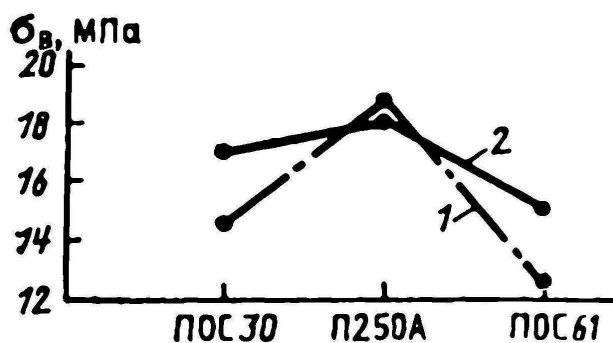


Рис. 6.1. Зависимость прочности сцепления металлизированного слоя с керамикой от состояния поверхности основы

Исследование процесса ультразвуковой металлизации установочной керамики марок 22ХС и Ф-58 в виде плоских шайб диаметром 20мм и толщиной 2—3 мм, а также конденсаторной керамики марок Н-30, Н-90, Н1500 в виде пластин 20×20 мм и толщиной 0,2—0,25 мм проводилось на частотах 22 и 44 кГц с использованием ультразвуковых ламп и паяльников. Более стабильные результаты получены при металлизации в специальной камере, выполненной с учетом геометрии металлируемого образца оптимальные режимы процесса металлизации для керамики марок 22ХС и Ф-58: амплитуда ультразвуковых колебаний 3—5 мкм, величина зазора между излучателем и металлируемой поверхностью 0,2—0,44 мм, угол наклона излучателя 40—55°, скорость металлизации 8—30 мм/мин, температура металлизации на 5—10 К выше температуры плавления припоев ПОС40, ПОС61, ПСр3, ПСрОС58. Процесс металлизации идет более стабильно на частоте 44,5 кГц, однако положительных результатов при ультразвуковой металлизации конденсаторной керамики достигнуто не было. Это объясняется хрупкостью образцов, их разрушением под воздействием температуры и кавитации [83].

Таким образом, наряду с определенными требованиями к паяемой поверхности, типу припоя необходимо специальное технологическое оборудование для ультразвуковой металлизации. Как показал опыт производственной работы, рационально выбирать мощность ультразвуковых колебаний 100—200 Вт. Мощность излучаемой энергии целесообразно регулировать за счет изменения амплитуды электрических колебаний задающего

генератора. Рекомендуются экспоненциальный или катеноидальный волноводы-концентраторы, а в качестве материала волноводов-концентраторов — титан [179].

Ввиду ряда недостатков, присущих методу металлизации с использованием ручного ультразвукового паяльника, разработана специальная ультразвуковая установка металлизации пьезокерамики УМП-1, состоящая из следующих основных элементов [180]: 1) ультразвукового генератора УЗГ-2,5 А; 2) механизма перемещения кассеты, в качестве которого использовалась станина со столом от горизонтально-фрезерного станка; 3) магнитострикционного преобразователя типа ПМС-7 с концентратором, в выходной торец которого ввинчивался сменный инструмент; 4) электрического нагревателя с системой терморегулирования в диапазоне температур 473— 573 К с точностью $\pm 5\text{К}$; 5) кассеты для размещения пьезокерамических деталей различных типоразмеров; 6) пульта управления и сигнализации. Инструмент представлял собой полуволновой волновод с малой конусностью, сточенный у меньшего основания до радиуса 5 мм. Система крепления и поворота преобразователя позволяла устанавливать инструмент под любым углом в пределах 0—90° по отношению к поверхности металлируемой детали.

В процессе эксплуатации установки было определено, что наиболее эффективная металлизация осуществляется при зазорах между излучателем и изделием 0,1—0,4 мм на частоте 22 кГц и при акустической мощности 500—600 Вт. Дальнейшее увеличение мощности вызывает фонтанирование и распыление расплава. Скорость перемещения обрабатываемых деталей регулировалась в пределах 10—100 мм/мин. Наиболее оптимальное значение угла наклона инструмента соответствует 45—65°.

Исследование пограничной области соединения пьезокерамика — припой П200А, полученного ультразвуковой металлизацией, проведенное с использованием различных методов изучения переходной зоны, показало, что проникновение цинка в глубь керамики имеет место за счет межкристаллитной диффузии, причем для пьезокерамики ВаТiO₃ это проникновение достигает 40 мкм. В переходной области отмечено образование новых фаз за счет химического взаимодействия цинка с компонентами пьезокерамики [44].

Разработана настольная установка УЗ металлизации стеклокерамических материалов УМК-2М в производстве конденсаторов постоянной емкости типа К21-5 и К21-9 (рис. 6.2), которая позволяет автоматически вести процесс металлизации со скоростью 0,1–0,3 м/мин и поддерживать температуру припоя с точностью $\pm 5^\circ$. В состав установки входят два УЗ паяльника УЗП-1 и УЗП-2, ванночка с припоем, двигатели подачи кассеты Д-1 и Д-2, блоки резистивного нагрева БН, регулятора температуры БРТ, силовых реле БСР, управления и контроля БКП (рис.6.3). Питание установки осуществляется от УЗ генератора УЗГ-3-0,4 с выходной мощностью 400 Вт и блока питания БП напряжением 36 В и мощностью 800 Вт.

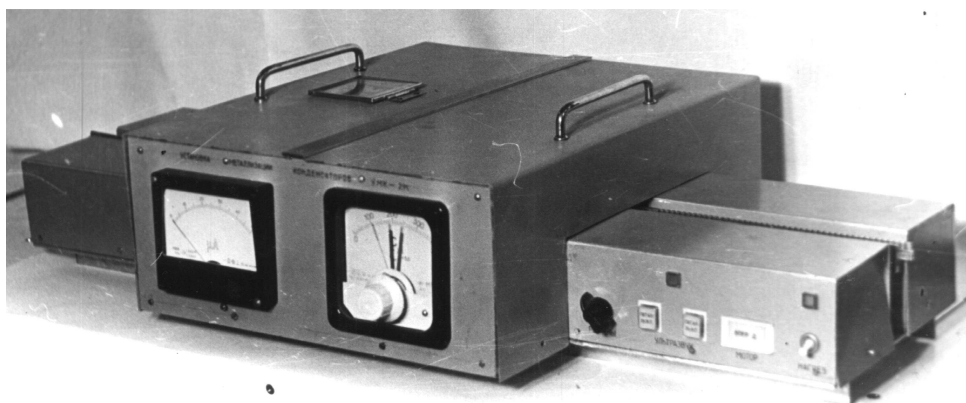


Рис.6.2. Установка УЗ металлизации стеклокерамических материалов

Конденсаторы набираются в кассету по 10–20 шт., которая с помощью механизма пе-

ремещается в рабочую камеру нагрева. Припой из ванночки через распределители поступает в дозирующие емкости УЗ паяльников. Под действием УЗ колебаний припой смачивает торцевые поверхности пакетов конденсаторов и формирует слой металлизации. Одновременно за счет УЗ капиллярного эффекта припой непрерывно подается из дозирующих емкостей по капиллярным каналам на рабочие поверхности УЗ паяльников.

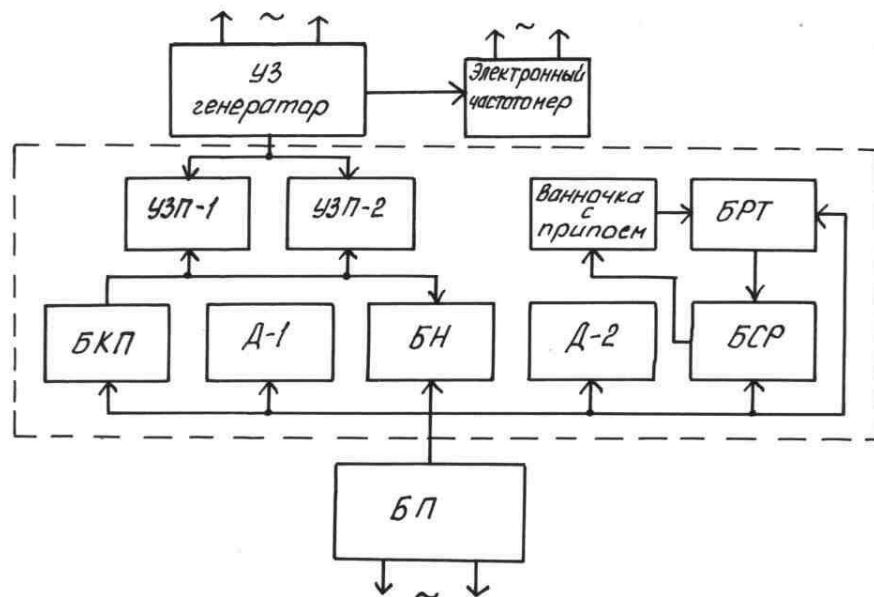


Рис.6.3. Схема установка УЗ металлизации стеклокерамических материалов

Рентгеноструктурный анализ переходной области спая с пьезокерамикой показал, что в системах керамики ТБК-3 и ЦТБС-3 присутствуют окислы цинка и кремния, а также новая фаза Zn_2SiO_4 . Самая широкая переходная зона с наибольшей микротвердостью (по сравнению с припоем) образуется при содержании цинка в припое 5—7 мас.%, поэтому этот состав признан оптимальным для металлизации пьезокерамики [45].

Оловянно-цинковые сплавы эвтектического состава П200А (90% Sn, 10% Zn) и заэвтектического П250А (80% Sn, 20% Zn) ввиду хорошей смачиваемости и растекаемости при воздействии ультразвуковых колебаний, высокой механической прочности и устойчивости против коррозии в наибольшей степени пригодны для металлизации керамических и стеклокерамических материалов. Предел прочности при растяжении металлизированного покрытия на керамических образцах достигает 39—50 МПа, причем разрыв образца происходит главным образом по керамической основе, что указывает на более высокую прочность сцепления покрытия по сравнению с прочностью керамики.

Оловянно-свинцовые сплавы ПОС40, ПОС61 дают худшие результаты по прочности сцепления с основным материалом. Отсутствие в их составе адсорбционно-активного элемента цинка приводит к тому, что прочность сцепления припоя со стеклокерамическими материалами зависит только от степени шероховатости поверхности и определяется сравнительно слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Присутствие свинца в больших количествах делает эти припои коррозионно-неустойчивыми. Предел прочности при растяжении металлизированного покрытия на керамике не превышает 15 МПа. Расплавы припоев на свинцовой и оловянной основе с цинком и кадмием, содержащие по 3—4 компонента, под воздействием ультразвука значительной интенсивности могут изменять свой состав [181].

В работе [182] приведены экспериментальные исследования влияния вида ультразвуковых колебаний на величину кавитационного давления в расплавах припоев и на прочность спаев со стеклокерамическими материалами. Возбуждение различных видов ультразвуковых колебаний осуществлялось с помощью магнестрикционных преобразователей: продольных колебаний с частотой 44 кГц (а), поперечных 41 кГц (б), крутильных 22 кГц (в), импульсных продольных колебаний со скважностью 2—6 (г) по схемам, изображенным на рис. 6.4. Источником питания преобразователей служил ультразвуковой генератор УЗГ-3-0,4 с выходной мощностью 400 Вт. Амплитуда колебаний излучающего торца волновода составляла 8—10 мкм. Величина зазора между излучающим торцом волновода и металлируемой поверхностью регулировалась с помощью микрометрического механизма перемещения излучателей.

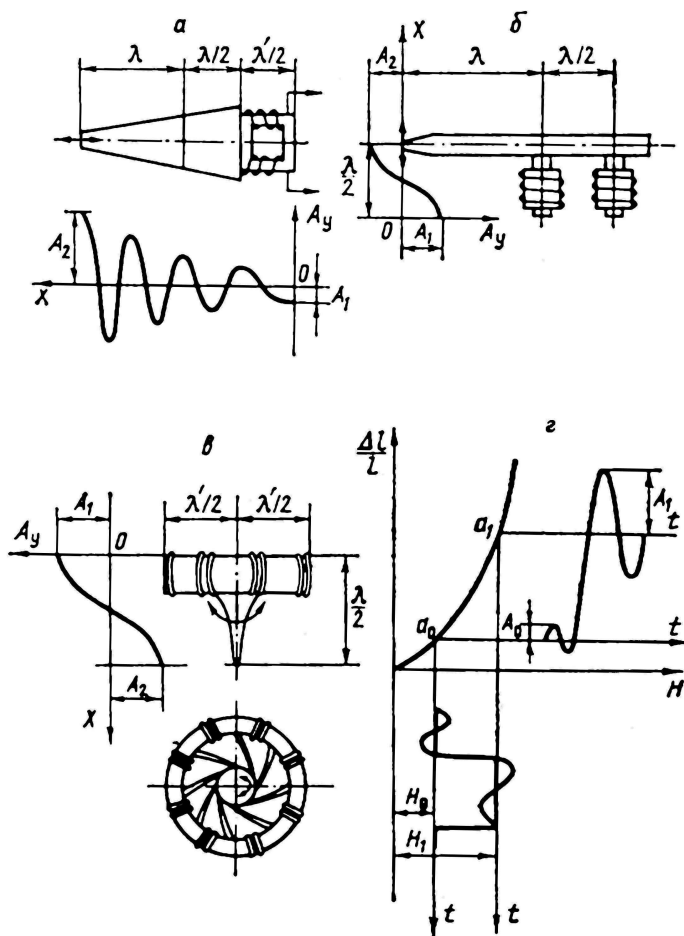


Рис. 6.4. Схема возбуждения ультразвуковых колебаний в припое

Возбуждение импульсных продольных колебаний достигалось подачей импульса тока подмагничивания амплитудой H_1 , при этом рабочая точка смещалась на более крутой участок характеристики преобразователя. Амплитуда импульсных колебаний A_1 в 1,5—3,5 раза превышала амплитуду непрерывных колебаний A_0 . Генерирование импульсов колебаний осуществлялось с помощью специального генератора. Для увеличения постоянной составляющей тока подмагничивания был использован дополнительный источник постоянного тока типа ВСА-10 (рис. 6.5).

Ультразвуковая металлизация стеклокерамических материалов на основе керамики марок Т-80, Т-150, Т-260 и стекла проводилась легкоплавкими оловянно-цинковым припоем П200А и экспериментально разработанным припоем на основе свинца и олова с добавками цинка и индия [37]. Ультразвуковое кавитационное давление в расплавах припоев измерялось кавитометром по величине спектральной плотности кавитационного шума в полосе частот 100—200 кГц. Давление в кавитационной области воспринималось измери-

тельным щупом с рабочей площадью $0,8 \text{ см}^2$, соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем упругим волноводом. Датчик был снабжен нагревателем, позволяющим поддерживать необходимую температуру воспринимающей поверхности измерительного щупа.

Прочность сцепления припоев с поверхностью стеклокерамики оценивали по напряжению отрыва участка металлизации. Кратность повторения опытов была не менее пяти. С целью повышения точности измерений усилия отрыва, а также исключения ударных нагрузок образцы нагружали на разрывной машине РП-100 в два этапа: предварительное со скоростью $1,5—1,8 \text{ кН/мин}$ и основное $8,8 \text{ кН/мин}$.

Уровни кавитационного давления в припое системы Pb—Sn—Zn—In при различных видах ультразвуковых колебаний, вводимых в тонкий слой припоя размером $0,1 \text{ мм}$ между излучателем и измерительным щупом, приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3. - Уровни кавитационного давления в тонком слое расплава припоя при возбуждении в нем различных видов колебаний

Вид колебаний	Частота, кГц	Амплитуда колебаний, мкм	Кавитационное давление $p_k \cdot 10^3$, Па
Продольные	44	8—10	2,8—3,0
Поперечные	41	8—10	3,6—3,8
Крутильные	22	10-15	0,5
Продольные импульсные	44	10-15	3,5—3,7

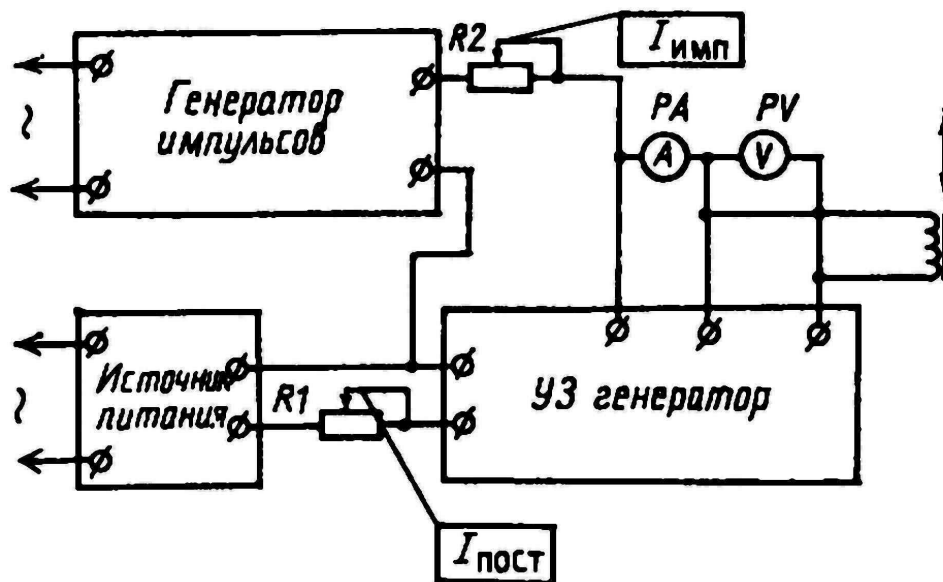


Рис.6.5. Схема подачи импульсных колебаний на магнитострикционный преобразователь

Как показывает анализ экспериментальных данных, при введении в расплав припоя колебаний, параллельных паяемой поверхности, при расстояниях между торцом излучателя и поверхностью $0,1 \text{ мм}$ значение кавитационного давления в припое возрастает в среднем на 25%, что позволяет повысить производительность процесса металлизации и улучшить качество соединений.

6.2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ультразвуковая металлизация перспективна и для синтетических материалов, поскольку устраняет длительные и трудоемкие процессы металлизации традиционными методами. Ультразвуковой металлизации подвергались сополимеры стирола марок САМ, МЕН, СТАН, ПС-СУ, СНП-С низкотемпературными сплавами Вуда и состава Cd-Pb-Bi. Металлизуемые образцы (круглые пластины диаметром 20 мм и толщиной 5 мм) предварительно механически обрабатывались и обезжиривались. За критерий, определяющий качество металлизации, была принята адгезионная прочность покрытия при испытании на разрывной машине РМ-101 со скоростью 25 мм/мин.

В результате исследований были определены максимальная адгезионная прочность металлизации с указанными типами сополимеров (табл. 6.4), а также оптимальные технологические параметры процесса металлизации: электрическая мощность на выходе генератора P_A , оптимальный зазор между излучателем и поверхностью δ и угол наклона излучателя α . При увеличении электрической мощности на выходе ультразвукового генератора, а следовательно, и акустической мощности, вводимой в расплав, повышается адгезионная прочность соединения металл—полимер. Превышение мощности свыше 200 Вт вызывает интенсивное распыление расплава под действием кавитации, что сопровождается снижением прочности металлического покрытия и ухудшением его качества. Оптимальная величина зазора в процессе металлизации полимеров между инструментом, излучающим ультразвуковые колебания, и обрабатываемой поверхностью составляет 0,2—0,3 мм, а угол наклона инструмента к поверхности изделия— 20° . При этих значениях δ и α величина прочности соединения металлопокрытия с полимером наибольшая (рис. 6.6).

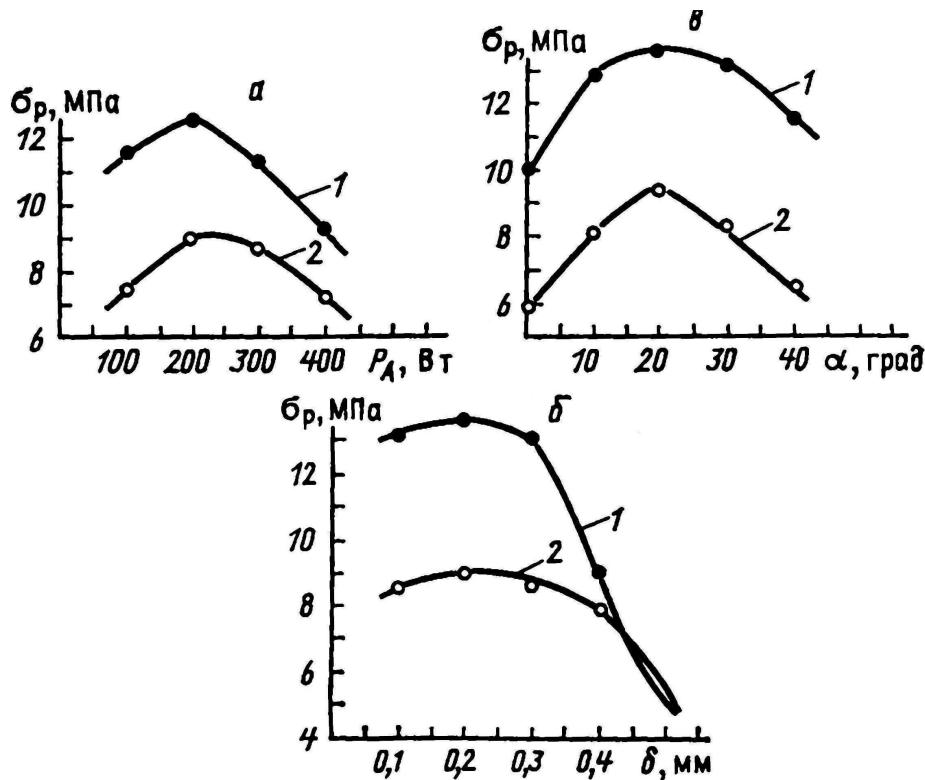


Рис. 6.6. Зависимость предела прочности при растяжении соединения полимер – припой от электрической мощности (а), зазора между излучателем и деталью (б) и угла наклона излучателя (в): 1 – сплав Cd-Pb-Bi; 2 – сплав Вуда

Таблица 6.4. - Максимальная адгезионная прочность сцепления ультразвуковой металлизации сополимеров сплавами

Сплав	Температура плавления, К	Адгезионная прочность, МПа				
		МСН	САМ	ПС-СУ	СТАН	СПС-С
Вуда	343	9,5	9,3	8,5	8,3	7,6
Cd — Pb—Bi	385	13,7	13,4	11,8	9,6	9,0

Высокая адгезионная прочность соединений металл — полимер (7—13 МПа) может быть объяснена наличием диффузионных процессов на границе раздела металл — полимер, а также химическим взаимодействием активных групп и радикалов полимера с ионами металлов или их окислами и образованием переходной зоны, отличающейся по своей физико-химической природе как от металла, так и от полимера. Если металлизация синтетических материалов с применением ультразвуковых колебаний происходит без физико-химического взаимодействия припоя с материалом, то прочность спаев незначительна и определяется сугубо силами адгезионного взаимодействия. Анализ данных табл. 6.5 показывает, что для увеличения прочности сцепления ультразвуковой металлизации с синтетическими материалами необходимы подбор специальных припоев и оптимизация режимов с целью создания условий для химического взаимодействия компонентов припоя с паяемым синтетическим материалом.

Таблица 6.5. – Адгезионная прочность сцепления припоя П200А при ультразвуковой металлизации синтетических материалов

Материал	Температура металлизации, К	Прочность сцепления $\sigma_B \cdot 10^4$, Па	Характер отрыва
Фторопласт	625	Не выше 5,0	Адгезионный
Феррит	623	66,6	Адгезионный
Органическое стекло	343	19,6	Адгезионный
Асботекстолит	573	93,1	Смешанный
Стеклотекстолит	423	78,4	Адгезионный

6.3. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Металлизация неметаллических материалов (керамики, абразивов, ферритов, стекла, кварца) чистыми металлами (цинком, алюминием, серебром и др.) требует высоких рабочих температур (743—1373 К). Это обуславливает особые требования к конструкции ультразвукового излучателя и оборудованию для металлизации. Если процесс ультразвуковой металлизации расплавом цинка еще может быть осуществлен с использованием обычного излучателя при увеличении мощности нагревательного элемента или применении внешнего подогрева деталей до 733—743 К, то для высокотемпературных процессов алюминирования и серебрения обычное оборудование непригодно, рекомендуется изготавливать излучатель (концентратор и наконечник) из титана. С целью более эффективного охлаждения излучателя общая его длина должна быть увеличена за счет сменного наконечника до 1,0—1,5 длины волны. На боковой поверхности сменного наконеч-

ника необходимо выполнить прорези (воздушный радиатор) для охлаждения, более эффективно охлаждать преобразователь проточной водой. Детали можно нагревать в электропечи с температурой 1373—1423 К, причем процесс металлизации необходимо вести непосредственно в печи. Для этой цели могут быть применены инфракрасные печи с диффузными отражателями, обеспечивающие нагрев как металлируемых деталей, так и наконечника волновода.

Применение в качестве припоев металлов с высокой температурой плавления повышает механическую прочность спаев с керамическими материалами.

Как видно из табл. 4.6, прочность сцепления алюминиевых и серебряных покрытий, полученных ультразвуковой металлизацией, превышает прочность керамики (20 МПа) и среднюю прочность спаев (в 3 раза) по покрытию, нанесенному вжиганием серебра.

Для ультразвуковой металлизации поликристаллических сверхтвердых материалов—композита O2(β -BN) и гексанида P(γ -BN) —применялись высокоплавкие припои на основе меди. Установлены интенсивное диспергирование поликристаллов в процессе металлизации при температуре 900—1170 К, химическое взаимодействие контактирующих фаз в ультразвуковом поле и заполнение расплавами поверхностных микротрещин поликристаллов. Металлизированные с помощью ультразвука поликристаллы плотных модификаций нитрида бора могут быть использованы в режущих инструментах [85].

Улучшение качества металлопокрытий на керамике, наносимых ультразвуковой металлизацией, достигается применением защитной атмосферы. С этой целью используют герметическую камеру с остаточным давлением 10^{-2} Па, которая затем заполняется осушенным аргоном. Для улучшения прочности сцепления металлопокрытий с керамикой в расплав предварительно вводят в виде порошка 0,5—1,0% металла от массы расплава из группы тугоплавких металлов (Nb, Mo, W, Ti, Zr, Gr). Процесс высокотемпературной металлизации керамики осуществляют при температуре припоя 1023 К и времени воздействия ультразвуковых колебаний до 1 мин. Амплитуда колебаний составляет 10—15 мкм, а зазор между изделием и излучателем находится в пределах 0,5—2,0 мм. Излучатель выполняют из того же металла, который предварительно вводят в припой. Растворение металла излучателя в процессе высокотемпературной металлизации дополнительно повышает концентрацию вводимого элемента. Добавки тугоплавких металлов интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия припоя с керамикой, в результате чего адгезионная прочность покрытий возрастает до 4,4—5,4 МПа [86].

Таблица 6.6. - Механическая прочность высокотемпературной металлизации различными металлами [5]

Металл	Температура металлизации, К	Рабочая температура конструкции, К	Механическая прочность на разрыв, МПа
Цинк	723	523	19,6
Алюминий	973	723	20,0
Серебро	1373	973	20,0

Металлизация пористых материалов, например графита, расплавами припоев под воздействием ультразвуковых колебаний позволяет обеспечить глубокое проникновение металла в поры материала за счет ультразвукового капиллярного эффекта, а также делает возможным получение новых композитных материалов. Металлизация и пропитка графита сплавами олова с магнием (1,5% Mg) и висмута с магнием (0,5% Mg) при амплитуде колебаний излучателя 10 мкм и длительности их воздействия 2 мин показали, что под действием ультразвука расплав проникает на всю толщину образца. Прочность на разрыв сцепления поверхностного слоя металла с графитом превышает прочность графита [183].

Таким образом, ультразвуковые высокотемпературные процессы металлизации

обеспечивают не только высокую прочность спаев, но и создают предпосылки для получения новых материалов в технике.

6.4. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Методы контроля качества металлизированных покрытий разделяются на две группы: разрушающие и неразрушающие. Испытания с разрушением паяных соединений применяются для определения механических и физико-механических свойств спаев. Физико-механические свойства паяного соединения изучаются путем приготовления шлифов отдельных участков спаива и наблюдением их под микроскопом.

Механические испытания различаются по способу нагружения и характеру его изменения во времени. Для паяных соединений наибольшее распространение получили испытания на срез и на отрыв. Испытания паяных образцов на срез с приложением растягивающей нагрузки проводят на плоских и круглых образцах, спаянных внахлестку (рис. 6.7).

При конструировании паяного соединения учитывают, что предел прочности паяного шва должен быть равен пределу прочности наиболее слабого элемента конструкции [184]:

$$\sigma_{np} S_{np} = \sigma_m S_m, \quad (6.1)$$

где σ_{np} , σ_m — пределы прочности припоя и материала; S_{np} , S_m — площади сечения припоя и материала. Отношение σ_m / σ_{np} , называемое коэффициентом прочности β , в большинстве случаев больше единицы, поэтому рабочее сечение паяного шва должно быть в несколько раз больше сечения основного материала. Напряжения среза и растяжения могут быть вызваны нагрузками, направленными по касательной (тангенциально) к паяному соединению. Величина нахлестки определяется из уравнения (6.1). В случае плоских образцов $aL_j = \beta aH$, $L_j = \beta H$. Для цилиндрических стержней ширина паяного соединения должна быть по крайней мере равна радиусу стержня меньшего диаметра или превышать его:

$$\frac{D_B}{2} L_j = \beta \frac{\pi}{4} D_B^2; \quad L_j = \frac{\pi}{2} \beta D_B.$$

Для испытаний на растяжение применяют в основном стыковые соединения. Для паяного соединения из двух элементов прямоугольного сечения в предположении, что паяный шов — наиболее слабый элемент, получаем, что прочность соединения $P_1 = \sigma_m aH$, а для круглых деталей $P_2 = \sigma_m \frac{\pi}{4} D_B^2$.

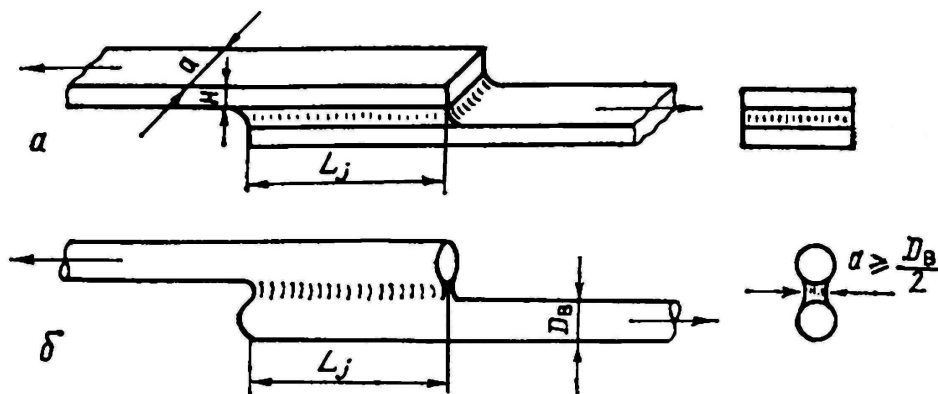


Рис. 6.7. Соединение внахлестку листового материала (а) и цилиндрического стержня (б)

Прочность сцепления покрытия с основным материалом — одна из важнейших ха-

рактических характеристик металлического покрытия, наносимого под воздействием ультразвуковых колебаний на неметаллический материал. Оценивается она методом нормального отрыва испытательного приспособления, припаянного легкоплавким припоем к металлическому покрытию.

Существующие методики используют различные виды испытательных приспособлений: проволочный крючок диаметром 0,8—1,0 мм, металлический стержень диаметром 3—5 мм, рамку площадью 6 мм², диск такой же площадью. Лучшие результаты получены при использовании приспособления с диском. При пайке площадь растекания припоя ограничивается трафаретом, имеющим диаметр на 1—2 мм больший диаметра диска [185].

Перпендикулярность оси диска по отношению к металлическому покрытию обеспечиваются с помощью специального приспособления, фиксирующего положение стержня в момент пайки. Температуру паяльника поддерживают на заданном уровне посредством автоматических регуляторов или электронных потенциометров. Эти меры позволяют в значительной степени уменьшить разброс экспериментальных данных [186].

Для испытаний на прочность сцепления используют различные типы разрывных машин, например РМИ-250, РМ-50 и др. Лучшие результаты могут быть получены на машинах с регулируемым усилием нагружения, поскольку неметаллические материалы в большинстве своем хрупки и поэтому чувствительны к воздействию ударных нагрузок (табл. 6.7).

Для определения прочности сцепления паяных соединений со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией, разработана специальная методика пайки испытательного приспособления и его отрыва [182]. К слою металлизации припоем ПОС61 с использованием спиртоканифольного флюса припаивалось испытательное приспособление с площадью основания 0,1 см². С целью исключения появления термотрещин и ослаблении механической прочности стеклокерамики образцы подогревались передподпайкой приспособления до величины не менее 0,5—0,7 температуры плавления припоя. Такая температура была определена экспериментально и согласуется с литературными данными о подогреве блоков керамических конденсаторов при электрическом монтаже до 383 К [188].

Таблица 6.7. – Технические характеристики машин для испытания на растяжение

Технические данные	РМУ-0,005-1	Р-0,5	Р-5	РП-100-1
Наибольшая предельная нагрузка, кг	50	500	5000	100
Диапазон показаний нагрузки, кг				
А	0—10	0—100	0—1000	5—50
Б	0—25	0—250	0—2500	10—100
В	0—50	0—500	0—5000	---
Погрешность измерения нагрузки при прямом ходе нагружения не более, %	1	1	1	±2
Скорость рабочего хода активного захвата, мм/мин	0—100	0,5—1000	1—100	6004:30
Высота рабочего пространства между захватами, мм	400	700	700	470
Регистрация нагрузки	Диаграммный аппарат	Диаграммный аппарат	Диаграммный аппарат	По шкале
Потребляемая мощность, кВт	0,5	0,5	2,0	0,18
Габаритные размеры, мм	520x640x1460	460x1260x1850	1400x710x2065	280x620x1510
Масса, кг	225	570	750	145

При подпайке приспособления температура жала паяльника поддерживалась на уровне 498 ± 5 К с помощью прибора-регулятора температуры жала паяльника. Для уменьшения возможных грубых погрешностей при измерениях приспособление при подпайке устанавливалось строго перпендикулярно к испытываемой поверхности. Отрыв испытательного приспособления осуществлялся нормально к поверхности образца на разрывной машине РП 100-1 при скорости движения нижнего захвата $0,6 \pm 0,03$ м/мин. Прочность сцепления оценивалась по величине усилия отрыва, определяемого по шкале разрывной машины с точностью $\pm 0,49$ Н, отнесенного к площади отрыва, подсчитанного под микроскопом МБС-2. Каждое значение прочности отрыва находилось как среднее арифметическое значение результатов испытаний пяти образцов. Схема испытаний на прочность сцепления металлического покрытия с основой показана на рис. 6.8.

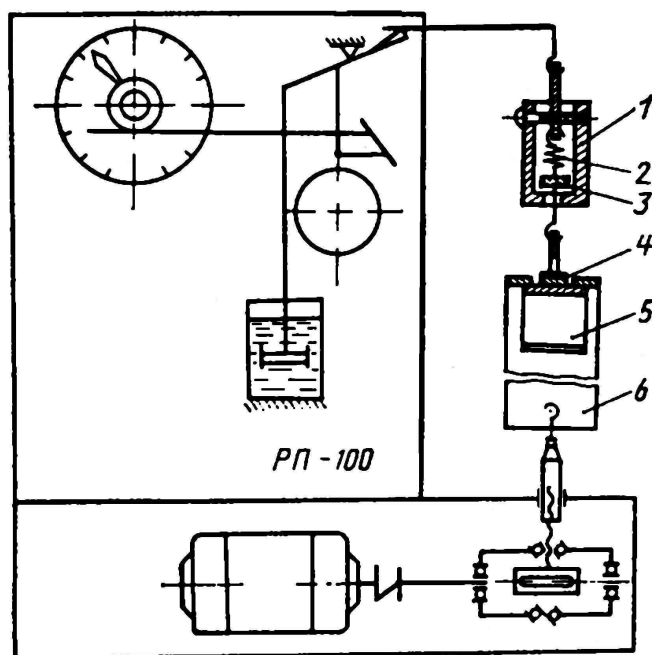


Рис. 6.8. Схема испытаний на прочность сцепления металлизации со стеклокерамическими материалами

С целью повышения точности измерений величины прочности сцепления, а также уменьшения разброса измерения нагружение образцов осуществляли в два этапа: предварительное со скоростью $1,5—1,8$ кН/мин до усилия 98 Н и основное со скоростью 8,8 кН/мин. Для предварительного нагружения применялось специальное устройство с тарированной пружиной,

Устройство (рис. 6.8) в виде стакана 1 с помощью крючков соединялось с верхним захватом разрывной машины и с испытательным приспособлением 4, припаянным к образцу 5. При движении нижнего захвата 6 разрывной машины пружина 2 растягивалась до момента жесткого контактирования ограничительного элемента 3 со стенкой приспособления. Плавный режим нагружения хрупких стеклокерамических материалов позволил исключить влияние ударных воздействий и повысить тем самым точность показаний.

Неразрушающие методы контроля спаев с керамическими и стеклокерамическими материалами разработаны в меньшей степени. Отсутствие неразрушающих методов количественного контроля прочности спаев известным образом сказывается на качестве изделий.

Предложен неразрушающий метод оценки качества металлизации, использующий

явление абсорбции конденсаторов, которое заключается в том, что если разрядить заряженный конденсатор, то через некоторое время на его электродах восстанавливается напряжение, величина которого зависит от степени неоднородности диэлектрика, наличия в нем внутренних дефектов и других факторов. Отношение остаточного напряжения к зарядному характеризуется коэффициентом абсорбции конденсаторов [188]. Метод был использован для оценки качества металлизации вакуумплотных спаев керамики 22ХС с металлами. Результаты испытания показали зависимость величины восстанавливающего напряжения от вакуумной плотности металлокерамических соединений.

ГЛАВА 7

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАЙКИ НА КАЧЕСТВО СПАЕВ И МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

7.1. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВЫ ПРИПОЕВ

Введение энергии ультразвуковых колебаний в расплавы припоев в процессе ультразвуковой пайки и металлизации оказывает значительное влияние, как на физико-химические характеристики расплавов припоя, так и на свойства припоев в твердом состоянии, изменяет температуру расплава и активирует отдельные компоненты припоя. В работе [27] исследована зависимость вязкости жидкого припоя от времени воздействия ультразвука. Ванна с расплавом припоя служила продолжением концентратора магнито-стрикционного преобразователя ПМС-15А18, развивающего при боте от генератора УЗГ-10М акустическую мощность 1 кВт на резонансной частоте 19,5 кГц. Мгновенные значения вязкости расплавов припоев определялись с помощью специально разработанного прибора, принцип работы которого заключался в измерении величины тока в обмотке электродвигателя в момент вращения вала с лопастью, погруженной в ванну с исследуемым расплавом при фиксированной температуре расплава.

Исследовалась вязкость расплавов сплава Вуда и припоев ПОС61, ПОССу10-2 в зависимости от времени воздействия ультразвуковых колебаний. Анализ зависимостей (рис. 7.1) показывает, что в течение первых 30 с вязкость расплавов резко падает, а затем возрастает, однако все же остается ниже исходной, измеренной до воздействия ультразвуковых колебаний. Это обусловлено снижением внутреннего трения и диссипацией акустической энергии в жидком припое с последующей ее трансформацией в теплоту. Увеличение времени воздействия ультразвука приводит к дегазации расплава, вызывая при этом некоторое увеличение вязкости.

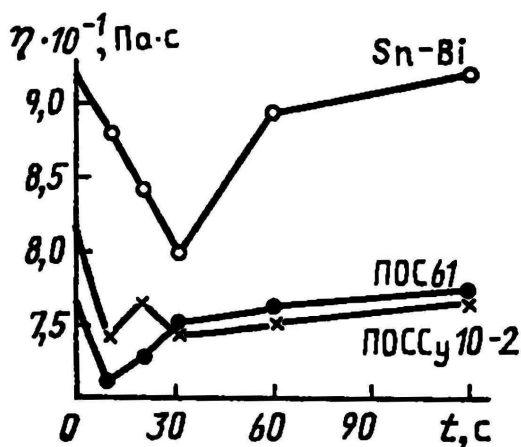


Рис. 7.1. Зависимость вязкости расплавов припоя от времени воздействия ультразвука

Воздействие ультразвуковых колебаний на расплавы припоев в процессе их кристаллизации при идентичных условиях (энергетические параметры ультразвука, температурный режим кристаллизации, объем расплава и т. д.) проявляется в измельчении структуры, причем более эффективное измельчение зерна под воздействием ультразвука происходит у оловянно-цинкового припоя П200А в течение первых 15 с. Припой П200А содержит 10% цинка. Выпадая из расплава, кристаллиты цинка способствуют развитию кавитации, которая в свою очередь приводит к измельчению структуры припоя в процессе его кристаллизации.

Нами исследована микроструктура припоев в исходном состоянии и после воздействия ультразвука частотой 44 кГц в течение 30 с интенсивностью $10 \cdot 10^4$ В/м², вызывающей кавитацию в расплаве. Анализ микроструктур припоев показывает, что под действием ультразвука происходит существенное измельчение кристаллов и более равномерное распределение вводимых легирующих добавок по всему объему припоя.

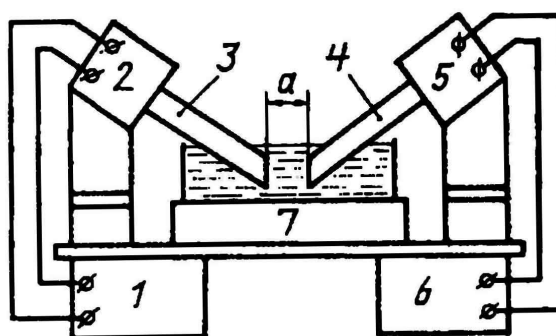


Рис.7.2. Схема установки для оценки ультразвуковой энергии, вводимой в расплав припоя

Анализ исходного состава припоев свидетельствует, что такие припои, как ПСр1,5 и ПОССу10-2, содержат неравномерно распределенные твердые кристаллы серебра в первом случае и сурьмы во втором. Поскольку кристаллы сурьмы имеют ромбоэдрическую форму, близкую к геометрической форме абразивных зерен, тем самым они способствуют увеличению абразивного воздействия припоя на паяемые материалы. Однако небольшое процентное содержание сурьмы (до 2%) не дает столь значительного эффекта.

Наличие индия в припое ПОИ50 существенно улучшает его смачивающую способность, однако снижает температуру плавления. Повышенная легкоплавкость эвтектического сплава Sn—In (390 К) ограничивает его использование в целях пайки и металлизации. Кроме того, под воздействием интенсивных ультразвуковых колебаний кристаллиты индия окисляются и могут быть окружены в припое тонкой окисной оболочкой. Величина ультразвуковой энергии, передаваемой в ванну с припоем, определялась по величине коэффициента пропускания [190]:

$$\tau_{\text{проп}} = \frac{z_B / z_{\text{ПР}}}{(z_B + z_{\text{ПР}})^2},$$

где z_B , $z_{\text{ПР}}$ — акустические сопротивления волновода и расплава припоя, рассчитываемые как $z = \rho c$. Оценка величины ультразвуковой энергии осуществлялась с помощью экспериментальной установки (рис. 7.2). Ультразвуковые колебания от генератора 1 поступали на преобразователь 2, возбуждающий упругие механические колебания в волно-

воде 3, погруженном в расплав припоя. Колебания воспринимались волноводом 4 и соединенным с ним пьезоэлектрическим датчиком 5. Напряжение, развиваемое датчиком, регистрировалось вольтметром 6. Волноводы 3, 4 находились на строго определенном расстоянии друг от друга в ванне припоя 7. По величине электрического напряжения, возбуждаемого в пьезоэлементе, судили об ультразвуковой энергии, передаваемой припоем. Исследования, выполненные для различных припоев при расстоянии между ультразвуковыми волноводами 15 мм и резонансной длине волновода $\lambda/2$, приведены в табл. 7.1 [190].

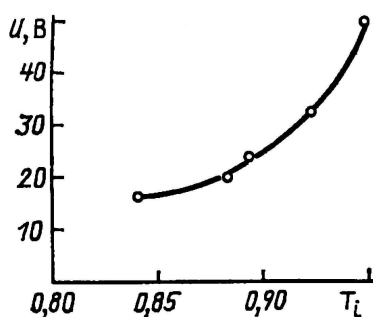


Рис. 7.3. Зависимость напряжения, регистрируемого вольтметром, от коэффициента пропускания

Как видно, величина ультразвуковой энергии, передаваемой в оловянно-цинковые и цинково-алюминиевые припои, выше, чем в оловянно-свинцовые, что объясняется особенностями микроструктуры припоев.

Расчетные значения акустических сопротивлений различных металлов при комнатной температуре приведены в табл. 7.1, а зависимость между коэффициентом пропускания ультразвука и напряжением, регистрируемым вольтметром, показана на рис. 7.3.

Как видно из представленных данных, для оловянно-цинковых и цинково-алюминиевых припоев ввиду их высокого акустического сопротивления коэффициент пропускания составляет 0,90—0,95. Величина ультразвуковой энергии, передаваемой расплаву припоя, резко снижается с увеличением расстояния между волноводами и почти не зависит от температуры припоя (рис. 4.10), что позволяет использовать широкие температурные интервалы для процессов ультразвуковой пайки и металлизации.

Таблица 7.1. – Электрические напряжения, возбуждаемые в пьезодатчике

Состав, мас. %	Температура припоя, К	Напряжение, регистрируемое вольтметром, В
60 Sn — 40 Pb	523	16
96,5 Sn—3,5 Ag	523	18
100 Sn	523	19
91 Sn—92 Zn	523	24
95 Zn — 5 Al	713	50

Величина ультразвуковой энергии, передаваемой в расплав припоя, зависит от ряда факторов: частоты и амплитуды колебаний волновода, вида ультразвуковых колебаний

(продольные, поперечные, крутильные) и т. д. Определение кавитационного давления в жидкостях и расплавах — один из методов объективной оценки параметров ультразвукового воздействия.

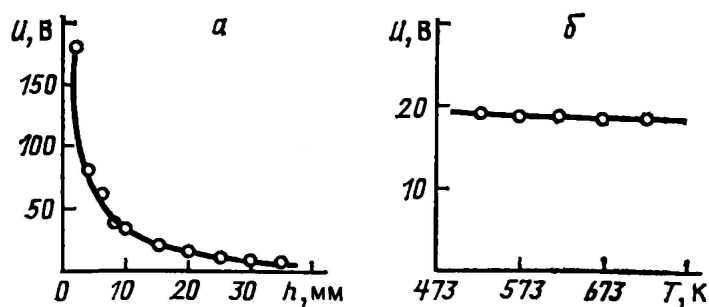


Рис. 7.4. Зависимости напряжения, регистрируемого вольтметром, от расстояния между волноводами (а) и температуры припоя (б)

При измерении кавитационного давления в ультразвуковых ваннах лужения измерительный щуп погружался в ванну с припоем на заданную глубину, при этом фиксировались угол наклона щупа и глубина его погружения. При ультразвуковой пайке ручным паяльником измерительный щуп закреплялся неподвижно. На воспринимающую поверхность щупа наносилась дозированная навеска припоя, которая затем расплавлялась с помощью нагревателя и удерживалась на поверхности щупа за счет сил поверхностного натяжения. Излучающий торец концентратора паяльника приводился в соприкосновение с расплавом припоя. На воспринимающей поверхности измерительного щупа при этом фиксировалась величина зазора между торцом излучателя и поверхностью щупа, а также угол наклона излучателя. Показания прибора регистрировались через 1—2 с после начала ультразвуковой активации. За это время процесс кавитации принимал устойчивый характер. Время измерения давления кавитации в расплавах припоев составляло 3—5 с.

Таблица 7.2. – Акустические сопротивления материалов

Материал	Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Скорость звука $c \cdot 10^3$, м/с	Акустическое сопротивление $z \cdot 10^6$, кг/(м ² ·град)
Олово	7,3	2,7	19,7
Цинк	7,1	3,8	27,0
Серебро	10,5	2,7	28,4
Свинец	11,3	1,2	13,6
Алюминий	2,7	5,1	13,8
Сталь (волновод)	7,8	5,2	40,6

Анализ зависимости величины кавитационного давления в расплаве припоя Pb—Sn—Zn—In при ультразвуковой пайке стеклокерамических материалов паяльником УЗП2-0,025 с резонансной частотой $44 \pm 0,5$ кГц показывает, что если возбуждающая частота ультразвуковых колебаний близка к резонансной частоте ультразвукового инструмента, равной 43,5 кГц, то выходное напряжение ультразвукового генератора резко падает вследствие увеличения амплитуды резонансного тока в обмотке возбуждения, при этом амплитуда смещений торца концентратора максимальна и достигает 8—10 мкм. Наибольшая ве-

личина кавитационного давления в припое (3— 3,2 кПа) отмечена на частотах, превышающих резонансную на 0,2—0,5 кГц. Это связано с тем, что в акустической системе преобразователь—согласующий элемент — концентратор возникает ряд гармоник и субгармоник основной частоты, которые способствуют развитию кавитационных процессов в припое. Частотная зависимость кавитационного давления в расплаве припоя имеет три условно выделенные области: *I*—докавитационная; *II* — область развитой кавитации, которая облегчает процесс настройки ультразвукового инструмента; *III*— закавитационная область, которая существенного значения в процессе пайки не имеет (рис. 7.5).

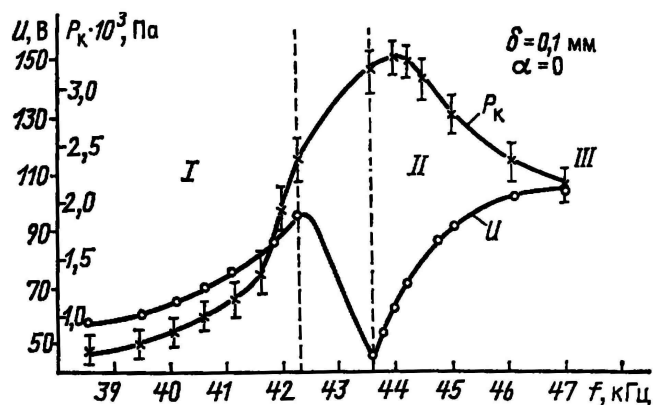


Рис. 7.5. Зависимости напряжения ультразвуковой частоты и кавитационного давления в припое системы Pb-Sn-Zn-In от частоты колебаний

Зависимость величины кавитационного давления в расплавах припоев Pb—Sn—Zn—In 1 и П200А 2 от угла ввода излучателя в припой α и зазора между торцом излучателя и измерительным щупом δ приведены на рис. 7.6. Общим для полученных зависимостей является нелинейное падение кавитационного давления вследствие рассеивания и поглощения части ультразвуковой энергии расплавом припоя. Наибольшая величина кавитационного давления отмечается при уменьшении зазора до 0,1 мм и угле ввода излучателя, близком к нулю в случае продольных колебаний [187].

Исследование величины кавитационного давления в модернизированной ультразвуковой ванне лужения УЗВЛ-0,4 показало, что интенсивность кавитации в припое ПОС61 линейно зависит от выходного напряжения, нелинейно изменяется с частотой и падает при увеличении расстояния от излучателя, являющегося дном ванны. На частоте, близкой к резонансной частоте преобразователя ванны 20,5 кГц, при амплитуде выходного напряжения 240 В и вблизи дна ванны кавитационное давление достигает 3,5—3,6 кПа [123].

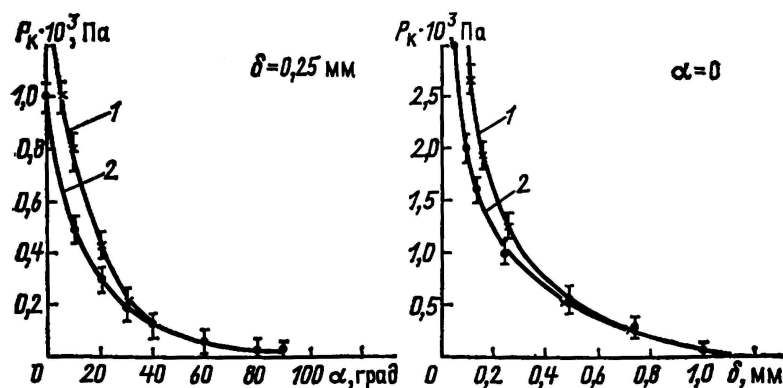


Рис. 7.6. Зависимости кавитационного давления в припоях от угла ввода колебаний и величины зазора между торцом волновода и измерительным щупом

Измерение кавитационного давления в припоях с помощью кавитометра позволяет объективно оценить энергетический режим ультразвуковой активации процесса пайки или лужения, произвести настройку ультразвукового технологического оборудования и инструмента и обеспечить получение надежных и качественных соединений.

7.2. ВЛИЯНИЕ ВИДА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И КАВИТАЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ В РАСПЛАВАХ ПРИПОЕВ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Основным видом генерируемых и передаваемых в расплавы припоев ультразвуковых колебаний следует считать продольные колебания, интенсивность которых нелинейно убывает при увеличении расстояния от излучателя, что заставляет поддерживать постоянной величину зазора в пределах 0,2—2,0 мм. Необходимость постоянного поддержания такой величины зазора вызвана также исключением появления макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов за счет ударного воздействия на них ультразвуковой волны, направленной нормально к поверхности. Снижения динамического воздействия на паяемый материал достигают путем изменения угла введения ультразвука в припой с 90° до $30\text{—}40^\circ$ [146].

Однако процесс пайки или металлизации при малых зазорах между торцом ультразвукового излучателя и паяемой поверхностью (порядка 0,1 мм) весьма сложен, поскольку требуется строгое поддержание величины зазора и малейшие погрешности могут привести к появлению жесткого контакта излучателя с паяемой поверхностью керамики или стеклокерамики. При этом неизбежно появление микро- и макротрещин за счет микроударов излучателя о поверхность подложки, а в отдельных случаях при наличии внутренних дефектов — разрушение изделий. В случае продольных ультразвуковых колебаний величина зазора между излучателем и паяемой поверхностью выбирается в пределах $0,2 \pm 0,5$ мм.

Имеются сведения об использовании излучателей, создающих колебания в расплаве припоя, параллельные паяемой поверхности керамического материала [191]. При введении в расплав припоя поперечных колебаний, направленных тангенциально к паяемой поверхности в тонком слое припоя между излучателем и паяемой поверхностью ($h \leq 0,25$ мм), могут возникать колебания со значительным кавитационным давлением [187]. В этом случае тонкий слой расплавленного припоя, по-видимому, приобретает свойства твердого тела, т. е. появляется упругость формы по аналогии с граничными слоями жидкости, и поэтому ультразвуковые колебания сравнительно хорошо распространяются в припое параллельно паяемой поверхности, создавая тем самым большую величину кавитационного давления, поскольку при этом меньшая часть ультразвуковой энергии передается в подложку и тратится на ее нагрев.

При тангенциальных колебаниях поверхность керамического или стеклокерамического материала не испытывает микроударов и механических напряжений так, как при нормальных к поверхности изделия колебаниях, что способствует увеличению механической прочности сцепления припоя с поверхностью хрупкого неметаллического материала. В этом случае улучшается также процесс смачивания материала припоем за счет эффекта натирания.

Использование ультразвуковых колебаний, параллельных паяемой поверхности, позволяет получить значительную величину кавитационного давления в припое при зазорах между торцом излучателя и паяемой поверхностью, равных 0,15—0,3 мм, и углах ввода колебаний 0—15°. Это повышает производительность процесса ультразвуковой пайки и металлизации, снижает жесткие требования к настройке технологического оборудования и инструмента, что обеспечивает высокую стабильность технологического процесса.

Крутильные колебания в расплавленном припое даже при значительных амплитудах не создают кавитационного давления необходимой величины. Так как внутреннее трение в жидком агрегатном состоянии значительно ниже, чем в твердом, крутильные колебания быстро затухают в жидкой среде, поэтому применение их в процессах пайки и металлизации нецелесообразно.

Кавитационное давление в припое можно увеличить путем применения импульсных колебаний, направленных нормально к поверхности детали и подаваемых в жидкий припой в сочетании с непрерывными колебаниями. При этом амплитуда импульсных колебаний в 1,5 раза и более превышает амплитуду непрерывных колебаний. После подачи ультразвукового импульса следует пауза, продолжительность которой равна или несколько меньше длительности импульса. Непрерывно подаваемые в припой колебания с интенсивностью, обеспечивающей кавитацию, в период паузы создают демпфирование динамических импульсов, возникающих под действием ультразвука, и тем самым предохраняют подложку от разрушения.

Исследование зависимости величины кавитационного давления в экспериментальном припое системы Pb—Sn—Zn—In от скважности импульсных продольных колебаний и величины тока подмагничивания показало, что оптимальными условиями работы являются скважность 1,5—5, ток подмагничивания 1,0—1,5 А. При большей величине тока подмагничивания магнитострикционный преобразователь входит в режим насыщения, однако амплитуда колебаний вследствие перегрева преобразователя не увеличивается. Прочность сцепления со стеклокерамикой припоев П200А 1 и экспериментального Pb—Sn—Zn—In 2 зависит от кавитационного давления в расплаве (рис. 7.7), причем максимальное значение прочности сцепления припоев при продольных колебаниях соответствует кавитационным давлениям 1,5—2,5 кПа [182].

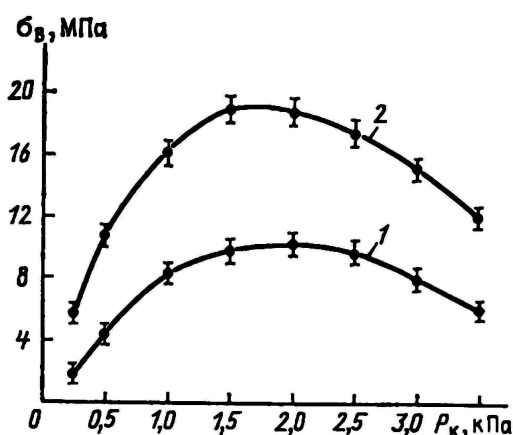


Рис. 7.7. Зависимости прочности сцепления припоев со стеклокерамикой от кавитационного давления в расплавах припоев: 1 – П200А; 2 – Pb-Sn-Zn-In

При больших или меньших уровнях кавитационного давления прочность сцепления припоев с основой уменьшается. Это можно объяснить тем, что в первом случае при захлопывании кавитационных пузырьков возникающие динамические импульсы вызывают появление микротрещин во впадинах микрорельефа и в приповерхностных слоях, что приводит к локальному разрушению поверхности. Наблюдаемое при интенсивных ультразвуковых колебаниях разрушение металлизированной поверхности близко по своему физическому смыслу к кавитационной эрозии паяемого металла. Во втором случае при малых уровнях кавитационного давления развитие кавитационных процессов не достигает порога смачивания, характерного для расплавов припоев. Введение колебаний в припой параллельно паяемой поверхности стеклокерамического материала позволило увеличить прочность сцепления припоя Pb—Sn—Zn—In 2 с поверхностью не менее чем в 1,5 раза. Следовательно, возбуждение в припое таких ультразвуковых колебаний в процессах ультразвуковой пайки и металлизации предпочтительнее.

Применение импульсных колебаний, направленных нормально к поверхности изделия, увеличивает величину кавитационного давления в среднем на 20—25% по сравнению с непрерывными колебаниями и способствует формированию более прочных паяных соединений с керамическим материалом, имеющим развитый микрорельеф поверхности, например, с установочной керамикой.

Влияние импульсных колебаний, направленных нормально к поверхности, на прочность сцепления со стеклокерамикой исследовалось также с использованием припоев П200А и экспериментального Pb—Sn—Zn—In. Ультразвуковая металлизация стеклокерамических материалов осуществлялась с количеством импульсов в секунду 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 и без импульсов. Средний ток подмагничивания магнотрикссионного преобразователя поддерживался на уровне 4,5 А, что в 1,5 раза превышало ток подмагничивания в обычном режиме (табл. 7.3). Установлено, что оптимальным является режим 1,5—2,0 импульса в секунду, при этом прочность сцепления возрастает в 1,7—1,8 раза. Дальнейшее увеличение частоты импульсов приводит к снижению прочности сцепления ввиду инерционности зарождения и развития кавитационных процессов в припое.

Таблица 7.3. – Прочность сцепления припоев, МПа, со стеклокерамикой при различной частоте импульсов (при $f=44$ кГц, $A=10$ мкм)

Исследуемый припой	Количество импульсов в секунду				
	0	1,0	1,5	2,0	2,5
П200А (Sn — Zn)	10,0	16,9	17,6	18,6	17,0
Pb — Sn — Zn — In	16,0	17,9	18,8	20,7	18,9

Прочность сцепления припоя Pb—Sn—Zn—In с различными керамическими и стеклокерамическими материалами, применяемыми для изготовления конденсаторов постоянной емкости, исследовалась при оптимальных параметрах процесса ультразвуковой металлизации. Как показали результаты испытаний (табл. 7.3), определяющим фактором для достижения высокой прочности сцепления является наличие стеклофазы в материале. При значительном ее содержании (70—90 мас.%) прочность сцепления изменяется не существенно, поскольку отрыв металлизированного покрытия происходит по стеклокерамическому материалу и его прочность характеризуется в основном прочностью сцепления.

Исследования прочности сцепления припоев П200А и системы Pb—Sn—Zn—In в зависимости от степени шероховатости поверхности стеклокерамики показали, что при ультразвуковой металлизации экстремальные значения предела прочности сцепления обоих припоев с основой соответствуют шестому классу шероховатости и равны 9,8 МПа для припоя П200А 2 и 16,5 МПа для Pb—Sn—Zn—In 1 (рис. 7.8). С уменьшением шерохова-

тости прочность их сцепления со стеклокерамикой уменьшается, причем степень ее снижения для припоя П200А больше, чем для экспериментального, и составляет 11,4 и 3,1% соответственно.

Для оловянно-свинцовых припоев ПОС30 и ПОС61 отмечена более резко выраженная зависимость прочности сцепления от степени шероховатости керамики [84], поскольку для них характерен чисто адгезионный механизм образования спая с керамикой.

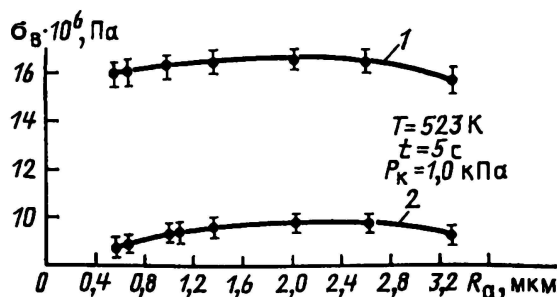


Рис. 7.8. Зависимости прочности сцепления припоев со стеклокерамикой от степени шероховатости ее поверхности

Изменение прочности сцепления в области малой степени шероховатости можно объяснить уменьшением площади контакта припоя со стеклокерамикой. Снижение прочности сцепления в области более глубокого микрорельефа связано с усталостными процессами [192], зарождением локальных микротрещин во впадинах микронеровностей, являющихся хорошими концентраторами напряжений, дроблением микровыступов.

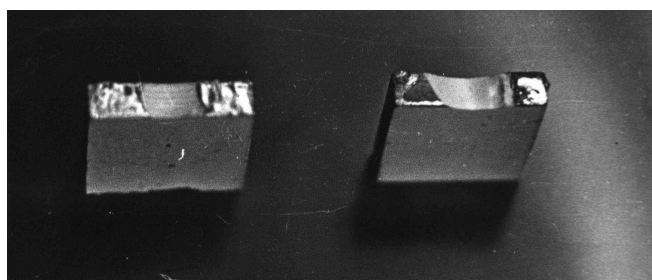


Рис. 7.9. Образцы стеклокерамики после испытания на прочность сцепления с ней различных типов припоев

Как показали испытания образцов на отрыв участка металлизации при использовании припоев П200А и системы Pb—Sn—Zn—In, разрушение происходит главным образом по телу стеклокерамики (рис. 7.9). Прочность сцепления этих припоев со стеклокерамикой в 3—3,5 раза превышает прочность сцепления покрытий, нанесенных вжиганием серебряной пасты. Оловянно-свинцовые припои типа ПОС61 даже при значительных кавитационных давлениях не обеспечивают достаточной прочности сцепления с паяемым материалом, и при испытании на прочность наблюдается адгезионный характер разрушения. При исследовании физико-механических свойств и структуры металлических спаев со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией, установлено, что прочность сцепления припоев со стеклокерамикой больше зависит от величины кавитационного давления в припое, чем от степени шероховатости поверхности.

7.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ПРОЦЕССОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАЙКИ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ

К технологическим режимам процесса ультразвуковой металлизации относятся температурные и временные параметры, геометрические параметры ввода ультразвуковых

колебании в расплав припоя, а также качество подготовки металлируемой поверхности.

Температура процесса ультразвуковой пайки материалов зависит в первую очередь от применяемых припоев. Так для оловянно-цинковых припоев П200А, П250А, П350А она выбирается в интервале 473—593 К с тем, чтобы в расплаве присутствовали первичные кристаллы припоя, т. е. между линиями солидуса и ликвидуса данного припоя (рис. 7.10). Для легкоплавких припоев на основе олова или свинца с добавками индия, висмута, кадмия и других металлов температура процесса пайки T_{II} должна превышать температурный порог кавитации $T_K(T_{II} \geq T_K)$, поскольку при этом условии наблюдается совместное действие кавитации и первичных кристаллов, находящихся в расплаве, которое приводит к разрушению окисной пленки и смачиванию припоем паяемой поверхности. Зависимость коэффициента α , характеризующего смачивание от температуры процесса пайки показана на рис. 7.11.

При увеличении мощности ультразвуковых колебаний, вводимых в припой, температурный порог кавитации снижается до температуры плавления припоя, и, наоборот, увеличение температуры нагрева паяемых изделий позволяет уменьшить амплитуду ультразвуковых колебаний, однако при этом увеличивается окисление паяемой поверхности и припоя.

В работе [39] определены температурные пороги процесса ультразвукового лужения различных легкоплавких металлов, а также установлено уменьшение активности добавок в отношении снижения температурного порога кавитации в ряду металлов Li, Zn, Ga, Ge, In, Pb, Bi, Cd, что примерно соответствует уменьшению их физико-химического взаимодействия с алюминием. Исследования показали, что действие нескольких активных добавок неаддитивно, например совместное легирование Li и Zn не более эффективно, чем порознь. Полученные результаты указывают на важную роль химического взаимодействия компонентов припоя со сплавом АМГ-6.

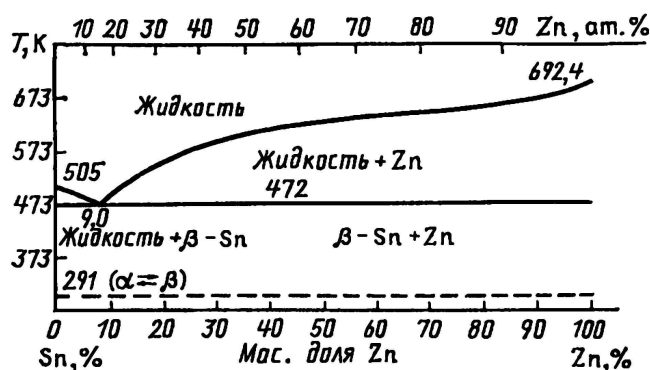


Рис. 7.10. Диаграмма состояния припоя системы Sn-Zn

Минимально необходимое время ультразвуковой пайки составляет 1—3 с, при этом получается достаточно прочное соединение, если выполнены необходимые требования: по температуре нагрева детали, подготовке поверхности, выбору припоя. Однако необходимо учитывать, что лужение происходит только на участке, находящемся под непосредственным воздействием излучающего элемента волновода. Поэтому при пайке соединений с большей длиной время воздействия ультразвуковых колебаний необходимо увеличивать пропорционально отношению длины соединения L_n к диаметру излучающего элемента D_B :

$$T_{II} = k \frac{L_n}{D_B},$$

где k —коэффициент пропорциональности, равный 1,25—1,50. Увеличение времени лужения свыше 5 с для большинства алюминиевых сплавов приводит к заметной эрозии паяемой поверхности вследствие растворения паяемого материала в припое при активном

воздействии процесса кавитации [193].

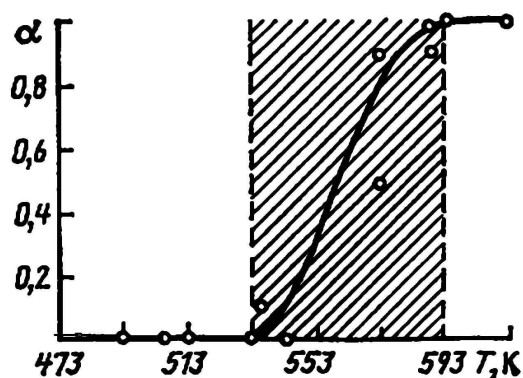


Рис. 7.11. Зависимости коэффициента растекания припоя по сплаву АМГ-6 от температуры

Введение порошка ферротитана в оловянно-цинковые припои в качестве абразива увеличивает коэффициент эрозии облуживаемого металла. На рис. 7.12 приведены зависимости коэффициента эрозии δ от температуры при постоянном времени лужения 10 с и от времени лужения при постоянных температуре 523 К и интенсивности ультразвука 8,5 Вт/см². Из рисунка видно, что увеличение как температурного, так и временного фактора процесса лужения алюминия повышает коэффициент эрозии. Это заставляет ограничивать время лужения и устанавливать верхний температурный предел процесса [148].

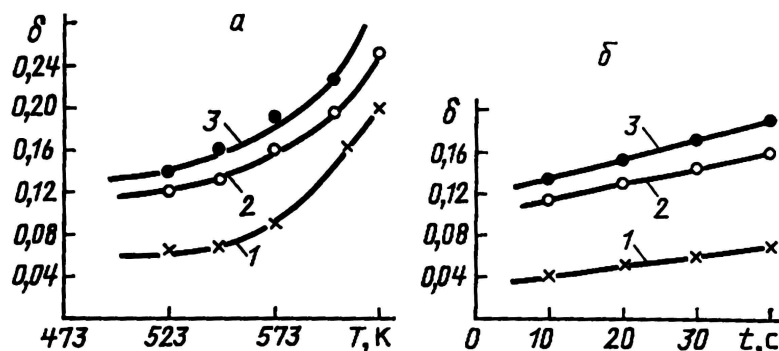


Рис. 7.12. Зависимости коэффициента эрозии алюминия от температуры (а) и времени ультразвукового лужения (б): для оловянно-цинковых припоев с содержанием цинка 10% (1), 20% (2) и 50% (3)

Рациональный выбор температурного и временного факторов в процессе ультразвуковой металлизации играет немаловажную роль, поскольку получение надежных спаев с неметаллическими материалами требует наличия физико-химического взаимодействия компонентов припоя с паяемым материалом и образования новых фаз, что в свою очередь зависит от температуры и длительности процесса. Следует также учитывать, что только создание режима развитой кавитации в расплаве припоя может обеспечить проявление термического эффекта кавитации, сопровождающегося локальным повышением температуры до 1000 К и более. Локальные тепловые микрополя, возникающие в зоне металлизации материала, интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия припоев и материала детали при формировании спая.

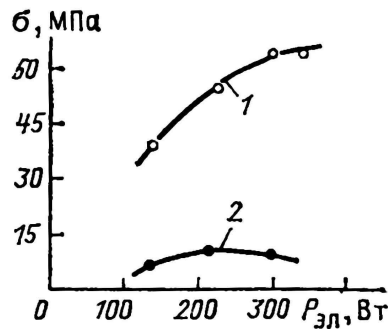


Рис. 7.13. Зависимость прочности спаев от электрической мощности, подводимой к излучателю: 1 – сплав АМГ-6; 2 – сплав ВТ5-1

В работе [146] приведены результаты исследования ультразвуковой металлизации алюминиевого АМГ-6 и титанового ВТ5-1 сплавов оловянно-цинковых припоем П200А и определены оптимальные технологические режимы процесса: величина акустической мощности, вводимой в расплав, P_{AK} , зазор между инструментом и образцом δ , угол наклона инструмента к поверхности образца α , состояние поверхности металлируемого образца. О величине P_{AK} судили по электрической мощности, подводимой к излучателю. Как показал анализ (рис. 7.13), при уменьшении мощности ультразвуковой энергии, подводимой к излучателю, прочность спаев резко уменьшается. Однако с увеличением мощности свыше 350 Вт происходил незначительный рост прочности спаев и наблюдалось интенсивное распыление припоя, вызванное мощной кавитацией в расплаве.

Оптимальная прочность спаев наблюдается при зазоре 0,15—0,2 мм (рис. 7.14). При зазоре, меньшем 0,15 мм, возможен жесткий контакт поверхности детали и металлирующего инструмента, а с увеличением зазора свыше 0,20 мм прочность спаев уменьшается ввиду рассеяния акустической энергии, вводимой в расплав. При угле наклона 0—20° величина вводимой в припой акустической мощности велика, что сопровождается распылением и повышением окисления припоя. Оптимальный режим металлизации сплава ВТ5-1 характеризуется следующими параметрами: $P_{опт}=280$ Вт; $\delta_{опт}=0,2$ мм; $\alpha_{опт}=30^\circ$.

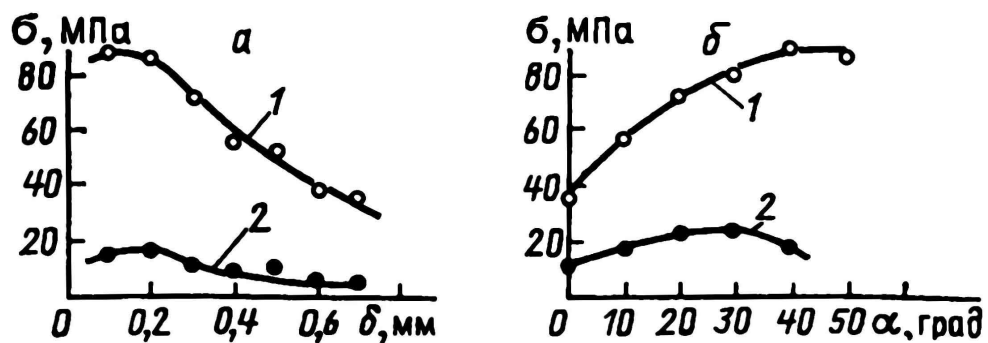
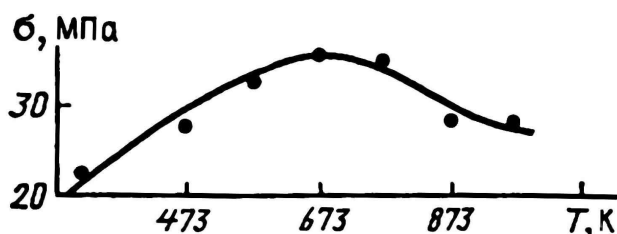


Рис. 7.14. Зависимости прочности спаев сплава ВТ5-1 от зазора между излучателем и деталью (а) и от угла наклона излучателя (б): 1 – сплав АМГ-6; 2 – сплав ВТ5-1

Ультразвуковая энергия, поступающая в расплав, затрачивается на активацию припоя и процессы физико-химического взаимодействия на границе с паяемым изделием. В некоторых случаях вторичное окисление предварительно очищенной поверхности улучшает адгезионные свойства металлизированных покрытий. Например, предварительное окисление титана позволяет повысить прочность сцепления металлизированных по-



крытий примерно в 3 раза (рис. 7.15). Это объясняется тем, что для протекания физико-химического взаимодействия компонентов припоя с окислом TiO_2 термодинамические условия при ультразвуковой металлизации наиболее благоприятны.

Рис. 7.15. Зависимости прочности спаев сплава ВТ5-1 от температуры оксидированного сплава

Как показали исследования зависимости прочности сцепления припоев Pb—Sn—Zn—In 1 и П200А 2 от времени, температуры ультразвуковой металлизации стеклокерамических материалов (рис. 4.22), для припоя системы Pb—Sn—Zn—In оптимальными следует считать температуру металлизации 533 ± 10 К, время 4 ± 1 с, прочность сцепления со стеклокерамикой при этом достигает 18—19 МПа. Для припоя П200А наибольшая прочность сцепления (8—10 МПа) достигается при температуре металлизации 593 ± 20 К и времени 7 ± 2 с. Дальнейшее увеличение температуры повышает окисление припоев, вызывает выгорание легкоплавких компонентов и ухудшает смачивающую способность. Увеличение времени ультразвуковой обработки свыше оптимального также приводит к снижению прочности сцепления, видимо, за счет уменьшения механической прочности неметалла в результате усталостных явлений [194].

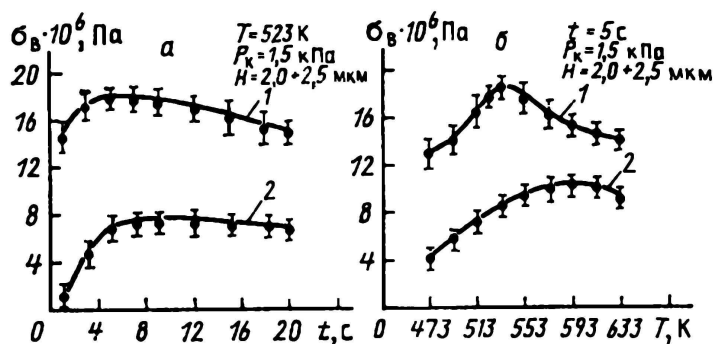


Рис. 7.16. Зависимости прочности сцепления припоев от температуры (а), времени воздействия ультразвука (б)

Анализируя влияние технологических режимов процесса ультразвуковой металлизации на прочность спаев, можно отметить, что высокие значения прочности сцепления металлических покрытий на неметаллических материалах (керамике, стеклокерамике) обеспечиваются в широких температурных и временных интервалах и не критичны к степени шероховатости и химической чистоте поверхности паяемого материала. Это свидетельствует о достаточной устойчивости физико-химических процессов, протекающих при формировании спаев в ультразвуковом поле.

ГЛАВА 8

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ ПАЙКИ

8.1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СМАЧИВАНИЯ РАСПЛАВАМИ ПРИПОЕВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА

Угол смачивания — наиболее показательная и основная характеристика процессов формирования паяного соединения. Измерение угла смачивания позволяет количественно характеризовать процесс смачивания. Углы смачивания расплавами припоев измеряют обычно методом «лежащей» капли. Кинетика растекания припоя определяется по изменению контактного угла смачивания и линейного размера капли, регистрируемого с помощью киносъёмки [195].

Кинетика смачивания и растекания припоя исследовалась на установке, изображенной на рис. 8.1. Образец **3** (40x40 мм) изготавливают из листа паяемого металла толщиной 2 – 4 мм, фрезеруют по краям и правят. В центре образца сверлят глухое отверстие для размещения спая термопары. Слой окислов удаляют мелкозернистой наждачной бумагой и последующим травлением с учетом требуемой шероховатости поверхности исследуемого образца. Контроль шероховатости осуществляют с помощью профилографа-профилометра. Поверхность образца и припоя обезжиривают спиртом, бензином типа «Калоша», ацетоном или другими органическими растворителями. На подготовленную поверхность в точке пересечения диагоналей прямоугольного образца наносят несколько капель флюса и в него помещают навеску припоя **2** диаметром 8 мм и толщиной 0,3 мм. Для нагрева образца применяют трубчатую печь сопротивления **4** с нагревателем из нихромовой проволоки диаметром 1—6 мм, намотанной на кварцевую трубу диаметром до 100 мм и длиной до 300 мм. Труба с нагревателем закрыта снаружи изоляционным материалом и помещена в металлический кожух, в котором вмонтированы кварцевые оптические стекла **5** диаметром до 40 мм для удобства киносъёмки. Две осветительные лампы **1** мощностью 250—500 Вт обеспечивают равномерное освещение капли припоя. Подготовленный образец помещают в печь и располагают горизонтально на подложке так, чтобы спай термопары вошел в глухое отверстие. При контакте образца и термопары включают одновременно секундомер и диаграммную ленту потенциометра. Перед расплавлением

припой включают кинокамеры б и по секундомеру фиксируют начало съемки. Съемку ведут со скоростью 12—24 кадр/с в течение 14—18 с. После фотообработки киноплёнку проектируют на экран и по контуру растекающейся капли замеряют контактный угол, диаметр или высоту капли. При этом точность определения краевого угла смачивания составляет $\pm 1^\circ$.

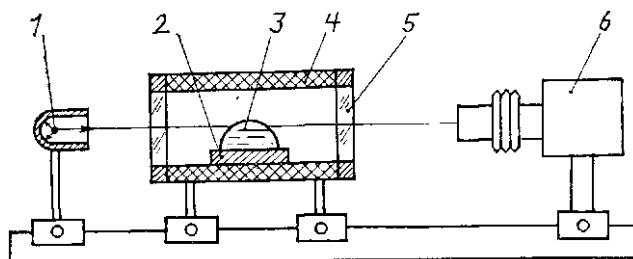


Рис. 8.1. Схема установки для исследования кинетики смачивания и растекания припоя

Изучение процесса смачивания оловянно-цинковыми припоями титановых сплавов показало, что при обычных условиях угол смачивания составляет около 90° при нагреве до 1473 К. Возбуждение ультразвуковых колебаний в припое практически мгновенно обеспечивает полное смачивание и растекание капли припоя по поверхности титанового сплава ВТ5-1. С целью изучения кинетики смачивания проведена скоростная киносъемка с помощью камеры СКМ-1М со скоростью до 4000 кадр/с. Анализ кинопрограмм показал, что продолжительность процесса смачивания при воздействии ультразвуковых колебаний составляет менее 0,02 с [32].

Исследование смачивающей способности жидкостей и расплавов припоев поверхности стали при активации ультразвуковыми колебаниями амплитудой 3 – 9 мкм показало, что изменение краевого угла смачивания для жидкостей составляет около 30%, для расплава припоя ПОС61 – до 80% [19].

Если при смачивании металлических поверхностей припоем введение флюса позволяет уменьшить разность поверхностных натяжений ($\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}$) и обеспечить смачивание поверхности металла за счет удаления с нее окисных пленок, то при пайке неметаллических материалов на минеральной основе вся масса представляет собой сочетание окислов различных элементов, поэтому применение флюсов в данном случае неэффективно. Введение ультразвуковых колебаний в расплавленный припой вызывает изменения в значениях коэффициентов поверхностного натяжения и улучшает растекание припоя по поверхности таких материалов. Можно предположить, что при введении продольных колебаний коэффициент $\sigma_{1,2}$ будет претерпевать малые изменения, которые с известной степенью допущения можно не учитывать. Наибольшие изменения, очевидно, произойдут в величинах коэффициентов ($\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}$) характеризующих растекание припоя по поверхности (рис. 8.2).

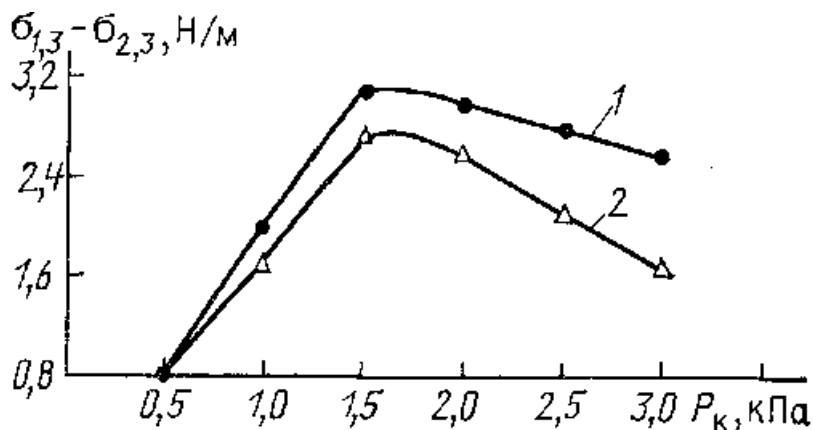


Рис. 8.2. Зависимость изменения поверхностного натяжения на границе припой — стеклокерамика от величины кавитационного давления в припоях: **1** – Pb – Sn – Zn – In; **2** — П200А

Смачивание поверхности неметаллических материалов предполагает удаление мономолекулярных газовых пленок, находящихся на поверхности и обладающих в соответствии с теорией граничного слоя всеми свойствами твердого тела. Ультразвуковые колебания интенсивностью, превышающей порог кавитации в припое, вызывают образование кавитационных микрополостей на полупериоде растяжения. На полупериоде сжатия микрополости захлопываются, осуществляя разрушение газовых пленок и непосредственный контакт жидкого припоя с поверхностью материала.

Таким образом, смачивание стеклокерамических материалов в процессах ультразвуковой металлизации и пайки достигается за счет удаления газовых пленок, интенсификации процессов взаимодействия на границе припой – паяемая неметаллическая поверхность и снижения угла смачивания. Углы смачивания припоями П200А и Pb – Sn – Zn – In измерялись на установке контроля углов смачивания УКУС-1.

Анализ данных, представленных в табл. 8.1, показывает, что при кавитационных давлениях в припоях свыше 2,0 кПа углы смачивания минимальны и составляют 25—35°, в то время как в отсутствие активации ультразвуковыми колебаниями – 160°.

Таблица 8.1. – Углы смачивания припоями стеклокерамики в зависимости от кавитационного давления

Тип припоя	Кавитационное давление в припое, кПа, при углах смачивания, град						
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Pb—Sn—Zn—In Sn—	160	120—130	65—70	35—45 65—	25—30	20—25	25
Zn (П200А)	160	140—150	120—130	70 100—120	55—60	40—45	35
Sn—Pb (П0С61)	160	150—160	130—140		75—80	65—70	40

На наличие химического взаимодействия при смачивании стеклокерамики припоями при активации ультразвуковыми колебаниями указывает зависимость степени смачивания от температуры процесса металлизации.

Процесс химического взаимодействия под действием ультразвука инициируется активной турбулизацией припоя, отмечаемой даже визуально, и образованием акустических потоков в припое (рис. 8.3). На полупериоде растяжения частицы припоя, увлекаемые перемещением рабочего торца излучателя в сторону смачиваемой поверхности, образуют круговые потоки, имеющие направления, соответствующие вектору смещений ультразвукового излучателя. На полупериоде сжатия направление потоков изменяется и припой мгновенно заполняет образовавшиеся вакуумные полости. Активная турбулизация припоя и микропотоки, возникающие под действием ультразвука, обеспечивают контакт все новых микрообъемов жидкого припоя с подложкой и инициируют протекание реакций химического взаимодействия компонентов припоя с компонентами паяемого материала. Введение в припой колебаний, направленных тангенциально к поверхности, в дополнение к интенсивному процессу перемешивания микрообъемов припоя обуславливает внутреннее трение слоев припоя, а также натирание жидким припоем поверхности паяемого материала, что улучшает процесс образования непосредственного контакта припоя с материалом.

В работах по контактным явлениям в металлических расплавах [78, 79] установлен ряд важных закономерностей процесса смачивания неметаллических материалов металлическими расплавами. Так, отмечено, что смачиваемость окислов металлическими расплавами и адгезия в системе припой — паяемый материал возрастает с повышением сродства жидкого металла к кислороду. Химически активные к кислороду, металлы Ti, Zr, Al, Mn в чистом виде или в составе сплавов образуют малые краевые углы смачивания на поверхности Al_2O_3 , BeO, MgO, SiO_2 и других окислов. Выявлена корреляция между величиной электропроводности окисла и его термодинамической стабильностью. При этом показано, что окислы с большей электропроводностью, являясь соединениями с меньшей свободной энергией образования, лучше смачиваются металлическими расплавами. Отмечено, что кислород является весьма эффективной поверхностно- и межфазно-активной добавкой; малые его примеси понижают краевой угол смачивания металлическим расплавом окисной поверхности и резко увеличивают адгезионное сцепление металла и окисных материалов.

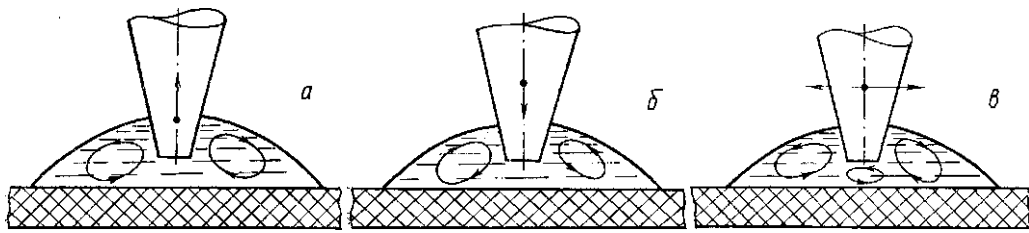


Рис. 8.3. Образование акустических макропотоков в припое: в момент растяжения (а), в момент сжатия (б), при тангенциальной форме колебаний (в)

Исследования смачивающей способности припоев с фазами Ti – Ni, Ti – Cu, Ti – Ag, включающими активный металл (титан) [42], показали, что хорошее смачивание достигается только при высоких температурах (свыше 1273 К), которые соответствуют области высокотемпературной пайки. Соединение металлов с неметаллическими материалами может быть также достигнуто за счет применения стеклоприпоев – специальных стекол, которые в расплавленном состоянии смачивают поверхность металла. Смачивание отвечает наибольшей убыли свободной энергии ΔW в системе:

$$-(\text{---}) = (\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}) - \sigma_{1,2}$$

Убыль свободной энергии тем больше, чем меньше коэффициенты поверхностного натяжения $\sigma_{1,2}$ и $\sigma_{2,3}$. Образующийся в процессе взаимодействия стекла с металлом переходный слой имеет значительные размеры и поэтому легко обнаруживается микроструктурным анализом. Таким образом, стекло-фаза керамических материалов может играть активную роль в установлении прочных связей между керамикой и металлом.

Смачивание в ультразвуковом поле происходит как за счет резкого увеличения чисто адгезионного взаимодействия расплавленных металлов с окислами, так и за счет протекания химических реакций взаимодействия между компонентами припоя и стекло-керамикой.

8.2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СПАЕВ В МЕТАЛЛАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Формирование спаев с металлами в ультразвуковом поле наряду с процессами смачивания и растекания припоя по паяемой поверхности включает процессы механического взаимодействия жидкой фазы с поверхностью и их физико-химического взаимодействия в зоне контакта.

При введении ультразвуковых колебаний в расплавы припоев интенсивностью, превышающей порог кавитации, в расплаве при захлопывании кавитационных полостей образуются сферические ударные волны. Захлопывание кавитационных полостей сопровождается значительным локальным повышением температуры до 1000 К и выше и давлениями до сотен и тысяч атмосфер, что служит причиной разрушения любой степени прочности окисных пленок на поверхности паяемого металла.

Интенсивность ультразвуковых колебаний, при которой происходит кавитационно-абразивное разрушение поверхности, пропорциональна плотности припоев и развитию микрорельефа поверхности подложки длиной l [28]:

$$I \approx \frac{1}{144} \sigma^2 \frac{cr^6}{\omega F^4 l^2 \eta \left(1 + \frac{2LF}{g} \right)^2}$$

При длине выступа микронеровности порядка нескольких микрометров $LF \gg l$ выражение (8.2) приобретает вид

$$I \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 c}{\omega^2 \rho} \left(\frac{r}{l^2} \right)^2$$

Важнейшим процессом, способствующим физико-химическому взаимодействию реагирующих компонентов и образованию прочного спая, является диффузия. Интенсификация процессов диффузии при воздействии энергии ультразвуковых колебаний показана экспериментально и теоретически. Воздействие упругих колебаний ультразвуковой частоты изменяет толщину диффузионного слоя, что соответственно изменяет градиент концентрации на поверхности раздела фаз. Интенсивность диффузии зависит от произведения частоты на амплитуду колебаний, возбуждаемых в жидкой фазе, и приводит к нарушению диффузного граничного слоя, возникающего при гетерогенных процессах.

Воздействие упругих колебаний ультразвуковой частоты способствует ускорению протекания диффузионных процессов в твердом состоянии, что можно объяснить уменьшением энергии, необходимой для активации атомов жидкой среды, проникновением их в паяемый металл по вакансиям, дислокациям, границам кристаллов и т. д. Ускорение диффузионных процессов сопровождается развитием окислительно-восстановительных реакций, протекающих на границе взаимодействия припоя с паяемым металлом. Это подтверждается образованием новых химических соединений — продуктов реакций взаимодействия.

В работе [32] выполнены термодинамические расчеты вероятных реакций взаимодействия компонентов оловянно-цинкового припоя (Sn – Zn) с титановыми сплавами. Расчеты проводились по уравнению изобарного потенциала химической реакции без учета изменения энтальпии в пределах исследуемого температурного интервала

$$\Delta Z = \Delta H^{\circ}_{293} - \Delta S_{293} T$$

где ΔZ – изобарный потенциал; ΔH°_{293} – энтальпия; ΔS_{293} – энтропия вещества в стандартном состоянии; T – абсолютная температура.

Таблица 8.2. - Термодинамические характеристики некоторых химических соединений

Соединения, полученные в результате реакции	H_{293} , ккал/моль	ΔS_{293} , кал/(моль *град)	$-\Delta Z_{493}$, ккал/моль
TiO	123,9	8,33	
TiO ₂	225,5	12,01	—
ZnO	83,2	10,40	—
SnO	68,4	13,50	—
SnO ₂	138,7	11,60	—
2ZnOTiO ₂	391,6	32,80	—
TiO + ZnO → TiO ₂ + Zn	18,4	3,22	19,99
Ti + ZnO → TiO + Zn	40,7	0,53	40,96
Ti + 2ZnO - TiO ₂ + 2Zn	59,1	3,71	60,93
Ti + SnO → TiO + Sn	55,5	-0,81	55,41
Ti + 2SnO → TiO ₂ + 2Sn	33,2	2,46	34,41
Ti + SnO ₂ - TiO ₂ 4- Sn	86,8	5,35	89,45
TiO ₂ + 2Zn + O ₂ → Zn ₂ TiO ₄	166,1	-48,16	142,44
Ti + 2ZnO ₄ + O ₂ → Zn ₂ TiO ₄	225,2	-44,35	203,4
TiO ₂ + 2ZnO → Zn ₂ TiO ₄	-0,3	0,01	0,31
Ti + Zn + 2O ₂ → 2ZnOTiO ₂	391,6'	92,44	346,10

Энтальпия TiO_2 по абсолютному значению намного больше энтальпии окислов цинка ZnO и олова SnO_2 и SnO . Наличие менее устойчивых окислов металла создает реальные предпосылки для окислительно-восстановительных реакций, что подтверждается значениями изобарного потенциала. Термодинамические расчеты показывают, что наиболее вероятно протекание химической реакции образования двойного окисла $2ZnO \cdot TiO_2$ по возможным реакциям (см. табл. 8.2). Таким образом, влияние энергии ультразвуковых колебаний на процесс пайки заключается не только в интенсификации процесса смачивания паяемого металла, разрушении поверхностных окисных пленок и сближении реагирующих компонентов, но и в интенсификации процессов физико-химического взаимодействия с образованием новых химических соединений в переходной области. Физическая модель формирования спая с-металлами в ультразвуковом поле включает ряд процессов.

1. Возбуждение упругих ультразвуковых колебаний в расплаве припоя приводит к уменьшению поверхностного натяжения на границе жидкий припой — паяемый металл, снижению угла смачивания и растеканию припоя по паяемой поверхности металла.

2. Возникновение интенсивной кавитации в расплаве припоя вызывает кавитационно-абразивное разрушение окисных пленок на поверхности металла и установление физического контакта между металлом и жидким припоем.

3. В ультразвуковом поле ускоряются процессы диффузии реагирующих компонентов. Это происходит за счет локальных значительных повышений температуры и давлений, возникающих при захлопывании кавитационных пузырьков. В результате инициируются реакции физико-химического взаимодействия жидкого припоя с паяемым металлом.

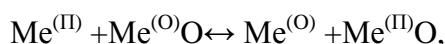
4. Под действием ультразвука и обусловленных им эффектов (кавитация, кумулятивные течения, радиационное давление, ультразвуковой капиллярный эффект) абсорбционно-активные компоненты припоя проникают в поверхностные слои твердой фазы, происходит дисперсионное растворение этих слоев.

5. Развиваются и протекают окислительно-восстановительные реакции на границе раздела. Между ионами компонентов припоя и поверхностными атомами металла происходит обмен кислородом, приводящий к образованию стехиометрической связи между ними.

6. На границе раздела сред образуется переходная зона, состоящая из компонентов припоя паяемого металла и вновь образовавшихся химических соединений, которая обладает повышенной микротвердостью и способствует формированию прочных паяных соединений.

8.3. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СПАЕВ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

В процессе ультразвуковой металлизации происходит химическое взаимодействие компонентов жидкого припоя с керамическими и стеклокерамическими материалами [44, 45, 48]. Вероятным путем протекания такого взаимодействия может быть реакция типа [159]



где $Me^{(II)}$ и $Me^{(O)}$ — металл припоя и окисла. Взаимодействие металла припоя с окислом может происходить только тогда, когда это энергетически выгодно, т. е. если будет иметь место термодинамическая разрешенность, описываемая уравнением Гиббса — Гельмгольца:

$$\Delta Z = \Delta H_{298}^{\circ} - T\Delta S_{298} \quad (8.3)$$

Термодинамический расчет по уравнению (8.3) позволяет получить только приближенные данные, так как в этом уравнении не учитывается температурная зависимость энтальпии и энтропии взаимодействующих веществ и продуктов реакции. Согласно уравнению Кирхгофа [196]:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298}^{\circ} - \quad (8.4)$$

$$\Delta Z = \Delta H_{298}^{\circ} - T\Delta S_{298} \quad (8.5)$$

$$\Delta C_p = C_{\text{конечн. прод}} - C_{\text{исх. вещ}}$$

С учетом выражений (8.4) и (8.5) уравнение (8.3) для изобарного потенциала химической реакции будет иметь вид

$$\Delta Z_T = \Delta H_{298}^{\circ} - T\Delta S_{298}^{\circ} + \int_{298}^T \Delta C_p dT - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (8.6)$$

Определив значение изобарного потенциала химической реакции, можно рассчитать константу равновесия при данной температуре:

$$\lg K = -\Delta Z_T / 4,573T \quad (8.7)$$

Анализ состава окислов аморфной фазы стеклокерамики показывает, что наименьшей устойчивостью отличаются окислы PbO и BaO. Термодинамические расчеты по уравнениям (8.6) и (8.7) (табл. 8.3), проведенные с использованием справочных данных [197, 198], выявили возможность образования силикатов свинца и бария при температурах варки стеклоэмали (1073—1093 К). Таким образом, аморфная фаза стеклокерамики представляет собой не только совокупность простых окислов типа PbO, BaO, SiO₂ и им подобных, но и фазу с содержанием продуктов взаимодействия простых окислов.

Наибольшим сродством к кислороду среди компонентов, входящих в состав припоев П200А и системы Pb – Sn – Zn – In, отличается цинк. В процессе приготовления припоев образуются окислы цинка (ZnO и ZnO₂), причем с точки зрения термодинамики реакция образования окисла ZnO более вероятна. На рентгенограммах припоя системы Pb – Sn – Zn – In рефлексы, соответствующие окислу ZnO, также имеют большую интенсивность, чем рефлексы, соответствующие окислу ZnO₂.

При спекании стекломассы возможно образование силикатов свинца и бария различного состава, однако, исходя из термодинамической последовательности устойчивости соединений, в системе PbO—SiO₂ в большей степени вероятно образование соединений, соответствующих стехиометрическому составу (PbSiO₃, Pb₂SiO₄, BaSiO₃, Ba₂SiO₄). Из диаграммы состояния силикатной системы BaO – PbO – SiO₂ [198] следует, что при данных температурах возможно образование твердого раствора BaSiO₃ и PbSiO₃ с окислом 3PbO*BaO*2SiO₂. Однако присутствия тройных окислов в стекломассе рентгеноструктурным анализом не обнаружено.

Таким образом, анализ состава исходных материалов позволяет сделать предположение, что в процессе ультразвуковой металлизации возможно химическое взаимодействие между двойными окислами аморфной фазы стеклокерамики PbO*SiO₂, 2PbO*SiO₂, BaO*SiO₂, 2BaO-SiO₂, с одной стороны, и цинком или его окислами ZnO и ZnO₂ – с другой.

Рентгеноструктурный анализ показал, что в процессе ультразвуковой металлизации возникают сложные окисные соединения типа Pb₂ZnSi₂O₇ и BaZnSiO₄. Термодинамический расчет возможных путей образования сложных соединений затруднен ввиду отсутствия справочных данных по энтальпии и энтропии соединений. Для приближенных вычислений термодинамических констант сложных соединений используют свойства аддитивности энтропии системы, когда энтропия системы равна сумме энтропии составных частей.

Таблица 8.3. – Изобарный потенциал бария и константа равновесия реакций образования силикатов свинца и бария

<i>№ реак- ции</i>	Реакция образования силиката	ΔZ , кДж/моль	$\lg K$	K
1	$PbO + SiO_2 = Pb_2SiO_3$	24,8	5,58	0,75
2	$2PbO + SiO_2 = Pb_2SiO_4$	33,9	7,6	0,88
3	$4PbO + SiO_2 = Pb_4SiO_6$	55,4	12,4	1,08
4	$BaO + SiO_2 = BaSiO_3$	133,0	29,86	1,47
5	$BaO + SiO_2 = BaSi_2O_6$	182,6	41,0	2,61
6	$2BaO + SiO_2 = Ba_2SiO_4$	243,4	54,68	2,74
7	$3BaO + SiO_2 = Ba_3SiO_5$	386,4	86,52	2,93

Для определения энтальпии образования соединений применяют метод сравнительного расчета тепловых эффектов, предложенный М. Х. Карапетьянцем [200] и основанный на химическом подобии веществ:

$$\Delta H_{II} = A_I \Delta H_I + B_I, \quad (8.8)$$

где ΔH_{II} , ΔH_I – энтальпии подобных веществ; A_I и B_I – константы.

Таблица 8.4. - Изобарный потенциал и константа равновесия реакций образования силикатов свинца и бария

<i>№ реакции</i>	Реакция образования окисла	Уравнение изобарного потенциала реакции ΔZ_T
1	$Zn + O_2 = ZnO_2$	$349,6 - 0,3 T$
2	$2Zn + O_2 = 2ZnO$	$699,2 - 0,2 T$
3	$4In + 3O_2 = 2In_2O_3$	$1858,6 - 0,6 T$
4	$PbSiO_3 + ZnO = PbZnSiO_4$	$29,78 - 0,005 T$
5	$Pb_2SiO_4 + ZnO = PbZnSi_2O_6$	$29,86 - 0,04 T$
6	$Pb_2SiO_4 + ZnO + SiO_2 = Pb_2ZnSi_2O_7$	$64,43 - 0,03 T$
7	$BaSiO_3 + ZnO = BaZnSiO_4$	$137,84 - 0,005 T$
8	$BaSi_2O_5 + 2ZnO = BaZn_2Si_2O_7$	$194,54 - 0,009 T$
9	$Ba_2SiO_4 + ZnO + SiO_2 = Ba_2ZnSi_2O_7$	$314,7 - 0,006 T$

Уравнение (8.8) не учитывает различий в свойствах соединений и исходных веществ, поэтому может быть применено к силикатам с известным приближением.

Термодинамические расчеты образования сложных окисных соединений, проведенные с помощью справочных данных, рассчитанных по уравнению (8.8), приведены в

табл. 8.4. Из данных, приведенных в таблице, следует, что наиболее вероятно образование соединений $Pb_2ZnSi_2O_7$ и $Ba_2ZnSi_2O_7$, изобарный потенциал химических реакций образования которых больше по сравнению с другими окислами. Однако в диапазоне исследуемых температур не исключается образование и других соединений. Реакции образования сложных окисных соединений $Pb_2ZnSi_2O_7$ и $Ba_2ZnSi_2O_7$ более активно будут протекать только при температурах, близких или превышающих температуру плавления стеклофазы, т. е. выше 973 К, на что указывают результаты структурных исследований спая со стеклокерамикой, где отмечаются изменения в структуре стеклофазы, прилегающей к зоне металлизации.

В работах [13, 15] указывается на возможность образования локальных тепловых микрополей. Так, при прохождении ультразвуковой волны интенсивностью свыше 10^4 Вт/м² через жидкость в пульсирующих кавитационных пузырьках, испытывающих адиабатическое сжатие, в момент резонанса температура может достигать 1000 К. Высокие температуры, возникающие в пульсирующих пузырьках, обуславливают протекание химических процессов взаимодействия в ультразвуковом поле. В процессе ультразвуковой металлизации стеклокерамики отмечено также образование окисла $1p_2O_3$, что говорит об окислительном характере протекания химических реакций взаимодействия.

Анализ экспериментальных данных, результатов рентгеноструктурного, электронно-микроскопического анализа и термодинамических расчетов возможных путей протекания химических реакций позволяет представить механизм формирования спаев жидких металлических припоев со стеклокерамическими материалами в следующем виде:

1) в процессе ультразвуковой активации расплавленного припоя за счет разрушения газовых пленок на поверхности стеклокерамических материалов и резкого увеличения адгезионного взаимодействия припоя со стеклокерамикой происходит смачивание поверхности припоем с образованием непрерывной межфазной границы между припоем и стеклокерамикой;

2) вследствие развития интенсивных кавитационных процессов в припое, когда величина кавитационного давления в припое превышает 1,5 кПа, при сжатии пульсирующих кавитационных пузырьков, а также при их захлопывании в локальных областях припоя температура возрастает до значений, превышающих среднюю температуру расплава в несколько раз, что приводит к ускорению химических реакций в процессе пайки;

3) поскольку в связи с высокой частотой (20—44. кГц) пульсаций кавитационных полостей термодинамические условия их образования и захлопывания следует рассматривать как адиабатические, возникновение таких локальных микро-областей с высокими температурами, превышающими 1000 К, на межфазной границе припой — стеклокерамика создает предпосылки для образования сложных окисных соединений между компонентами аморфной фазы стеклокерамики и припоем;

4) присутствие активного механического фактора – чередующихся полупериодов сжатия и растяжения, которые через припой передаются стеклокерамике и вызывают активную турбулизацию припоя и акустические потоки в припое, инициирует протекание реакций химического взаимодействия между компонентами аморфной фазы стеклокерамики, имеющими наименьшую термодинамическую устойчивость, и компонентами припоя, имеющими наибольшее сродство к кислороду, приводящих к образованию окисных соединений на межфазной границе припоя со стеклокерамикой;

5) образование интерметаллидных соединений увеличивает прочность сцепления припоя со стеклокерамикой на один-два порядка по сравнению с чисто адгезионным соединением, чем и достигается получение надежных паяных соединений, не уступающих и даже превосходящих по прочности соединяемые материалы.

Таким образом, процесс образования спаев со стеклокерамикой носит термохимический характер и протекает в присутствии активного механического фактора – ультразвуковых колебаний, воздействие которых на припой позволяет резко интенсифицировать процессы смачивания неметаллических материалов, а за счет термических эффектов спо-

способствовать протеканию процессов химического взаимодействия между компонентами припоя и стеклофазой неметаллических материалов.

ГЛАВА 9 ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И ПРИБОРОВ

9.1. МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАВИТАЦИИ НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО

При распространении в расплаве припоя ультразвуковых колебаний достаточной интенсивности в нем возникают такие эффекты, как кавитация, макро- и микропотоки, кумулятивные течения. Наиболее сильным энергетическим фактором, воздействующим на твердое тело, находящееся в озвучиваемой жидкости, является кавитация и обусловленные ею динамические ударные и тепловые микроимпульсы.

Особенности кинетического состояния расплава в ультразвуковом поле обусловлены макро- и микропотоками, а также кумулятивными течениями, обеспечивающими интенсивное перемешивание и движение всей массы жидкого припоя. При ультразвуковой пайке и металлизации наибольший интерес представляют явления, происходящие на границе раздела твердое тело — расплав припоя, так как, во-первых, эта граница соответствует зоне непосредственного технологического воздействия, во-вторых, в какой бы форме энергии не проявлялось воздействие ультразвука на твердое тело, она непременно должна быть передана через граничную поверхность расплава припоя — твердое тело. Существенное влияние на кавитационные полости оказывает твердое тело, находящееся в кавитирующей среде. Согласно исследованиям [201, 202], кавитационные полости имеют направленное движение от излучателя к твердому телу.

Проведенные экспериментальные исследования при помощи скоростной киносъемки показали, что при $l/R_{max} < 4$ (где l — расстояние между кавитационными полостями; R_{max} — максимальный радиус полости) соседние кавитационные полости сливаются в момент первого полупериода сжатия или в дальнейшем, [203]. Приняв допущение, что поверхность твердого тела эквивалентна существованию второго кавитационного пузырька, движущегося синфазно, можно ожидать взаимодействия поверхности и кавитационного пузырька, аналогичного взаимодействию двух смежных кавитационных пузырьков. Тогда движущиеся по направлению от излучателя к твердому телу кавитационные полости по мере приближения к нему будут ускорять свое движение и в итоге пульсировать или захлопываться у его поверхности. Следовательно, такие кавитационные полости будут оказывать непосредственное физическое воздействие не только на поверхность, но и на само твердое тело.

В работе [158] теоретически исследовано воздействие кавитирующих полостей на твердое тело в виде пластины, при этом приняты допущения, что полость имеет вид круглого парогазового пузырька, пересекающегося поверхностью пластины, и что при всех изменениях размера пузырька телесный угол пересечения остается неизменным. Параметры движения полости были определены из системы дифференциальных уравнений решением их на ЭВМ. ЕС 1020 методом Рунге — Кутты с точностью, равной одной десятой текущего радиуса полости. При расчетах были также использованы уравнения для определения максимального и минимального радиусов кавитационной полости [11]. Давление кавитационной полости, приложенное к пульсирующему по размеру пятну контакта ее с пластиной, вызывает силу, действующую на пластину в этой точке. При допущении, что диаметры кавитационных полостей находятся в определенных пределах, а сами полости

распределены равномерно по площади пластины, была исследована зависимость давления кавитации от акустического давления, возбуждаемого излучателем. Определялось экранирующее действие пластины для волны излучения и затем действующее на пластину интегральное давление кавитации с учетом того, что давления кавитационных полостей, захлопывающихся с разных сторон пластины, действуют в противоположных направлениях, а значит, вычитаются.

Пусть полость, пульсирующая на поверхности пластины, имеет диаметр $3 \cdot 10^{-6}$ м. Если телесный угол пересечения кавитационной полости с поверхностью пластины составляет 180° , то для изотермического движения кавитационной полости сила, оказывающая давление на пластину, будет обратно пропорциональна радиусу этой полости. Тогда сила, действующая на пластину при изотермическом сжатии, может быть вычислена по формуле

$$F = \Pi (P_{\text{атм}} - P_{\text{п}} + 2\sigma/R_0)(R_0/R_T)^3 + \Pi R_m^3 P_{\text{п}}/R_T, \quad (9.1)$$

при адиабатическом сжатии формула (9.1) имеет вид

$$F = \Pi R_m^2 [(P_{\text{атм}} - P_{\text{п}} + 2\sigma/R_0)(R_0/R_T)^3 + P_{\text{п}}](R_M/R_T)^4$$

где R_m , R_T —максимальный и текущий радиусы полостей.

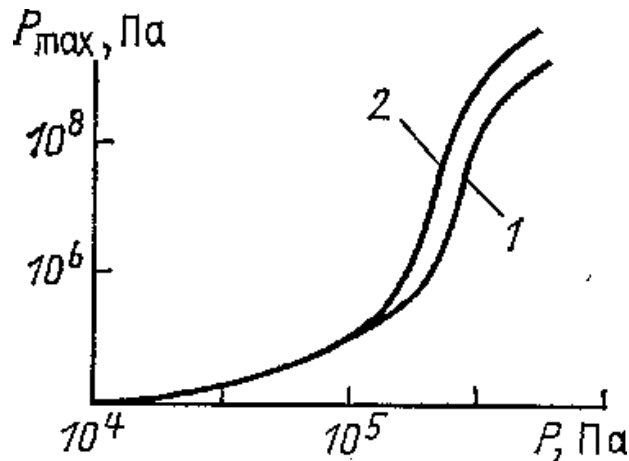
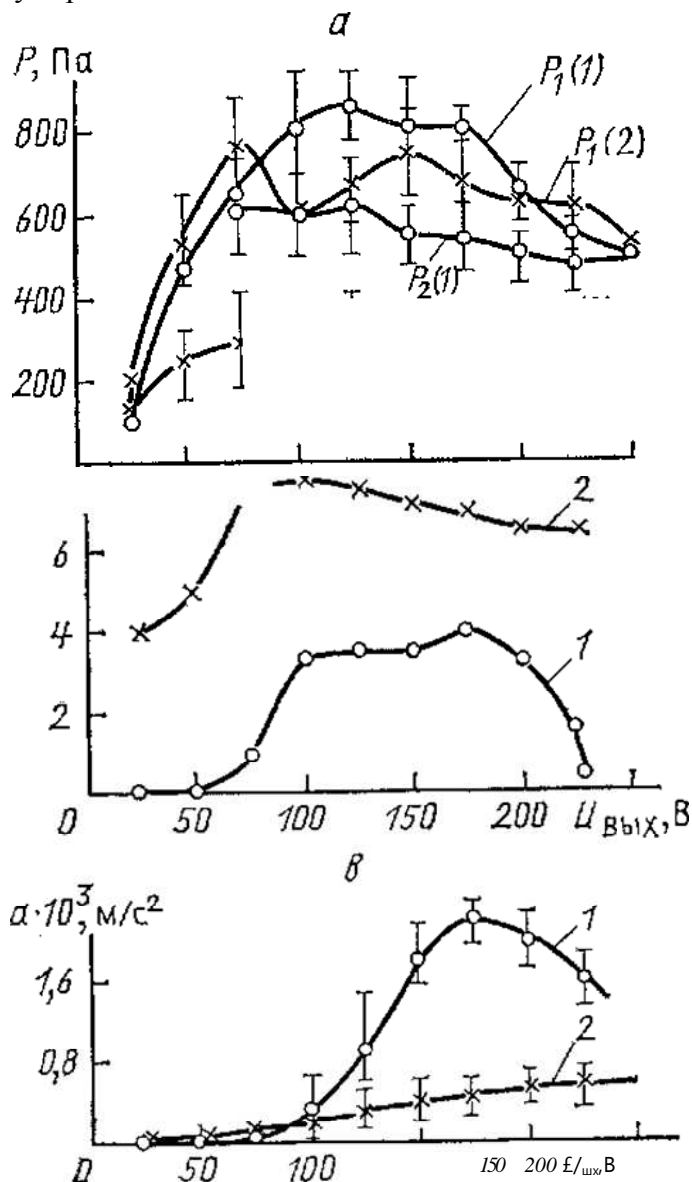


Рис. 9.1. Зависимость максимального давления в кавитирующей полости от давления, инициирующего кавитацию

На рис. 9.1 представлены зависимости максимальных значений давлений и пиковые значения силы действия одной полости на пластину от амплитуды инициирующего кавитацию излученного давления в случае изотермического сжатия кавитационной полости (1) и адиабатического (2). Зависимости получены для полостей, пульсирующих в воде, при следующих условиях: атмосферное давление 10^5 Па, давление паров насыщения 2200 Па, вязкость 10^{-3} Н*с/м², коэффициент поверхностного натяжения 0,071 Н/м, диаметр пульсирующих полостей $3 \cdot 10^{-6}$ м. Зависимость максимального давления от давления излучаемого ультразвука нелинейная для кавитирующих сред независимо от природы жидкостей, однако для разных жидкостей количественные показатели этой зависимости могут изменяться. В результате даже небольшое различие с двух сторон пластины излученного ультразвукового давления приведет к существенному различию пикового кавитационного давления. Поэтому пластина будет двигаться под действием разности кавитационных давлений, воздействующих на нее с двух противоположных сторон.

На рис. 9.2 приведены зависимости давления, инициирующего кавитацию P_I , коэффициента затухания ϕ и ускорений твердого тела в виде пластины ω , погруженной в воду, от выходного напряжения генератора. На графиках показаны также доверительные

интервалы, соответствующие вероятности, равной 0,9. Графики зависимостей давлений P_1 под пластиной толщиной 3 мм из стеклотекстолита СТЭФ и стали 45 и над ней P_2 совпадают друг с другом до напряжения ультразвукового генератора, равного 75 В, что соответствует давлениям $0,6 \cdot 10^3$ Па (рис. 9.2). Следовательно, давления при докавитационных режимах равны с обеих сторон пластины. Далее, при повышении напряжения ультразвукового генератора свыше 75 В давления под пластиной продолжают возрастать до $9,8 \cdot 10^3$ Па, а давления над ней начинают падать. Эти режимы соответствуют кавитационным. Множество кавитирующих полостей образует преграду, на которой происходит затухание излученной преобразователем ультразвуковой энергии. При дальнейшем увеличении напряжения ультразвукового генератора начинает уменьшаться и давление под пластиной. Этот режим соответствует развитой кавитации во всем объеме жидкости.



9.2. Зависимости давления, инициирующего кавитацию, P , коэффициента затухания G и ускорения пластины a в воде от выходного напряжения генератора (ф: 1 — для стеклотекстоловистой пластины; 2 — для: стальной)

Кавитация у поверхности излучателя экранирует весь объем ванны, при этом режиме в области, удаленной от излучателя, увеличение напряжения ультразвукового генератора будет вызывать снижение уровня излученного давления. До тех пор, пока давление излученного ультразвука меньше $0,9 \cdot 10^4$ Па, затухание близко к нулю, затем оно возрастает.

тает. Возрастание затухания излученной ультразвуковой энергии соответствует режиму развитой кавитации близ пластины. Падение затухания до нуля соответствует смещению кавитационного поля в сторону от излучателя, экранированию пластины сместившимся кавитационным полем и снижению давления близ нее ниже кавитационного порога, который в данном случае равен 10^4 Па. Разность давлений излученного ультразвука между нижней и верхней частями жидкости относительно пластины обуславливает существенно большую разность кавитационных давлений и увеличение ускорений пластины, вызванных разностью этих давлений. Ускорения пластины до напряжений 75 В равны нулю, что свидетельствует об отсутствии кавитации. Затем при дальнейшем повышении напряжения ускорения монотонно возрастают и при напряжении 175 В достигают максимума 2200 м/с², этот режим соответствует развитой кавитации в области пластины. При дальнейшем повышении напряжения ультразвукового генератора ускорения ослабевают, что соответствует развитию кавитации во всем объеме жидкости и смещению зоны максимальной кавитационной активности от пластины к излучателю.

Для стальной пластины, находящейся в кавитационной среде в качественном плане, характерны те же явления, что и для стеклотекстолитовой, однако изменяются количественные соотношения. При отсутствии кавитации затухание на пластине отлично от нуля, а давление под пластиной не равно давлению над ней. После возникновения кавитации увеличение давления над пластиной практически прекращается. Ускорения стальной пластины, несмотря на большую разницу давлений по обе ее стороны, меньше, чем у стеклотекстолитовой, что можно объяснить большей массой стальной пластины.

Ускорения пластины в кавитирующей среде подвергались спектральному анализу [158]. Как видно из рис. 9.3, основная черта кавитационных спектров — их многоэкстремальный характер. Экстремумы повторяются на частотах, кратных частоте возбуждающего кавитацию ультразвука (рис. 9.3, *а*), в данном случае кратных 21 кГц. При больших уровнях излученного давления появляются экстремумы и на частотах, кратных половине частоты излученного ультразвука. В высокочастотной области спектра помимо линейчатых составляющих наблюдается непрерывный спектр (рис. 9.3, *б*). Если линейные составляющие характеризуют периодически повторяющиеся кавитационные импульсы, то непрерывный спектр характеризует определенную периодичность этих кавитационных импульсов. Появление линейчатых составляющих на частотах, кратных половине частоты излученного ультразвука при достаточно большом уровне излученного акустического давления, объясняется тем, что часть кавитирующих полостей настолько сильно расширяется, что не успевает захлопнуться в течение одного полупериода сжатия и захлопывается лишь на следующем периоде. Дальнейшее увеличение уровня излученного давления (рис. 9.3, *в*) приводит лишь к количественному возрастанию в первую очередь максимумов на частотах, кратных половине излученной частоты. Затем увеличивается уровень непрерывного спектра, который все больше захватывает область нижних частот. Таким образом, несмотря на: моногармонический характер излученного давления, ускорения имеют широкий спектр с чертами, характерными для кавитации. Эксперименты свидетельствуют о том, что при возрастании излученного ультразвукового давления все большим становится кавитационное облако со стороны излучателя, на котором затухание ультразвуковых колебаний быстро увеличивается. Таким образом, в кавитирующей среде твердому телу сообщаются периодические импульсы ускорения, обусловленные неравномерным распределением кавитирующих полостей на его отдельных участках.

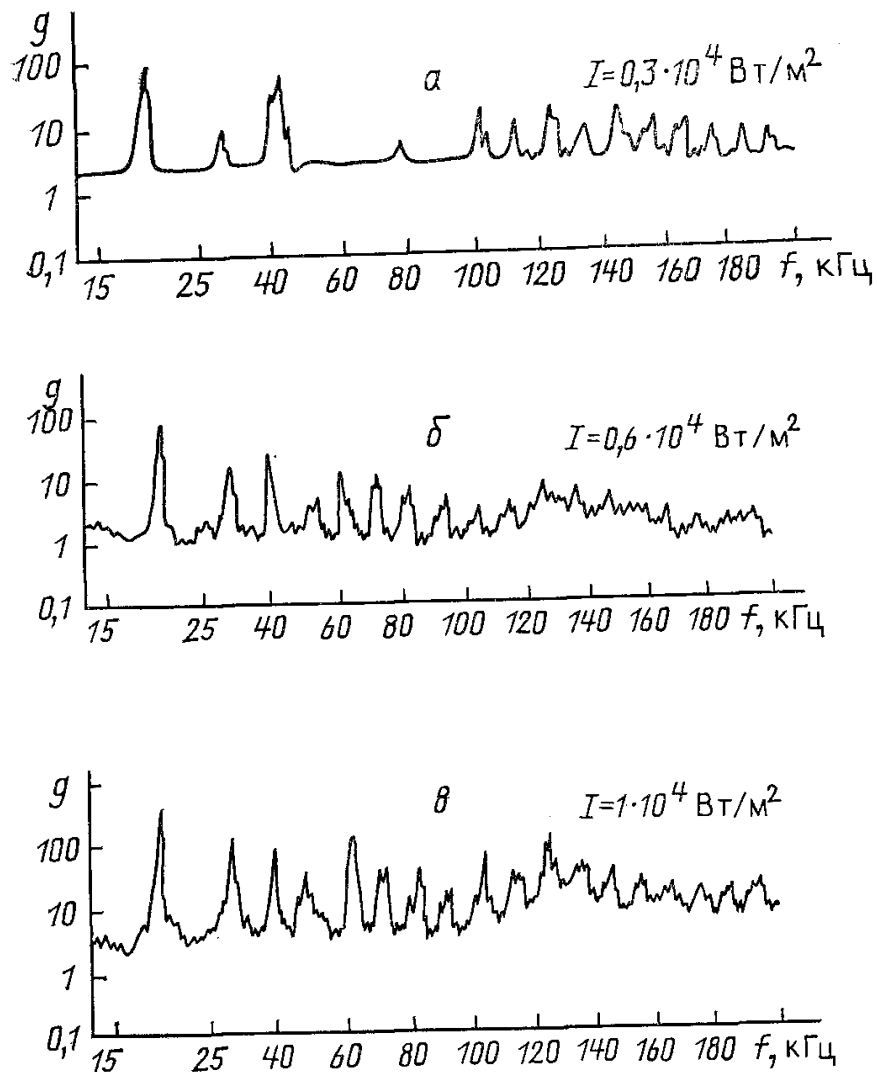


Рис. 9.3. Спектры ускорений печатной платы в кавитирующей среде

На основании изложенного можно сформулировать следующий механизм кавитационного воздействия на твердое тело:

1) кавитационные полости из близлежащих к твердому телу областей устремляются к нему, пульсируют или захлопываются у его поверхности; в момент начала каждого полупериода сжатия полости захлопываются и тело, находящееся в кавитирующей среде, испытывает в этот момент импульсное ускорение, направление которого случайное, так как случаен характер распределения полостей на поверхности твердого тела;

2) при давлениях, соответствующих началу кавитации, небольшое увеличение излученного давления вызывает существенное увеличение пикового давления при захлопывании кавитационной полости;

3) пик давления, возникающий в момент захлопывания полостей, воздействует на тело с силой, направленной в сторону, противоположную излучателю; усредненное по поверхности твердого тела кавитационное давление имеет широкий спектр, распространяющийся в основном от частоты возбуждающего кавитацию ультразвука и выше, однако максимум спектральной плотности кавитационного давления приходится на частоту излучаемого ультразвука;

4) под влиянием кавитационного давления твердое тело будет подвергаться действию импульсных или периодических сил, являющихся причиной возникновения вибраций в твердом теле;

5) возникшие в твердом теле вибрации вызовут появление в нем циклических напряжений, продолжительность действия и абсолютная величина которых оказывают влияние на физико-механические свойства твердого тела и, в частности, на его усталостную прочность; это обстоятельство должно обязательно учитываться при проектировании технологических процессов ультразвуковой пайки и металлизации.

9.2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА И ПРИБОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАВИТАЦИИ

При воздействии высокочастотных циклических нагрузок, возникающих при ультразвуковой пайке, элементы конструкций функциональных элементов РЭА и приборов приходят в колебательное движение. Это воздействие, как правило, является случайным стационарным процессом. Колебательная система многих полупроводниковых приборов и интегральных схем состоит из стержней (электродов и траверз), различающихся по степени жесткости, геометрическим размерам и формам, условиям закрепления их концов или сторон [159, 204].

Используя представление о принципе суперпозиции колебаний различных частот, воздействие колебаний на конструктивные элементы ПП и ИС можно разложить на спектральные составляющие и определить отклик колебательной системы на каждую из них. Для определения отклика на исходное воздействие в целом необходимо сложить отклики на все спектральные компоненты этого воздействия. В связи с изложенным следует отметить, что теория воздействия вибрационно-акустического нагружения на полупроводниковые приборы, интегральные схемы и им подобные изделия может быть построена на основе моделей отклика на моногармонический сигнал. При описании колебательного движения внутренних элементов конструкции указанных изделий обычно используют модели с распределенными параметрами [204, 205].

В инженерной практике резонансный режим — наиболее опасный случай колебательного движения. Поэтому всегда стремятся определить резонансные частоты и исключить их в спектре частот, воздействующих на изделие. Существует ряд способов исключения резонансного режима, например, уменьшением длины стержня и увеличением момента его инерции можно выводить низкую частоту резонанса выше всего спектра колебаний, воздействующих на изделие.

Однако в условиях ультразвуковой кавитации вибрационное воздействие имеет широкий спектр, поэтому исключить возбуждение того или иного конструктивного элемента, например электрода или траверзы, на резонансной частоте практически невозможно. В таком случае необходимо исследовать поведение системы конструктивных элементов в области резонансных частот. В работах [204, 205] показано, что сопряженные электроды могут разрушаться не только при резонировании на их собственных частотах, но и при колебаниях на собственных частотах сопряженных с ними конструктивных элементов. В исследованных конструкциях жестко связанных электродов всегда разрушался податливый стержень на частоте резонанса сопряженного с ним жесткого стержня [206]. Такое разрушение обусловлено тем, что в исследованных конструкциях приборов жесткий стержень имел значительно большую добротность, чем податливый. Поскольку их резонансные свойства учитываются одинаково, более добротный элемент оказывает и большее влияние на исход испытаний. Если различие в добротностях оказывается значительным, то резонансные свойства податливого стержня полностью маскируются действием резонансов жесткого стержня.

Характерным конструктивным звеном многих функциональных элементов РЭА и приборов являются два жестко связанных между собой колеблющихся стержня, сильно отличающиеся по жесткости: податливый электродный вывод и сопряженный с ним достаточно жесткий внешний электрод, или траверза, или часть корпуса прибора (например,

дно интегральной схемы или полупроводникового прибора). В связи с этим многие приборы, включая и изделия электронной техники по критерию вибрационной прочности, можно систематизировать в две группы: 1) изделия с жестким корпусом или основанием, не подвергающимся деформации в процессе воздействия ультразвука; 2) изделия с недостаточно жестким (податливым) корпусом. В приборах с недеформируемыми жесткими корпусами разрушение гибкого электрода может произойти под воздействием колебаний сопряженного с ним жесткого электрода. Возможны два механизма возбуждения изгибных колебаний в жестком электроде (рис. 9.4, а, б). В первом случае жесткий электрод 1 возбуждается за счет угловых колебаний всего корпуса 2, во втором — под действием возвратно-поступательного (колебательного) движения всего корпуса. В обоих случаях возбуждение амплитуд, способных оказать существенное воздействие на гибкий электрод в реальных изделиях, происходит лишь при совпадении частоты возбуждения с резонансной частотой жесткого электрода.

Деформации корпусов приборов могут в разной степени сказываться на перемещении гибкого электрода и на возникающих в нем напряжениях. Как видно из рис. 9.4, в, г, на котором изображены случаи деформации корпуса 2 прибора, приводящие к относительным перемещениям концов гибкого электрода 3, наиболее существенное значение оказывают деформации корпуса.

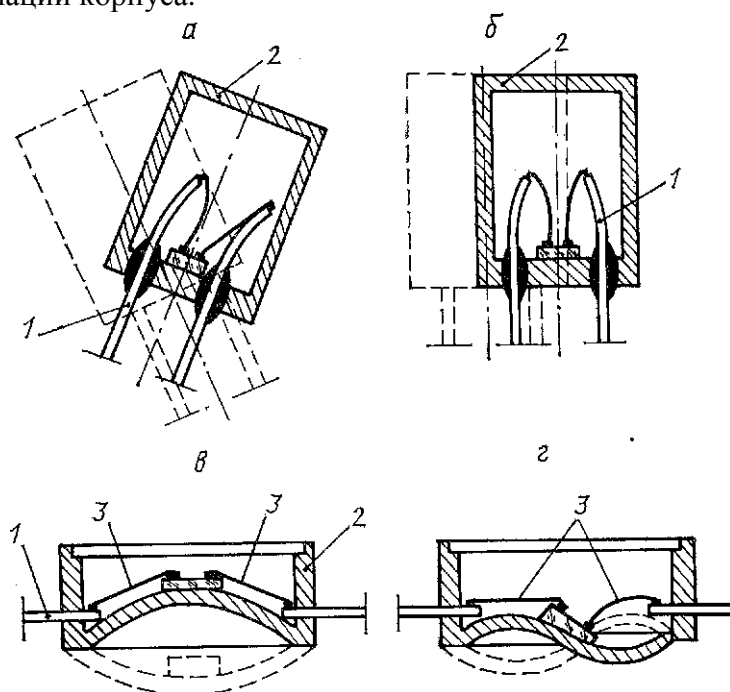


Рис. 9.4. Виды деформаций элементов конструкции изделий электронной техники

Динамику элементов конструкции можно рассматривать на двух примерах: 1) электродный вывод, жестко прикрепленный с двух сторон и кинематически возбуждаемый с одной стороны; 2) система из двух электродных выводов с резко отличающейся жесткостью и закрепленных на одном основании. Возбуждение системы электродных выводов кинематическое за счет колебания основания в направлении, перпендикулярном плоскости, проходящей через оба стержня. Система элементов с сильно отличающейся жесткостью характерна для изделий электронной техники (полупроводниковых приборов и интегральных схем), так как гибкий электродный вывод не может быть выполнен более жестким в связи с тем, что его диаметр должен быть соизмерим с областями контактных площадок на кристалле. Часто он выполняется из драгоценных металлов высокой степени чистоты, что также вынуждает предельно уменьшать диаметр проволоки. В то же время внешние выводы должны быть существенно большего диаметра ввиду необходимости хо-

рошей герметичности и механической прочности соединения с корпусом, прочности монтажа, надежности электрического контакта с внешней электрической цепью.

Второй тип изделий, у которых при воздействии ультразвука возможна деформация корпуса, может быть представлен микросхемами типа 1ЛБ в пластмассовых, а также в металлокерамических корпусах. При этом деформируемая часть корпуса может быть жестко связана с платой и поэтому может деформироваться только вместе с ней, что существенно увеличивает жесткость конструкции.

Установлено, что ультразвук оказывает влияние на электрические параметры полупроводниковых приборов лишь при конструкции контакта в виде прижимной иглы [207]. Исследование влияния механических статических и динамических нагрузок на электрические параметры $p-n$ переходов глубиной в доли микрометра показало [208], что при давлениях, не превышающих $3,6 \cdot 10^9$ Па, происходит полное восстановление электрических параметров перехода после снятия нагрузки, а при давлениях $4,4 \cdot 10^9$ Па наблюдаются остаточные явления. При этом напряжения на глубине 10 мкм будут не более $8 \cdot 10^8$ Па [209]. Таким образом, реальные $p-n$ переходы, располагающиеся на таких глубинах, не будут иметь остаточных явлений при критических напряжениях на поверхности в точке соединения электродного вывода с кристаллом. В то же время при колебаниях электродного вывода не приходится ожидать в точке соединения его с кристаллом напряжений больших, чем критические, в связи с тем что остаточные явления обусловлены появлением и развитием дислокаций и других несовершенств кристаллической решетки, а это, как известно, первые признаки усталостного разрушения. Следовательно, для реальных переходов, лежащих на глубине около 10 мкм, скорее наступит усталостное разрушение элементов конструкции, находящихся в приповерхностном слое, чем появятся остаточные изменения электрических параметров $p-n$ переходов. Поэтому наиболее опасны механические напряжения в электродном выводе в месте соединения его с кристаллом.

Таким образом, многие конструкции современных функциональных элементов (диоды, транзисторы, интегральные схемы) обладают всеми свойствами колебательных систем. Под действием ультразвуковой кавитации в интегральных схемах и полупроводниковых приборах могут возникать резонансные явления, обусловленные совпадением собственных частот колебаний внутренних элементов конструкции с частотой ультразвукового преобразователя или составляющими частот кавитационного спектра. При этом наиболее опасной ситуацией является совпадение собственных частот колебаний элементов конструкции с частотой ультразвукового преобразователя, на которой давление кавитации максимально, особенно если элементы конструкции имеют высокие добротности. Это может привести к повреждению или даже разрушению отдельных конструктивных элементов РЭА и приборов.

9.3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА И ПРИБОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИЙ И КАВИТАЦИИ

Величина высокочастотных циклических напряжений, возникающих в конструктивных элементах РЭА и приборов при воздействии на них ультразвука, а следовательно, их усталостная прочность зависят от резонансных частот колебаний этих конструктивных элементов и от их добротностей. Всю совокупность функциональных компонентов РЭА и приборов по отношению резонансных частот их конструктивных элементов к частотам возмущающих ультразвуковых воздействий и широкополосным спектрам вибрационных нагрузений (например, кавитация или высокочастотные вибрации, возникающие в процессе эксплуатации РЭА и приборов) можно систематизировать на три типа: 1) компоненты, у которых резонансные частоты жестких конструктивных элементов лежат в спектре частот возмущающих колебаний, а гибкие конструктивные элементы имеют резонансные

частоты, меньшие или равные нижней частоте этого спектра; 2) компоненты, у которых резонансные частоты жестких конструктивных элементов больше, чем верхняя частота спектра возмущающих колебаний, а гибкие конструктивные элементы имеют собственные резонансные частоты, меньшие или равные нижней частоте этого спектра; 3) компоненты, у которых резонансные частоты жестких и сопряженных с ними гибких конструктивных элементов выше или ниже всего спектра частот возмущающих механических колебаний, или компоненты, у которых жесткие и гибкие конструктивные элементы задемпфированы различными компаундами так, что их колебательные свойства существенно не проявляются, а поэтому не имеют практического значения.

Из приведенной классификации следует, что первый тип функциональных компонентов РЭА и приборов наиболее критичен к внешним вибрационным воздействиям.

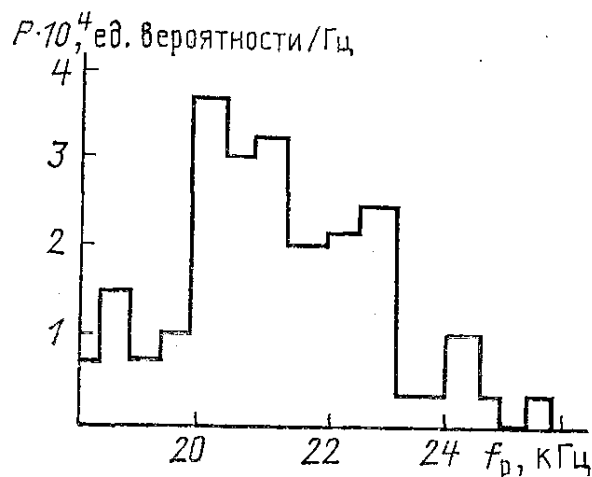


Рис. 9.5. Гистограмма собственных частот жестких электродов транзисторов первого типа

Собственные частоты конструктивных элементов, могут быть самыми различными. Однако для каждого конкретного компонента математическое ожидание собственной частоты, определенное статистически, имеет конкретную величину, около которой группируются собственные частоты отдельных элементов. Из гистограммы распределения частот колебаний жесткого электронного вывода транзистора, относящегося к первому типу (рис. 9.5), видно, что частота собственных колебаний имеет достаточно большой разброс (от 18 до 26 кГц) при математическом ожидании 21 кГц. Это означает, что при воздействии на транзистор моногармонических колебаний амплитуда колебаний резонирующих элементов будет выше, чем у нерезонирующих. Частоты собственных колебаний гибких электродов имеют такой же характер распределения, однако, математическое ожидание частоты собственных колебаний у них, как правило, несколько ниже. Так, для конструкции рассматриваемого высокочастотного транзистора первого типа частота собственных колебаний гибкого электрода имеет математическое ожидание 4,7 кГц.

В работе [210] исследована прочность транзистора при кавитационных давлениях до 450 Па. Частота инициирующего кавитацию ультразвука составляла 20 кГц. Спектр кавитационного воздействия имел ярко выраженный максимум в области 20 кГц. Математическое ожидание резонансной частоты жесткого электрода для испытываемых функциональных компонентов равно 21 кГц. Из рис. 9.6, где приведены результаты экспериментальных исследований маломощных высокочастотных транзисторов, относящихся к первому типу, видно, что интегральные функции их долговечности достигают максимума при 60% разрушений электродов.

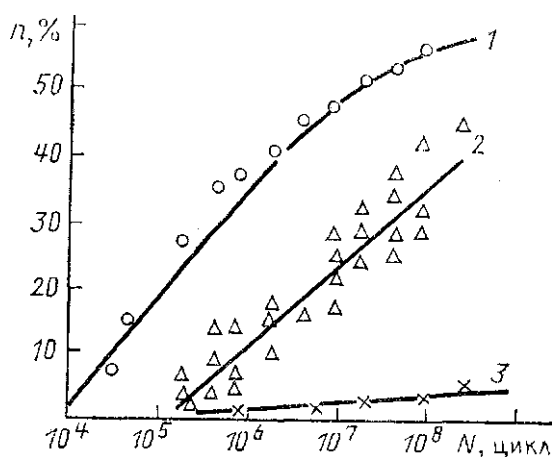


Рис. 9.6. Интегральные функции долговечности маломощных транзисторов первого типа при воздействии кавитации в воде: 1 — 450 Па; 2 — 280; 3 — 100 Па

Такая зависимость согласуется с теоретическими представлениями о характере разрушений при воздействии кавитации, согласно которым в первую очередь разрушаются электроды, имеющие собственные частоты колебаний, совпадающие с частотой максимума спектра кавитационного воздействия, а электроды с собственными частотами, резко отличающимися от частоты максимума кавитационного сектора, не разрушаются вовсе. Таким образом, области максимумов спектральной плотности кавитационного воздействия и распределения резонансных частот перекрываются. При частотах собственных колебаний жесткого электрода, соответствующих 26 кГц, спектральная плотность кавитационного давления имеет незначительную величину. Для приборов, имеющих частоты собственных колебаний, намного отличающиеся от частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности кавитационного давления, механические циклические напряжения гибкого электрода не будут превышать предела усталостной прочности. Следовательно, эти элементы не будут разрушаться при сколь угодно долгом циклическом их нагружении. Эту особенность отражает горизонтальный участок на интегральной функции долговечности (рис. 9.6). Полученные для трех уровней кавитационного нагружения интегральные функции долговечности образуют семейство интегральных функций. При уровнях кавитационного давления 100 Па в течение $2,4 \cdot 10^6$ циклов (120 с) разрушаются 1,6% испытываемых транзисторов (рис. 9.7).



Рис. 9.7. Гистограмма добротностей жестких электродов маломощных транзисторов первого типа

Высокой вибрационной прочностью обладают конструктивные элементы, выполненные из легких металлов и сплавов. При исследовании усталостной прочности элементов конструкций полупроводниковых приборов на резонансных частотах в диапазонах звуковых и ультразвуковых частот установлено, что их вибропрочность в значительной

степени зависит от акустической добротности [211]. Электродные выводы, выполненные в виде скрутки, имеют низкую акустическую добротность и поэтому обладают высокой вибропрочностью.

В результате исследований совокупности 400 маломощных транзисторов, относящихся к первому типу, построены гистограммы добротностей для их жестких конструктивных элементов (рис. 9.7). Из этой гистограммы видно, что добротность жестких элементов меняется в широких пределах (25— 265 единиц). Гистограмма добротностей гибкого электрода имеет аналогичный вид и отличается только математическим ожиданием добротностей. Из данных, приведенных в табл. 9.1, видно, что если для жесткого электрода акустическая добротность имеет математическое ожидание 140 единиц, то для гибкого — около 30. Для других исследованных приборов добротности жестких и гибких электродов отличаются в значительной степени.

Таблица 9.1. – Добротность элементов конструкций полупроводниковых приборов

Компоненты с жестким электродом	Добротность	Компоненты с гибким электродом	Добротность
Маломощный транзистор	156	Диод	23
Транзистор с кристаллодержателем	181	Диод	27
Транзистор без кристаллодержателя	140	Транзистор без кристаллодержателя	29

9.4. ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

В состав современных радиоэлектронной аппаратуры и приборов входят также изделия из хрупких материалов: керамики, стекла, ферритов, стеклокерамики и др. В связи с использованием ультразвука в процессах пайки и металлизации при изготовлении РЭА и приборов, а также возможностью появления высокочастотных колебаний и вибраций широкого спектра в процессе их эксплуатации возникает необходимость исследования влияния высокочастотных колебаний на прочностные свойства хрупких материалов.

По сравнению с металлами хрупкие материалы характеризуются следующими особенностями: 1) пределы прочности и пропорциональности незначительно отличаются по абсолютной величине; 2) пластические свойства (относительные удлинение и сужение) этих материалов отсутствуют или стремятся к нулю; 3) в силу первых двух особенностей разрушение хрупких материалов происходит без макроскопических пластических деформаций или деформаций ползучести; 4) пределы прочности хрупких материалов при их кратковременном ударном или статическом нагружении являются сильно флуктуирующими случайными величинами. Так, например, долговечности стандартных пьезокерамических образцов в идентичных условиях могут рассеиваться в пределах четырех – пяти десятичных порядков [212].

В связи со значительными массой и жесткостью изделий из керамики и других хрупких материалов (по сравнению с конструктивными элементами полупроводниковых приборов и интегральных схем) возникновение в них резонансных явлений при их высокочастотном нагружении маловероятно, а, следовательно, изучение влияния этих явлений на прочность, хрупких материалов не имеет практического значения. Физико-механические свойства сегнетоматериалов, включая их механическую прочность, связаны с характером их доменной, структуры, сформированной в процессе поляризации.

Доменные границы, отличные от 180-градусных, в кристаллах сегне-тоэлектриков являются механическими двойниками. В процессе формирования сложных доменных конфигураций с пересечениями двойниковых границ в кристаллах с большими значениями спонтанной деформации возникают значительные-локальные упругие напряжения, часто приводящие к растрескиванию. Как правило, при нагружении сегнетоэлектриков, трещины образуются в областях пересечения доменов-двойников, а также в местах, содержащих макродефекты (включения, поры). Кроме того, дополнительным источником неоднородных механических напряжений могут быть фазовые границы, которые под действием механических напряжений могут перемещаться, что влечет за собой перестройку доменной структуры [213].

Таким образом, отсутствие или малая концентрация двойниковых и фазовых границ или формирование доменных структур с жестко закрепленными двойниковыми границами будут способствовать увеличению прочности изделий из керамики. В поляризованной пьезокерамике число доменных границ, отличных от 180-градусных, резко уменьшается при переходе тетрагональной фазы в ромбоэдрическую. Теоретически и экспериментально доказано, что наибольшей циклической прочностью обладают ромбоэдрические составы, так как у них малая концентрация двойниковых доменных границ и малая величина спонтанной деформации [214]. Морфотропные составы обладают наименьшей циклической прочностью ввиду значительной концентрации как двойниковых, так и фазовых границ. По критерию циклической прочности тетрагональные составы занимают промежуточное положение. Установлено, что циклическая прочность пьезокерамики, как и металлов, зависит от уровня внутренних напряжений, возникающих при изготовлении и поляризации изделий, режима электрической нагрузки на электродах пьезокерамического элемента, состояния поверхности изделий, их предварительного деформирования, температуры испытаний и времени выдержки в тех или иных динамических условиях [215]. Влияние поляризации на циклическую прочность в основном определяется технологическими режимами поляризации. При поляризации при невысокой температуре (408 К) усталостная прочность (кривая 1) оказалась почти вдвое ниже, чем усталостная прочность (кривая 2), когда поляризация велась при температуре, близкой к точке Кюри (рис. 9.8).

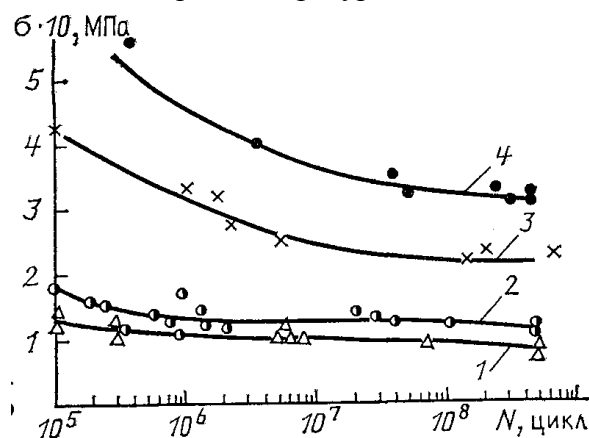


Рис. 9.8. Влияние режимов поляризации на усталостную прочность пьезокерамики

По данным [215], более высокая температура в процессе поляризации способствует более эффективной релаксации возникающих внутренних напряжений. На циклическую прочность пьезокерамики ЦТС существенное влияние оказывает также направление поляризации: кривая 3 характеризует закон изменения усталостной прочности пьезокерамики, поляризованной в поперечном направлении, а кривая 4 — в продольном. Как видно из графиков, усталостная прочность продольно-поляризованных образцов значительно выше. При совпадении вектора поляризации с вектором циклического нагружения (растяжение – сжатие) сопротивление усталостному разрушению увеличивается, так как затрудняется развитие усталостных трещин, ориентированных по касательной к векторам цикличе-

ских напряжений. Частичная деполяризация пьезокерамики, происходящая при циклическом нагружении, и обусловленное этим уменьшение внутренних напряжений — одна из причин увеличения усталостной прочности образцов. На рис. 9.9 кривая 1 построена по результатам усталостных испытаний поляризованных образцов из ЦТЦ-НС. Образцы, не разрушившиеся после $5 \cdot 10^8$ циклов нагружения, были использованы для построения усталостной кривой 2. Как видно из рис. 9.9, предел выносливости тренированных таким способом образцов возрос на 30%. Часть образцов подвергалась испытаниям на циклическую прочность после 20 месяцев хранения (кривая 3). Установлено, что как тренировка циклическим нагружением, так и процессы старения заметно повышают характеристики выносливости. Эксперименты проводились при следующих режимах циклического нагружения: частота 17,8 кГц, амплитуда колебаний 3,5—9,4 мкм, циклические напряжения 9,8—27,4 МПа для образцов из ЦТЦ-НС, частота 24,7 кГц, амплитуда 7,2 мкм, циклические напряжения 22,5 МПа — для образцов из ЦТС.

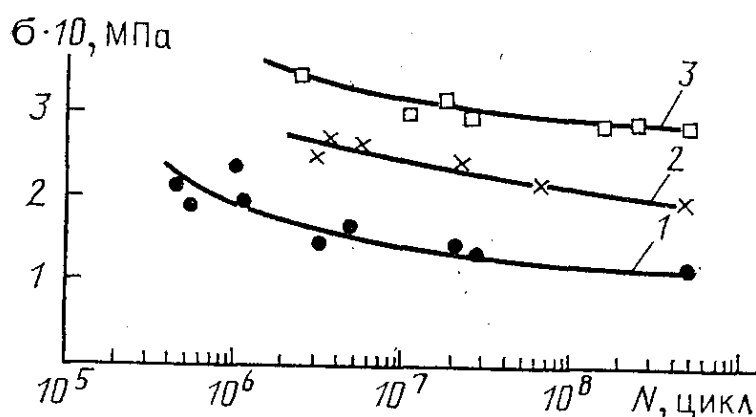


Рис. 9.9. Влияние предварительного циклического нагружения и времени старения на усталостную прочность пьезокерамики

Добавки стекла марок 666А и глазури марок Э-13Т в количестве до 1,5% сверх стехиометрии в синтезированной шихту ферритовой керамики марки 21СПА повышают ее циклическую прочность на 20-40% на базе $5 \cdot 10^8$ циклов при частоте 40 кГц и уровне циклических напряжений растяжения—сжатия 19,6-46 МПа. Повышение высокочастотной циклической прочности стеклокерамики (феррит 21СПА со стеклообразующими добавками) объясняется тем, что в процессе спекания неизбежна рекристаллизация, приводящая к укрупнению зерен керамики. Присутствие в керамике стекла или глазури, располагающихся по границам зерен, препятствует их росту при рекристаллизации. В результате структура стеклокерамики получается более мелкозернистой и, как следствие, поэтому имеет более высокую механическую и, в частности, усталостную прочность. Кроме того, введение стеклообразующих добавок значительно снижает пористость керамики и повышает ее плотность. Это исключает те участки структуры (остроугольные, продолговатые поры), которые являются концентраторами напряжений, т. е. местами зарождения усталостных трещин. Присутствие в керамике стеклообразующих добавок позволяет также выбрать оптимальные, как правило, более высокие режимы обжига, обеспечивающие наибольшую статическую и циклическую прочность. Таким образом, стеклокерамические материалы по сравнению с керамикой обладают более высокими физико-механическими характеристиками и поэтому менее критичны к достаточно длительному воздействию ультразвука значительных энергетических уровней [216].

Применение ультразвуковых колебаний в процессе приготовления керамической смеси, а именно обработка порошковых смесей сегнетокерамики BaTiO_3 , $\text{Ba}(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})\text{O}_3$, а также конденсаторных составов Т-1000, Т-2000 с интенсивностью ультразвуковых коле-

баний 10^5 Вт/м² в течение 30 мин увеличивает диэлектрическую проницаемость керамики на 15 – 25%:, уменьшает тангенс угла диэлектрических потерь, увеличивает механическую прочность [217]. Повышение диэлектрических свойств и механической прочности происходит, по-видимому, вследствие увеличения плотности керамики и уменьшения ее пористости.

Исследования влияния усталостной прочности стекла на низких и высоких частотах циклического нагружения [218, 219] показали, что чем выше частота нагружения, тем выше долговечность (по количеству циклов) для одной и той же амплитуды циклических напряжений. При этом усталостный излом образцов происходит перпендикулярно вектору действия циклических напряжений. Разрушению образцов не предшествует предварительное падение резонансной частоты.

Таблица 9.2. - Сравнительные данные низкочастотной усталостной прочности отдельных металлов и композиционных материалов [220]

<i>Материал</i>	<i>Плотность, $\rho \cdot 10^3$, кг/м³</i>	<i>Предел выносливости, МПа</i>	<i>Удельная усталостная прочность</i>
Сплав Д16Т	2,6	117,6	4,6
Сплав ВТ4-1	4,5	333,2	7,5
Композит (смола ЭДТ-10 30%, стеклонить ВН 5%, волокна углевода ВМН-3 65%)	1,5	333,2	22,7
Композит (смола ЭДТ-10 66%, волокна карбида кремния 34%, 3 слоя сеток из вольфрама 0 21 мкм)	1,5	196,0	13,6
Композит (смола ЭДТ-10 30%, лента углеродная 70%, 4 слоя сеток из вольфрама d=20 мкм)	1,5	323,4	22,0

Композиционные материалы на основе смолы ЭДТ-10, армированные стеклонитью ВН, волокнами карбида кремния или вольфрамовой сеткой, характеризуются более высокими показателями усталостной прочности, чем такие металлы, как дуралюмин Д16Т и сплав ВТ4-1 (табл. 9.2).

Достаточно высокую усталостную прочность при низких частотах нагружения показали соединения, полученные склеиванием фенол-каучуковым клеем ВК-13М или эпоксидно-каучуковым клеем ВК-17 листов из дуралюмина Д16Т толщиной 2 м [221].

Слоистые клееные материалы характеризуются значительным повышением выносливости и демпфирующих свойств при акустическом нагружении, при условии обеспечения требуемых характеристик статической прочности клееных соединений, общей усталости, старения и их устойчивости к воздействию окружающей среды [192, 222].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, широкое внедрение процессов ультразвуковой пайки и металлизации при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры, различных приборов и устройств внесет ощутимый вклад в решение задач по разработке химико-технологических процессов получения новых веществ и материалов с заданными свойствами, научных основ технологии комплексного использования сырья и побочных продуктов, сберегающей энергетические и трудовые ресурсы и использующих замкнутые технологические циклы.

Ультразвук представляет собой мощное физическое воздействие, резко активизирующее процессы пайки и металлизации. Ультразвуковая активация обусловлена процессами разрушения поверхностных окисных пленок, препятствующих смачиванию припоем паяемой поверхности. Ультразвук также способствует эффективному удалению разрушенных окисных пленок из зоны контакта жидкого припоя с поверхностью изделий. В результате этого жидкий припой вступает в контакт с химически чистой (ювенильной) поверхностью металла и беспрепятственно смачивает ее. Улучшению смачиваемости также способствует снижение вязкости припоя, происходящее под действием ультразвуковых колебаний.

Активация неметаллических материалов определяется тем, что наряду с интенсификацией процесса смачивания под действием ультразвуковой кавитации резко ускоряются термохимические и экзотермические реакции взаимодействия компонент жидкого припоя с компонентами стехиометрических соединений, входящих в состав керамики. Этому способствует значительная температура (1000К и более), появляющаяся в локальных микрообъемах при захлопывании кавитационных полостей, диссипация акустической энергии в жидком припое и трансформация ее в теплоту.

Физическая активация ультразвуком процессов пайки и металлизации позволяет исключить метод химической активации поверхности изделий различными видами флюсов, в том числе и высокоактивными. Это устраняет коррозионные и окислительные процессы, появляющиеся при эксплуатации изделий за счет неполного удаления флюсов на технологических операциях очистки. Коррозия в процессе эксплуатации РЭА и приборов совершенно недопустима, так как может приводить к катастрофическому отказу таких изделий в процессе их работы. Внедрение ультразвуковой пайки и металлизации в производство РЭА и приборов позволяет существенно повысить надежность и безотказность их работы.

Активация процессов пайки и металлизации ультразвуковыми колебаниями повышает физико-механические свойства паяных соединений, например предел прочности на растяжение, и снижает электросопротивление паяных швов, что в свою очередь снижает тепловыделение в паяном соединении, а следовательно, повышает его надежность и долговечность работы. Повышение физико-механических свойств паяных соединений достигается совершенствованием их микроструктуры, удалением из массы жидкого припоя газовых пузырьков и шлаковых включений, получением мелкозернистой структуры с равномерным распределением всех компонентов по объему паяного соединения. Такие структуры спая стимулируют прочность, надежность и безотказность работы паяных соединений.

Интенсификация ультразвуком процессов пайки и металлизации позволяет заменить драгоценные и дефицитные металлы другими более дешевыми металлами, входящими в состав припоев. В настоящее время уже разработан ряд экспериментальных припоев, которые по составу и стоимости не являются дефицитными и дорогими и в то же время обеспечивают более высокие эксплуатационные (прочностные и электрические) свойства паяных соединений.

Ультразвук позволяет не только активировать процессы пайки, но и интенсифицировать их, что повышает производительность процесса при одновременном снижении

трудоемкости и доли ручного труда. Процессы ультразвуковой пайки и металлизации характеризуются высокими возможностями механизации и автоматизации. Это позволяет в перспективе создать высокопроизводительные автоматические линии или установки ультразвуковой металлизации и пайки, надежно обслуживаемые микропроцессорами, роботами и манипуляторами.

Ультразвуковая пайка и металлизация применяются во всех типах производства: массовом, серийном и единичном. Это обусловлено использованием недорогого, малогабаритного, серийно выпускаемого оборудования и оснастки, что открывает широкие перспективы использования ультразвуковой пайки и металлизации в гибких автоматизированных производствах РЭА и приборов.

Исследования влияния ультразвука на прочностные свойства конструктивных деталей функциональных элементов и других малогабаритных компонентов РЭА и приборов, изделий из керамики, стеклокерамики и стекла показали, что при удовлетворении определенных условий, особенно исключения резонансных явлений и при правильно выбранных энергетических режимах (амплитуда, удельная плотность мощности), ультразвук не оказывает отрицательного влияния на эксплуатационные характеристики изделий, их прочность, надежность и долговечность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике.— М.: Изд-во иностр. лит., 1957.— 726 с.
2. *Апухтин Г. И.* Пайка алюминия и его сплавов с применением ультразвука.— М.: Изд-во АН СССР, 1956.— 18 с.
3. А. с. 104267 (СССР). Способ облуживания керамических деталей/ В. Ф. Захаров.— Оpubл. в Б. И., 1956, № 9.
4. А. с. 116865 (СССР). Способ лужения и пайки изделий из керамики, абразивов, ферритов и т. п. материалов / В. В. Ганрио, В. П. Зельдин.— Оpubл. в Б. И., 1958, № 12.
5. *Ганрио В. В.* Ультразвуковое лужение и пайка керамики.— Обмен опытом в радиоэлектрон, пром-сти, 1961, № 9, с. 1—14.
6. *Ганрио В. В.* Исследование механической прочности ультразвукового спая.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1967, № 9, с. 1—8.
7. *Применение* ультразвука в промышленности / Под ред. А. И. Маркова.— М.: Машиностроение; София: Техника, 1976.— 239 с.
8. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация.— М.: Мир, 1974.— 686 с.
9. *Флинн Г.* Физика акустической кавитации в жидкостях.— В кн.: Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1967, т. 1, ч. Б, с. 7—186.
10. *Асташкин Ю. С.* Кавитационная прочность и пороги акустической кавитации в расплавах металлов.— В кн.: Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний. М.: Metallургия, 1981, с. 26—33.
11. *Ультразвуковая* технология / Под ред. Б. А. Аграната.— М.: Metallургия, 1974.— 504 с.
12. *Физика* и техника мощного ультразвука. Кн. 2. Мощные УЗ поля / Под ред. Л. Д. Розенберга — М.: Наука, 1968 — 266 с.
13. *Эльгинер И. Е.* Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие.— М.: Физматгиз, 1963.— 420 с.
14. *Ланин В. Л., Тявловский М. Д.* Исследование ультразвуковых микропотоков в жидкостях и расплавах.— Доклады АН БССР, 1984, т. 28, № 5, с. 427—429.
15. *Ультразвук.* Маленькая энциклопедия / Гл. ред. И. П. Голямина.— М.: Сов. энциклопедия, 1979.— 400 с.
16. *Коновалов Е. Г., Германович И. Н.* Ультразвуковой капиллярный эффект.— Докл. АН БССР, 1962, т. 6, № 8, с. 492—493.
17. *Проخورенко П. П., Дежкунов Н. В., Коновалов Г. В.* Ультразвуковой капиллярный эффект.— М.: Наука и техника, 1981.— 135 с.
18. *Проخورенко П. П., Дежкунов Н. В.* Подъем жидкости в капилляре при наличии кавитации.— В кн.: Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний. М.: Metallургия, 1981, с. 46—50.
19. *Коновалов Е. Г., Воробьева Ж. С., Канищев А. Ф.* Исследование явлений, возникающих в зоне соединения при наложении ультразвуковых колебаний.— В кн.: Прочность и пластичность материалов в ультразвуковом поле: Тез. докл. науч.-техн. конф. Мн., 1973, ч. 2, с. 57—59.
20. *Лашко Н. Ф., Лашко С. В.* Контактные металлургические процессы при пайке.— М.: Metallургия, 1977.— 192 с.
21. *Петрунин И. Е.* Физико-химические процессы при пайке.— М.: Высш. шк, 1972.— 280 с.

22. *Пайка* микрополосковых устройств низкотемпературными припоями без применения флюсов / В. И. Бейль, Ф. Н. Крохмальник, Е. М. Любимов, Н. Г. Отмахова.— Электрон, техника. Сер. 10, 1982, вып. 5 (341), с. 39—42.

23. *Бесфлюсовая пайка на воздухе труднопаяемых материалов припоями Al—Ge, Al—Si и Al—Ge—Si* / Г. А. Яковлев, В. М. Сальников, Е. А. Леонов, Ю. Д. Чистяков.— Электрон, техника. Сер. 10, 1982, вып. 9 (345), с. 60—63.

24. *Бейль В. И., Крохмальник Ф. П., Отмахова Н. Г.* Влияние НЧ-колебаний на структуру и свойства паяных соединений при низкотемпературной пайке без применения флюсов.— Электрон, техника. Сер. 10, 1982, вып. 9 (345), с. 57—60.

25. *Архангельский М. Е.* Воздействие акустических колебаний на процесс диффузии.— Успехи физ. наук, 1967, т. 92, № 2, с. 182—205.

26. *Архангельский М. Е., Статников Ю. Г.* Диффузия в гетерогенных системах.— В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1970, с. 515—578.

27. *Коновалов Е. Г., Воробьева Ж. С.* Методика измерения вязкости расплавов припоев, облученных ультразвуком.— Докл. АН БССР, 1974, т. 28, № 5, с. 408—409.

28. *Абрамов О. В.* Ультразвуковая обработка бинарных сплавов.— В кн.: Применение ультразвука в машиностроении.— Мн.: Наука и техника, 1964, с. 10—14.

29. *Ощепков С. А., Цапская О. З.* Воздействие ультразвуковых колебаний: на структуру некоторых легкоплавких сплавов.— Металловедение и термическая обработка металлов, 1975, № 1, с. 71—72.

30. *Кардашев Г. А., Михайлов П. Е.* Теплообменные акустические процессы и аппараты.— М.: Машиностроение, 1973.— 223 с.

31. *Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В.* Пайка деталей электровакуумных приборов.— М.: Энергия, 1967.— 288 с.

32. *Долгов Е. Н.* Исследование ультразвуковой металлизации титановых и алюминиевых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Л.: СЗПИ 1971.— 16 с.

33. *Френкель Я. И.* Введение в теорию металлов.— Л.: Наука, 1972 — 424 с.

34. *Абрамов О. В., Теумин И. И.* Кристаллизация металлов.— В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1970, с. 427—514.

35. *Павлова М. А., Метелкин И. И., Викман К. В.* Роль поверхностных явлений в процессе соединения керамики с металлом пайкой под давлением.— В кн.: Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наук, думка, 1972, с. 281—284.

36. *Дохов М. П., Рогов В. И., Повежев М. Х.* Температурная зависимость смачиваемости пьезокерамики оловом, свинцом и их сплавами.— В кн.: Физика межфазных явлений. Нальчик, 1980, с. 156—159.

37. А. с. 612767 (СССР). Припой для лужения и пайки керамики и стеклокерамики / В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский.— Оpubл. в Б. И, 1978 № 24.

38. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного слоя.— М.: Физмат-гиз, 1963.— 472 с.

39. *Влияние* некоторых физико-химических факторов на смачивание алюминиевых сплавов легкоплавкими припоями при воздействии ультразвука / М. П. Алиева, Е. Э. Гликман, Ю. В. Горюнов и др.— Физика и химия обработки материалов, 1973, № 1, с. 130—136.

40. *Низкотемпературная* ультразвуковая металлизация на воздухе трудносмачиваемых материалов / Н. Т. Коновалов, Э. В. Кистерев, О. В. Абрамов и др.— В кн.: Основные направления развития ультразвуковой техники и технологии на период 1981—1990 годы. Суздаль, 1982, с. 44.

41. *Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Ультразвуковая пайка и металлизация неметаллических материалов в технологии РЭА,—В кн.: Перспективные направления в технологии радиоаппаратостроения. Л.: ЛДНТП, 1979, с. 36—40.
42. *Преснов В. А., Новодворский Ю. В., Якубеня М. П.* Основы техники и физики спая.—Томск: Изд-во Том. ун-та, 1961.— 236 с.
43. *Конников С. Г., Сидоров А. Ф.* Электронно-зондовые методы исследования полупроводниковых материалов и приборов.— М.: Энергия, 1978.— 136 с.
44. *Пугачев С. И.* Экспериментальное исследование пограничной области пьезокерамика— металл при ультразвуковой металлизации.— В кн.: Технологические применения ультразвука: Материалы к краткосрочному семинару. Л.: ЛДНТП, 1968, с. 79—84.
45. Ультразвуковая металлизация пьезокерамики оловянно-цинковыми припоями / О. В. Абрамов, С. А. Зверьков, Я.Н. Оганян и др.— В кн.: Ультразвуковые методы воздействия на технологические процессы. М.: Металлургия, 1961, с. 59—63.
46. *Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы* / В. Д. Пономаренко, Р. А. Роздова, Р. Г. Айнштейн, Г. А. Горячева.— М.: Энергия, 1972.— 160 с.
47. *Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Припой для ультразвуковой металлизации стеклокерамических материалов.— Электрон, техника. Сер 6 1979, вып. 1 (126), с. 19—21.
48. *Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Исследование физико-механических свойств и структуры металлических спаев со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией.— Электрон, техника. Сер. 6, 1981, вып. 4 (141), с. 3—5.
49. *Эпштейн С. А.* Измерение характеристик конденсаторов.— М.; Л.: Энергия, 1965.—236 с.
50. *Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Процесс формирования металлических спаев со стеклокерамическими материалами при воздействии ультразвука. Вещь АН БССР. Сер. ф1з.-тэхн. навук, 1981, № 1, с. 51—55.
51. *Chamber W. F., Hlava P. F.* Electron microprobe studies of metal-ceramic braze joints — 11th Annu. Conf. Microbeam Anal. Soc, Miami Beach, Fla, 1976, p. 54A-54E.
52. *Иванов-Есипович Н. К.* Физико-химические основы производства радиоэлектронной аппаратуры.— М.: Высш. шк., 1979.— 205 с.
53. *Глушкова Л. И.* Новые методы при выборе припоя для пайки приборов радиоаппаратуры.—Л.: ЛДНТП, 1977,-20 с.
54. *Справочник по пайке*/Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова.— М.: Машиностроение, 1975.— 407 с.
55. *Лашко Н. Ф., Лашко С. В.* Пайка металлов.—М.: Машиностроение, 1977.—328 с.
56. *Смирнов Г. Н.* Прогрессивные способы пайки алюминия.—М.: Металлургия, 1981.—240 с.
57. *Материалы, в приборостроении и автоматике: Справочник* / Под ред. Ю. М. Пятинина.— М.: Машиностроение, 1982.— 528 с.
58. *Прецизионные сплавы: Справочник*/Под ред. В. В. Молотилова.—М.: Металлургия, 1983.— 438 с.
59. *Стекло.* Справочник / Под ред. Н. М. Павлушкина.—М.: Стройиздат, 1973.— 487 с.
60. *Справочник по электротехническим материалам* / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева —М.: Энергия, 1974, т. 2.— 616 с.
61. *Основы материаловедения* / Под ред. И. И. Сидорина.—М.: Машиностроение, 1976.— 436 с.
62. *Богородицкий Н. П.* Электротехнические материалы.— Л.: Энергия, 1977.— 352 с.
63. *Глозман И. А.* Пьезокерамика.—М.: Энергия, 1972.—288 с.
64. *Современные материалы.*— М.: Мир, 1970.—224 с.
65. *Бочкарев Б. А., Бочкарева В. А.* Керметные пленки —Л.: Энергия, 1975.— 152 с.

66. Журавлев В. С, Найдич Ю. В. Смачивание окисноалюминиевой керамики и лейкосапфира медно-титановыми и золото-титановыми расплавами.— В кн.: Физическая химия поверхностных явлений в расплавах. Киев: Наук, думка, 1971, с. 206—210.
67. Смачивание графита медными припоями / Т. А. Колина, А. С. Орлов, Г. А. Кравецкий и др.— В кн.: Адгезия расплавов и пайка материалов. Киев: Наук, думка, 1974, с. 192—196.
68. Смачивание алмаза сплавами Ni—Si и Si—Si/V. И. Костиков, Ю. И. Андропов, П. П. Отопков и др.— В кн.: Адгезия расплавов и пайка материалов. Киев: Наук, думка, 1974, с. 192—196.
69. Найдич Ю. В., Перевертайло В. М., Лебович Э. М. Связь термодинамической и адгезионной активности компонентов при смачивании твердых тел расплавами.— В кн.: Адгезия расплавов и пайка материалов. Киев: Наук, думка, 1976, с. 28—31.
70. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения.— М.: Metallurgy, 1976.— 558 с.
71. Поляков Ю. А, Хмылов Г. И., Ярмолов В. А. Разработка низкотемпературных висмутовых и индиевых припоев.— В кн.: Технология и оборудование высокотемпературной пайки. М.: МДНТП, 1973, с. 154— 156.
72. Denslow G. Ultrasonic Soldering — Wire J., 1976, vol. 9, N 9, p. 131 — 136.
73. Пат. 2104625 (ФРГ).
74. Пат. 3744121 (США).
75. Пат. 2101330 (Франция).
76. Пат. 1283848 (Великобритания).
77. Пат. 53-14640 (Япония).
78. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах.— Киев: Наук, думка, 1972,— 196 с.
79. Павлова М. А., Метелкин И. И., Викман К. В. Роль поверхностных явлений в процессе соединения керамики с металлом пайки под давлением.— В кн.: Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наук, думка, 1972, с. 281—284.
80. Яковлев Г. А. Физико-химические аспекты пайки неметаллических материалов.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1982.— 62 с.
81. Пат. 1357073 (Великобритания).
82. Пат. 3949118 (США).
83. Дроздов В. Н., Волгуга В. В., Артюхов А. М., Сыров Н. В. Металлизация радиотехнической керамики под действием ультразвука.— В кн.: Вопросы схемотехники, конструирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры. Мн.: Полымя, 1975, с. 114—115.
84. Ощепков С. А., Цапская О. З. Некоторые вопросы исследования ультразвуковой металлизации керамики.— Электрон, техника. Сер. 7., 1974, вып. 1 (59), с. 28—29.
85. Деленковский Н. В. Ультразвуковая металлизация плотных модификаций нитрида бора.— В кн.: Основные направления развития ультразвуковой техники и технологии на период 1981—1990 годы. Суздаль, 1982, с. 43.
86. А. с. 833884 (СССР). Способ металлизации керамики / П. П. Прохоренко, Н. В. Деленковский, Н. В. Дежкунов, И. В. Стойчева.— Оpubл. в Б. И., 1981, №20.
87. Шапошников О. А., Курдин Ю. А. Высокотемпературная пайка в электровакуумном приборостроении.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1982.— 40 с.
88. Стеклов О. И., Лапшин Л. П. Коррозионно-механическая стойкость паяных соединений.— М.: Машиностроение, 1981.— 100 с.
89. Проектирование технологии пайки металлических изделий. Справочник/С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко, И. Г. Наганетян и др.— М.: Metallurgy, 1983.— 280 с.
90. Хряпин В. Е. Справочник паяльщика.— М.: Машиностроение, 1981.— 348 с.
91. Ультразвуковые преобразователи / Под ред. Е. Кикучи.— М.: Мир, 1972.— 424 с.

92. *Физика* и техника мощного ультразвука. Кн. 1. Источники мощного ультразвука / Под ред. Л. Д. Розенберга.—М.: Наука, 1967.— 368 с.
93. *Марков А. И.* Ультразвуковая обработка материалов.— М.: Машиностроение, 1980.—237 с.
94. *Сыркин Л. Н.* Пьезомагнитная керамика.— Л.: Энергия, 1980.— 208 с.
95. Пат. 2035629 (ФРГ).
96. *Яффе В., Кук У., Яффе Г.* Пьезоэлектрическая керамика.— М.: Мир, 1974.— 288 с.
97. *Гершгал Д. А., Фридман В. М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура.— М.: Энергия, 1976.— 318 с.
98. *Киселев М. Г.* Ультразвуковая техника и технология в Японии.— Мн.: БелНИИ-ИНТИ, 1978.—62 с.
99. А. с. 585887 (СССР). Способ сборки пакетных пьезокерамических преобразователей / М. Д. Тявловский, В. Л. Ланин, И. Н. Щербаков.— Оpubл. в Б. И., 1977, № 48.
100. Пат. 53-30077 (Япония).
101. *Теумин И. И.* Ультразвуковые колебательные системы.— М.: Машгиз, 1959.— 231 с.
102. *Северденко В. П., Клубович В. В., Степаненко А. В.* Обработка металлов давлением с ультразвуком.— Мн.: Наука и техника, 1973.— 286 с.
103. А. с. 320310 (СССР). Магнестрикционный преобразователь для создания продольно-крутильных колебаний / В. П. Северденко, А. В. Степаненко, В. В. Каленик.— Оpubл. в Б. И., 1971, № 34.
104. А.с. 341537 (СССР). Устройство для преобразования акустических продольных колебаний в крутильные / В. П. Северденко, А. В. Степаненко, В. В. Каленик.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 12.
105. *Колешко В. М.* Ультразвуковая микросварка.— Мн.: Наука и техника, 1977.— 328 с.
106. *Коновалов Е. Г., Тявловский М. Д.* Методика выбора материала для ультразвуковых концентраторов.— Докл. АН БССР, 1966, т. 170, № 12, с. 945—949.
107. *Чесская П. А., Тявловский М. Д., Чесский Ю. В.* Аналитический метод определения резонансных размеров стержневых пьезокерамических преобразователей.— Вестн АН БССР. Сер. ф1з.-тэхн. наук, 1983, № 1, с. 93—97.
108. *Тявловский М. Д., Самарин И. А.* Методика расчета пакетных пьезокерамических преобразователей для воздействия на жидкую среду.— Вестн АН БССР. Сер. ф1з.-тэхн. наук, 1983, № 3, с. 112—115.
109. *Martin G. F.* On the theory of Segmented Electromechanical systems.— J. Acoust. Soc. America, 1964, vol. 36, N 7, p. 1366—1370.
110. *Mohammed A.* Equivalent Circuits of solid Horns under going Longitudinal Vibrations.— J. Acoust. Soc. America, 1965, vol. 38, N 5, p. 862—866.
111. *Камп Л.* Подводная акустика.— М.: Мир, 1972.— 365 с.
112. *Гальперина А. Н.* К конструктивному расчету пакетных пьезокерамических преобразователей— Тр. В НИИТВЧ /Л., 1966, вып. 7, с. 297—316.
113. *Fuch J. F.* Ultrasonics in Electronic Soldering Applications.— Electron. Packag. and Prod., 1979, vol. 19, N II, p. 124—132.
114. *Гудков А. В.* Аппаратура для ультразвуковой металлизации.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1967, № 9, с. 26—29.
115. *Попилов Д. Я.* Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник.— М.: Машиностроение, 1982.— 400 с.
116. А. с. 179399 (СССР). Ультразвуковой паяльник/В. В. Ганрио, А. В. Гудков.— Оpubл. в Б. И., 1966, № 5.

- 117.А. с. 216861 (СССР). Ультразвуковой паяльник/А. В. Стамов-Витковский, В. Н. Гинин, Б. Т. Мамат и др.—Опубл. в Б. И., 1968, № 15.
- 118.А. с. 519200 (СССР). Паяльник для ультразвуковой пайки / Г. В. Дружинин, Г. Д. Борисов, В. Б. Клейменов, В. И. Батищев.— Опубл. в Б. И., 1976, № 24.
- 119.А. с. 766790 (СССР). Способ ультразвуковой обработки материалов и устройство для его осуществления / В. Л. Венгринович, В. М. Колешко.— Опубл. в Б. И., 1980, № 36.
- 120 Пат. 2542988 (ФРГ).
- 121.А. с. 766775 (СССР). Паяльник для пайки и распайки/Г. Е. Коновалов, Н. В. Дежкунов, А. Р. Баев и др. Опубл. в Б. И., 1980, № 36.
- 122.А. с. 831447 (СССР). Ультразвуковой паяльник/В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский.—Опубл. в Б. И., 1981, № 19.
- 123.Ланин В. Л., Макаревич А. И. Ультразвуковое лужение деталей и элементов РЭА.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1981, вып. 12, с. 10—12.
- 124.Graff K. Macrosonics in Industry: Ultrasonic Soldering—Ultrasonics. 1977, vol. 15, N 2, p. 75—81.
- 125.Пат. 53-40179 (Япония).
- 126.Пат. 54-30655 (Япония).
- 127.Пат. 56-14390 (Япония).
- 128.Пат. 4203531 (США).
- 129.Пат. 54-2243 (Япония).
- 130.Пат. 57-64473 (Япония).
- 131.Пат. 4358044 (США).
- 132.Универсальная установка индукционной пайки/О. А. Шапошников, А. В. Тороннов, Л. П. Рязанцев и др.—Электрон, техника. Сер. 7, 1981, вып. 6.(109), с. 27—29.
- 133.Тявловский М. Д., Колтович В. А. Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний обрабатываемых инструментов при горячем ультразвуковом плющении в вакууме.— В кн.: Прочность — пластичность материалов в ультразвуковом поле: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Алма-Ата, 1980, с. 149—150.
- 134.Колесников А. Е. Ультразвуковые измерения.— М.: Изд-во стандартов, 1970.-238 с.
- 135.Добровольская Э. Я. Измерение акустической мощности в жидкости поверхностными термоакустическими приемниками.— Измерит, техника, 1973, № 12, с. 61—63.
- 136.Давиденко Л. А. Измерение параметров акустических полей в рабочих емкостях ультразвуковых технологических установок.— В кн.: Создание и применение аппаратуры для ультразвуковых технологических процессов в машиностроении: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара. М.: 1978, ч. 2, с. 161—165.
- 137.Агранат Б. А., Гутнова Л. Б., Ляшнев Л. М. О методах оценки эффективности установок ультразвуковой очистки.— Акуст. журн., 1972, т. 18, № 3, с. 337—342.
- 138.Макаров Л. О. Измерение параметров ультразвуковой кавитации.— В кн.: Создание и применение аппаратуры для ультразвуковых технологических процессов в машиностроении: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара. М., 1978, ч. 2, с. 166—171.
- 139.Лубяницкая Г. Д. Новый способ измерения активности кавитации.— В кн.: Четвертая Всесоюз. науч.-техн. конф. по ультразвуковым методам интенсификации технол. процессов. М., 1979, ч. 1, с. 29—30.
- 140.А. с. 627394 (СССР). Способ обнаружения кавитации / М. Д. Тявловский, В. М. Алефиренко —Опубл. в Б. И., 1978, № 37.
- 141.Потапенко А. Е., Чистяков Е. С. Ультразвуковой кавитометр.— В кн.: Акустика и ультразвуковая техника. Киёв: Техника, 1968, № 4, с. 6—11.
- 142.Кортнев А. В., Макаров В. К., Супрун С. Г. Исследование акустической кавитации методом амплитудной спектрометрии.— Акуст. журн., 1976, т. 22, № 5, с. 718—723.

143. *Кратыш Г. С., Степичев А. А.* Индикатор кавитационного поля.— В кн.: Новые разработки в УЗ технике и их промышленное применение: Матер, науч.-техн. семинара. Л.: ЛДНТП, 1977, с. 58—61.
144. *Алефиренко В. М., Ланин В. Л., Макаревич А. И.* Измерение ультразвукового кавитационного давления в расплавах припоев.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1984, № 2, с. 38—39.
145. *Пугачев С. И.* Металлизация пьезокерамики с применением ультразвука.— Технология судостроения, 1964, № 5, с. 100—103.
146. *Долгов Е. Н., Пугачев С. П., Тарат Э. Я.* Ультразвуковая металлизация титановых и алюминиевых сплавов.— Технология судостроения, 1971, № 4, с. 53—55.
147. А. с. 383553 (СССР). Бесфлюсовый способ лужения металлов / Г. Е. Вирозуб, С. В. Лашко, П. В. Панченко, П. С. Кобзарев. Оpubл. в Б. И., № 24, 1973.
148. *Исследование оптимальных режимов при ультразвуковом лужении алюминия / Г. Е. Вирозуб, П. В. Панченко, Г. Ф. Савчук, С. В. Шабанова.*— В кн.: Прикладная акустика, 1971', вып. 4, с. 237—243.
149. *Тризна Ю. П.* Ультразвуковая пайка плат.— В кн.: Новые материалы и технология пайки в машиностроении. М.: ЦП НТО Машпрома, 1971, с. 131—135.
150. *Ананьев О. Т., Тищенко Л. М., Андросов Г. А.* Использование ультразвука для лужения и пайки полупроводниковых приборов.— Электрон, техника. Сер. 10, 1970, вып. 1 (33), с. 34—40.
151. *Winkler G.* Unterstiitruung des Weichlotprozesses dursh Ultraschall.— ZIS —Mitt., 1975, Bd. 17, N 4, S. 395—403.
152. *Няньковский Л. А.* Ультразвуковой преобразователь для безфлюсового лужения радиодеталей.— В кн.: Новые разработки в ультразвуковой технике и их промышленное применение. Л.: ЛДНТП, 1977, с. 89—91.
153. *Роговский В. Ф.* Бесфлюсовое лужение выводов микросхем с помощью ультразвука.— Техника средств связи. Сер. Технол. пр-ва и оборуд., 1977, вып. 2 (3), с. 115—116.
154. А. с. 743815 (СССР). Способ гиперзвуковой микросварки и пайки/В. М. Колешко, А. В. Гулай.— Оpubл. в Б. И., 1980, № 24.
155. А. с. 893426 (СССР). Способ ультразвуковой пайки и лужения/ М. Д. Тявловский, В. Л. Ланин, Ю. М. Зак, В. Н. Копылов.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 48.
156. *Ланин В. Л., Тявловский М. Д.* Исследование ультразвуковой бесфлюсовой пайки подложек гибридных интегральных схем в корпуса микросборок.— Докл. АН БССР, 1982, т. 26, № 11, с. 1008—1010.
157. *Хорбенко И. Г.* Ультразвук в машиностроении.— М.: Машиностроение, 1974.— 280 с.
158. *Тявловский М. Д., Фастовец Е. П., Алефиренко В. М.* Ультразвуковая очистка РЭА и приборов.— Мн.: Наука и техника, 1984.— 239 с.
159. *Петрунин И. Е., Маркова И. Ю., Екатова А. С.* Металловедение пайки.— М.: Металлургия, 1976.— 264 с.
160. *Harding W. B.* Solderability Testing.— Plating, 1965, N 10, p. 970—981.
161. *Панченко П. В.* Ультразвуковой метод определения способности припоя к смачиванию при пайке.— В кн.: Прикладная акустика, 1977, № 5, с. 168—172.
162. *Rothschild B. F.* Electroplating of Solderable Coatings.— Metal Progr., 1981, vol. 119, N 7, p. 25—29.
163. *Зайдман Н. С.* Паяемость выводов радиоэлементов.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1976, вып. 5, с. 16.
164. *Паяемость серебряного покрытия / Д. Г. Коваленко, Б. М. Крамер, С. А. Захаров и др.* — Обмен опытом в радиопром-сти, 1978, вып. 11, с. 27—29.

165. *Давыдова А. М.* Паяемость оловянно-цинковых и оловянно-висмутовых гальванических покрытий.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1972, вып. 7, с. 28-30.
166. *Гржимальский Л. Л., Ильевский И. И.* Технология и оборудование пайки.— М.: Машиностроение, 1979.— 240 с.
167. *Benkowsky G.* Grundlagen der Induktionserwärmung Elektro-Plaktiker, 1974, Bd. 28, N 8, S. 265—268.
168. *Коган М. Г.* Расчет индукторов для нагрева тел вращения.— М.: ВНИИЭМ, 1966.—59 с.
169. *Ланин В. Л.* Активация процессов пайки корпусов микроэлектронных изделий электромагнитными высокочастотными колебаниями.— В кн.: Радиотехника и электроника. Мн.: Вышэйш. шк., 1983, вып. 12, с. 174—178.
170. А. с. 554118 (СССР). Способ пайки деталей/М. Д. Тявловский, А. А. Хмыль, В. К- Станишевский, В. Л. Ланин.— Оpubл. в Б. И., № 14, 1977.
171. *Мартынюк С. П., Моторненко А. П.* О возможности плазменной пайки электрических монтажных соединений при производстве радиоаппаратуры.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технол. пр-ва и оборуд., 1976, вып. 3, с. 79—83.
172. *Котельников Д. И.* Технологические возможности и проблемы пайки в плазме тлеющего разряда изделий единичного и массового производства.— В кн.: Новые достижения в области пайки. Киев: ИЭС им. Е. О Патона, 1981, с. 103—107.
173. *Зворыкин Д. Б., Прохоров Ю. И.* Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности.—М.: Энергия, 1980.— 176 с.
174. *Исследование* способа пайки электрорадиоэлементов на печатные платы лазером непрерывного излучения / Ю. В. Поливанов, Н. Н. Эльманович, Е. Ц. Браславский и др.—Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технол. пр-ва и оборуд., 1980, вып. 1, с. 47—50.
175. *Мартынов Г. К.* Надежность электрических соединений, выполненных пайкой легкоплавкими припоями.—М.: Изд-во стандартов, 1968.— 52 с.
176. *Бережной В. П., Дубицкий Л. Г.* Выявление причин отказов РЭА.— М. - Радио и связь, 1983.—232 с.
177. *Laserstrahlen helfen in der Lottechnik.*—Electron Produk. und Priif-technik, 1982, N 4, S. 189.
178. *Захаров К. Д.* Ультразвуковая пайка стекла, керамики и ферритов.— В кн.: Применение ультразвука в технологии машиностроения. М.: ЦИНТИ, 1960, с. 142—145.
179. *Гудков А. В.* Аппаратура для ультразвуковой металлизации.—Обмен опытом в радиопром-сти, 1967, № 1, с. 26—29.
180. *Пугачев С. И.* Металлизация пьезокерамики с применением ультразвука—Технология судостроения, 1964, № 5, с. 100—103.
181. *Ультразвуковая металлизация и пайка для технологии приборостроения* / Под ред. А. В. Гудкова.— Обзор по материалам отеч. и зарубеж. печати за 1966—1974 гг.—М.: ЦНТИ «Поиск», 1975.— 58 с.
182. *Ультразвуковая металлизация сополимеров стирола* / Е. В. Гусева, Е. Н. Долгов, С. И. Пугачев и др.—Технология судостроения, 1971, № 6, с. 50—52. .
183. *Прохоренко П. П., Стойчева И. В., Деленковский Н. В.* Ультразвуковая пропитка графита легкоплавкими припоями,— Вестн AN БССР. Сер. ф1з.-энерг. наук, 1977, № 4, с. 121—123.
184. *Манко Г. Г.* Пайка и припои. Материалы, конструкции, технология и методы расчета.—М.: Машиностроение, 1968.— 322 с.
185. *Афанасьев М. А., Дмоховская С. А., Хомылева И. М.* О прочности сцепления серебряных покрытий с керамикой.—Вопросы радиоэлектроники. Сер. 3, 1961, вып. 6, с. 45—54.
186. *Атанасяц А. М., Пашикина Л. А.* Методика определения прочности сцепления металлического покрытия с диэлектриком.—Обмен опытом в радиопром-сти, 1978, вып. 11, с. 34—35.

187. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами.—Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук, 1983, № 4, с. 69—73.
188. Seeba M., Sear R. Ceramic-Chip Capacitor Attachment — IEEE Trans on parts, hybrids and packaging, 1977, vol. 13, N 4, p. 395—399.
189. Шкарупило И. И. Неразрушающий метод контроля керамики и ее спаев с металлами.— В кн.: Диэлектрики и полупроводники. М., 1977, № 12, с. 45—49.
190. Lystrup A. Measurement of the Ultrasonics Effect in an Ultrasonic Solder Bath.—Weld J., 1976, vol. 55, N 10, p. 309—313.
191. Пат. 49-42781 (Япония).
192. Северденко В. П., Скрипниченко А. Л., Тявловский М. Д. Ультразвук и прочность.—Мн.: Наука и техника, 1979.—248 с.
193. Antonevich J. N. Fundamentals of Ultrasonic Soldering.—Weld J., 1976, vol. 55 N 7, p. 200—207.
194. Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Ультразвуковая пайка и металлизация неметаллических материалов в технологии РЭА.— В кн.: Перспективные направления в технологии радиоаппаратостроения. Л., 1979, с. 36—40.
195. Методика испытаний на паяемость. Методы изучения кинематики смачивания, растекания и затекания в зазор жидкого припоя.— М.: ВНИИМАШ, 1974.—27 с.
196. Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. Термодинамика силикатов —М.: Стройиздат, 1973.—251 с.
197. Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций: Ускоренные методы / А. Н. Крестовников, Л. П. Владимиров, Б. С. Гуля-ницкий, А. Я. Фишер.—М.: Металлургиздат, 1963.—416 с.
198. Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник/ Под общ. ред. А. П. Зефинова,—М.: Атомиздат, 1965.— 460с.
199. Диаграммы состояния силикатных систем: Справочник. Тройные силикатные системы / Н. А. Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Ланин и др.—Л.: Наука, 1972, вып. 3.—448 с.
200. Карапетьянц М. Х. Методы сравнительного расчета тепловых эффектов.— Журн. физ. химии, 1956, т. 30, вып. 3, с. 593—607.
201. Коровкин А. И., Левковский Ю. Л. Исследование замыкания кавитационной каверны вблизи твердой стенки.— Инж.-физ. журн., 1967, т. 12, № 2, с. 246—253.
202. Левковский Ю. Л. Акустическое излучение кавитационной каверны, замыкающейся у твердой стенки.—Материалы VI Всесоюз. акустич. конф. М., 1968, с. 15—16.
203. Дранезо Б. Н., Иоффе А. И., Рой Н. А. Некоторые эффекты взаимодействия кавитационных полостей.—Морское приборостроение. Сер. акустика, 1972, № 1, с. 82—90.
204. Иванов В. И., Карпов М. М., Шамгин Ю. В. К вопросу о расчете резонансных частот элементов конструкций полупроводниковых приборов.— Электрон, техника. Сер. 2, 1972, № 1 (65), с. 3—10.
205. О диапазоне резонансных частот механических колебаний конструктивных элементов полупроводниковых приборов / В. И. Иванов, М. М. Карпов, В. А. Синяев, Ю. В. Шамгин.—Электрон, техника. Сер. 8, 1972, № 5, с. 48—55.
206. Фастовец Е. П., Тявловский М. Д. Колебательное движение жестко связанных электродов радиоэлектронной аппаратуры.— Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук, 1977, № 3, с. 99—102.
207. Вартанов В. Г., Солоха В. А. Связь между отказами полупроводниковых приборов в ультразвуковом поле и максимальной амплитудой кавитационных импульсов давления.— В кн.: Акустика и ультразвуковая техника, Киев: Техника, 1973, № 8, с. 16—19.
208. Полякова А. Л., Шкловская-Корди В. В. Электрические характеристики кремниевых p — n -переходов, подвергнутых неоднократной деформации.—В кн.: Физика электронно-дырочных переходов. Л., 1969, с. 141— 146.

209. *Rindner W.* Resis Tance of Elastically Deformed Shallow p-n Jurctions.— *J. Appl. Phys.*, 1962, vol. 33, N 8, p. 2479—2489.

210. *Анализ отказов полупроводниковых приборов в процессе ультразвуковой очистки* / В. М. Алефиренко, В. В. Дивин, М. Д. Тявловский.— В кн.: Современная электроника, ее проблемы и перспективы развития: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. Мн., 1975, ч. 2, с. 144.

211. *Усталостная прочность элементов конструкций полупроводниковых приборов на резонансных частотах в диапазонах звуковых и ультразвуковых частот*/Т. В. Давыдов, М. М. Карпов, В. А. Синяев, Ю. В. Шамгин.— В кн.: Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружений. Киев: Наук, думка, 1977, с. 190—194.

212. *Кириллов В. И., Павлов П. А.* О принципах феноменологического описания процессов длительного разрушения хрупких материалов.— В кн.: Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1980, с. 206—210.

213. *Многокомпонентные системы — основа для получения высокоэффективных сегнетоэлектрических материалов различного назначения* / Е. Г. Фесенко, А. Я. Данцигер, О. Н. Разумовская и др.— *Известия АН СССР. Сер. физ.*, 1975, № 39, с. 1090—1094.

214. *К вопросу повышения циклической прочности пьезокерамических материалов* / В. Г. Гавриляченко, А. Я. Данцигер, В. А. Дорошенко и др.— В кн.: Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1980, с. 194—198.

215. *Кузьменко В. А., Писаренко Г. Г.* Выносливость пьезокерамики при циклическом растяжении—сжатии с высокой частотой.— В кн.: Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1980, с. 223—234.

216. *Влияние* стеклообразующих добавок на циклическую прочность магнитострикционных ферритов / А. К. Гариханов, И. П. Голямина, Г. Г. Писаренко и др.— В кн.: Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1980, с. 264—269.

217. *Влияние* ультразвука на диэлектрические свойства сегнетокерамики / В. В. Клубович, В. В. Михневич, В. К. Высоцкий, А. А. Бедрицкий.— *Докл. АН БССР*, 1983, т. 27, № 12, с. 1089—1090.

218. *Ritter I. E.* Dynamic and Static Fracture of Silicate Glasses, Jr and Sherburne —*J. Amer. Ceram. Soc.*, 1971, vol. 54, N 12, p. 601—605.

219. *Кузьменко В. А., Письменный Н. Н.* Исследование усталостной прочности стекла на высоких частотах циклического изгиба.— В кн.: Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1977, с. 116—120.

220. *Скворцова Н. В., Уманский Э. С.* Исследование выносливости некоторых новых композиционных материалов на звуковых частотах нагружения.— В кн.: Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1977, с. 120—125.

221. *Григорьев А. А., Николаев В. С.* Демпфирующие и усталостные характеристики образцов клееных соединений элементов тонкостенных конструкций.— В кн.: Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук, думка, 1977, с. 157—164.

222. *Коновалов Е. Г., Дроздов В. М., Тявловский М. Д.* Динамическая прочность металлов.— Мн.: Наука и техника, 1969.-252 с.

223. *Шапошников О. А., Курдин Ю. А.* Исследование растекания и капиллярного течения припоя при индукционном нагреве с ультразвуком.— В кн. Тез докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1978, с. 12—14.

224. Шапошников О. А., Курдин Ю. А., Кац А. М. Высокотемпературная индукционная пайка с наложением ультразвука.—В кн.: Тез. докл. 4-й Всесоюз. науч.-техн. конф. М., 1979, с. 112—114.

225. Шапошников О. А., Торонов А. В., Рязанцев Л. Г. и др. Универсальная установка индукционной пайки.—Электрон, техника. Сер.7, 1981, вып. 6 (109), с. 27—29.

226. Дворянчиков В. Г., Шапошников О. А. Растекание высокотемпературных припоев по поверхности нержавеющей сталей в высоком вакууме при индукционном нагреве.—Электрон, техника. Сер. 7, 1982, вып. 2 (111), с. 29-30.

227. Шапошников О.А., Дворянчиков В. Г., Курдин Ю. А-Влияние ультразвуковых колебаний на растекание припоя ПСрМИн-63В на стали 12Х18Н9Т —Электрон, техника. Сер. 7, 1979, вып. 1 (92), с. 164—166.

228. Дворянчиков В. Г., Шапошников О. А., Курдин Ю. А. Капиллярная пайка нержавеющей сталей в высоком вакууме при индукционном нагреве.— Электрон, техника. Сер. 1, 1981, вып. 6 (330), с 51—54.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Г л а в а 1	
Физико-химические процессы, возникающие при воздействии ультразвуковых колебаний на расплавы припоев	6
1.1. Ультразвуковые эффекты и явления в расплавах припоев	6
1.2. Удаление окисных пленок и интенсификация процесса смачивания металлов расплавами под воздействием ультразвука	14
1.3. Диффузия и растворение в ультразвуковом поле	19
1.4. Физико-химическая сущность интенсификации процесса смачивания материалов расплавами припоев	20
1.5. Химическое взаимодействие расплавов с неметаллическими материалами	24
Г л а в а 2	
Паяемые материалы радио- и приборостроения	31
2.1. Классификация паяемых материалов	31
2.2. Конструкционные металлические материалы	33
2.3. Металлы и сплавы специального назначения	39
2.4. Материалы на минеральной основе	42
2.5. Синтетические материалы на основе неорганических соединений	48
Г л а в а 3	
Припой для ультразвуковой пайки и металлизации	49
3.1. Припои для лужения и пайки металлов	49
3.2. Припои для металлизации керамических и стеклокерамических материалов	54
3.3. Припои для высокотемпературной металлизации и пайки	57
3.4. Особенности получения нестандартных припоев	60
Г л а в а 4	
Ультразвуковое оснащение для пайки и металлизации	62
4.1. Акустические технологические системы	62
4.2. Магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи	66
4.3. Пассивные элементы колебательной системы	73
4.4. Рарчех пакетных пьезоэлектрических преобразователей	76
4.5. Ультразвуковые паяльники и ванны	78
4.6. Способы и устройства для измерения параметров ультразвукового воздействия	84
Г л а в а 5	
Современные способы ультразвуковой пайки	90
5.1. Способы ультразвукового лужения и пайки	90
5.2. Подготовка паяемых поверхностей перед ультразвуковым лужением и пайкой	96
5.3. Влияние гальванических покрытий на паяемость металлов	99
5.4. Выбор способа нагрева	106
5.5. Высокотемпературная ультразвуковая пайка металлов и сплавов	113
5.6. Контроль качества паяных соединений	115

Глава 6	
Современные способы ультразвуковой металлизации неметаллических материалов	119
6.1. Способы металлизации керамических и стеклокерамических материалов	119
6.2. Ультразвуковая металлизация синтетических материалов	124
6.3. Высокотемпературная ультразвуковая металлизация неметаллических материалов	125
6.4. Контроль качества металлизированных покрытий	127
Глава 7	
Влияние параметров процесса ультразвуковой пайки на качество спаев и металлизированных покрытий	130
7.1. Влияние параметров ультразвукового воздействия на расплавы припоев	130
7.2. Влияние вида ультразвуковых колебаний и кавитационного давления в расплавах припоев на прочность сцепления металлизированных покрытий	136
7.3. Технологические режимы процессов ультразвуковой пайки и металлизации	139
Глава 8	
Физические модели воздействия ультразвука на процессы пайки	144
8.1. Особенности процесса смачивания расплавами припоев при воздействии ультразвука	144
8.2. Физическая модель формирования спаев с металлами в ультразвуковом поле	147
8.3. Физическая модель формирования спаев с неметаллическими материалами в ультразвуковом поле	149
Глава 9	
Влияние ультразвука на физико-механические свойства функциональных элементов радиоэлектронной аппаратуры и приборов	153
9.1. Механизм воздействия кавитации на твердое тело	153
9.2. Факторы, влияющие на прочность функциональных элементов РЭА и приборов при воздействии кавитации	158
9.3. Статистические характеристики прочности функциональных элементов РЭА и приборов при воздействии вибраций и кавитации	160
9.4. Влияние высокочастотного циклического нагружения на прочность изделий из хрупких материалов	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167
ЛИТЕРАТУРА	169

НАУКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

*Владимир Владимирович Клубович
Михаил Доминикович Тявловский
Владимир Леонидович Ланин*

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА В РАДИО- И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Заведующий редакцией Н. Т. Л о м а к о
Редактор Т. П. Т к а ч е в а
Художник Е. В. К р у г л о в
Художественный редактор А. А. Ш у п л е ц о в
Технический редактор Л. А. К о р н е е в а
Корректор З. Я. А в е р б а х
ИБ № 2390

Печатается по постановлению РИСО АН БССР. Сдано в набор 20.05.85. Подписано в печать 03.09.85. АТ 18684. Формат 60X90/и. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 16,5. Усл. кр.-отг. 16,5. Уч.-изд. л. 15,1. Тираж 1800 экз. Зак. № 1197. Цена 2 р. 20 к. Издательство «Наука и техника» Академии наук БССР и Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220600. Минск, Ленинский проспект, 68. Типография им. Франциска (Георгия) Скорины издательства «Наука и техника». 220600. Минск, Ленинский проспект, 68.