

**С.П. Кундас
В.Л. Ланин
М.Д. Тявловский
А.П. Достанко**



**УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ
ПРОЦЕССЫ
В ПРОИЗВОДСТВЕ
ИЗДЕЛИЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕХНИКИ**



УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Том 1

**Минск
2002**

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В двух томах

Том 1

Под общей редакцией академика НАН Беларуси А.П. Достанко

**Минск
Бестпринт
2002**

УДК 534.8: 621.396.6

ББК 32.873

У 51

Авторы:

С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Д., Тявловский, А.П. Достанко.

Рецензенты:

акад. НАН Беларуси, д-р. техн. наук А.В. Степаненко;

акад. НАН Беларуси, д-р. техн. наук В.В. Клубович

Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т. 1/ С.П. Кундас, В.Л. Ланин М.Д. Тявловский и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко.– Мн.: Бестпринт, 2002.- 404 с.

ISBN 985-6633-71-0

ISBN 985-6633-72-9

В монографии обобщены результаты исследований и разработок в области теории, технологии и оборудования для изготовления изделий электронной техники с применением ультразвука. В первом томе рассматриваются технологические процессы и оборудование для изготовления деталей электронной техники и приборостроения методами пластического деформирования, ультразвуковая пайка и металлизация.

Предназначена для инженерно-технических работников предприятий электронной и других отраслей промышленности, специалистов научно-исследовательских институтов, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

© Коллектив авторов, 2002

ISBN 985-6633-72-9.

BELARUSIAN STATE UNIVERSITY OF INFORMATICS AND RADIOELECTRONICS

**ULTRASONIC PROCESSES IN ELECTRONICS
PRODUCTION**

In 2 Volumes

Volume 1

Edited by Academicians of National Academy of Science of Republic Belarus A.Dostanko

Minsk 2002

Ultrasonic Processes in Electronics Production. In 2 Volumes. Vol. 1 / S. Kundas, M. Tyavlovsky, V. Lanin, A. Dostanko: Edited by academician of National Academy of Science RB A. Dostanko.– Minsk: Bestprint, 2002.- 404 p.

The results of research and developments in the field of theories, technology and equipment for the fabrication of electronic products using ultrasonic methods are generalised in monographs.

In the first volume the great deal of attention is paid to the ultrasonic technological processes and equipment for production of electronics parts by methods of plastic deformation, ultrasonic soldering and metallization.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ | 18 |
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 22 |
| Литература к предисловию | 27 |
| Глава 1. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДАМИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ | 32 |
| 1.1. Анализ теоретических и экспериментальных исследований процессов ультразвуковой обработки материалов электронной техники | 32 |
| 1.1.1. Свойства и применение тугоплавких материалов в электронной технике, пути повышения качества | 32 |
| 1.1.2. Методы изготовления изделий из тугоплавких металлов и сплавов и их интенсификация с помощью ультразвука | 36 |
| 1.1.3. Методы исследования и моделирования процессов пластического деформирования металлов и сплавов | 40 |
| 1.1.3.1. Теоретические и экспериментальные методы исследования процессов обработки металлов давлением | 40 |
| 1.1.3.2. Анализ теоретических и экспериментальных исследований процесса ультразвукового плющения лент | 43 |
| 1.2. Физико-математические основы ультразвуковых методов формирования конструктивных элементов электронных приборов из тугоплавких материалов | 47 |
| 1.2.1. Физические основы, способы и устройства для пластического деформирования тугоплавких металлов и сплавов | 49 |

| | |
|---|------------|
| 1.2.2. Общие подходы и принципы моделирования теплофизических и динамических процессов при ультразвуковых методах обработки тугоплавких материалов | 64 |
| 1.2.3. Разработка математических моделей процессов, основанных на ультразвуковом микропластическом деформировании металлов | 69 |
| 1.2.3.1. Математическая модель процесса нагрева в вакууме проволок из тугоплавких металлов и сплавов | 69 |
| 1.2.3.2. Математические модели кинематики и динамики процесса ультразвукового плющения лент | 75 |
| 1.2.3.3. Математические модели кинематики и динамики процесса ультразвуковой навивки ленточных спиралей из проволок | 124 |
| 1.2.3.4. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при ультразвуковом микропластическом деформировании тугоплавких металлов | 126 |
| 1.3. Экспериментальное оборудование, методики и программные средства для исследования и моделирования процессов ультразвукового микропластического деформирования тугоплавких металлов | 132 |
| 1.3.1. Разработка экспериментального оборудования и методик исследований | 132 |
| 1.3.1.1. Общие требования и рекомендации | 132 |
| 1.3.1.2. Экспериментальные установки, измерительные приборы и оснастка | 133 |
| 1.3.2. Методы исследования физико-механических, технологических свойств и структуры изготавливаемых изделий | 144 |
| 1.3.3. Программные средства для компьютерного моделирования процессов ультразвукового микропластического деформирования тугоплавких металлов и сплавов | 147 |
| 1.4. Исследования процессов формирования конструктивных элементов электронных приборов методом ультразвукового микропластического деформирования | 159 |

| | |
|---|------------|
| 1.4.1. Выбор и характеристика исследуемых материалов | 159 |
| 1.4.2. Влияние режимов нагрева на деформируемость и свойства материалов в процессах ультразвукового микропластического деформирования (УМД) | 160 |
| 1.4.2.1. Особенности применения нагрева металлов при различных способах ультразвукового микропластического деформирования металлов и сплавов | 160 |
| 1.4.2.2. Температурные режимы обработки при инфракрасном и электроконтактном способах нагрева | 161 |
| 1.4.2.3. Влияние температуры нагрева на силовые характеристики обработки, свойства и микроструктуру изделий из тугоплавких металлов и сплавов | 164 |
| 1.4.3. Взаимодействие обрабатываемого материала с инструментами при УМД | 173 |
| 1.4.3.1. Постановка задачи исследований | 173 |
| 1.4.3.2. Стабильность амплитуды ультразвуковых колебаний деформирующих инструментов и динамические характеристики ультразвуковой колебательной системы | 174 |
| 1.4.3.3. Кинематика и динамика взаимодействия обрабатываемого металла с инструментами | 186 |
| 1.4.3.4. Формоизменение металла в очаге деформации | 192 |
| 1.4.3.5. Трение и адгезионное взаимодействие обрабатываемого металла с инструментами | 198 |
| 1.4.4. Особенности формирования структуры, физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния металла | 205 |
| 1.4.5. Точностные характеристики изделий | 206 |
| 1.5. Оборудование и технологические процессы формирования конструктивных элементов электронных приборов из тугоплавких материалов методами ультразвукового микропластического деформирования | 221 |
| 1.5.1. Рекомендации по разработке ультразвукового оборудования и технологических процессов для изготовления лент и спиралей, применяемых в электронных приборах | 221 |

| | |
|--|-----|
| 1.5.2. Оборудование для изготовления изделий ленточного профиля из тугоплавких металлов и сплавов, применяемых в электронных лампах специального назначения (МГП, ЛОВ и ЛБВ) | 222 |
| 1.5.2.1. Установка для изготовления микролент из вольфрама | 223 |
| 1.5.2.2. Установка для изготовления прецизионных лент из тугоплавких металлов и сплавов ("Мустанг") | 225 |
| 1.5.2.3. Установка и технологический процесс изготовления лент из тугоплавких металлов для конструктивных элементов МГП (ГУПВ-2) | 231 |
| 1.5.2.4. Установка и технологический процесс ультразвуковой навивки спиралей ЛОВ и ЛБВ | 238 |
| 1.5.3. Установки ультразвукового плющения лент для изделий приборостроения и связи | 242 |
| 1.5.4. Возможности и рекомендации по промышленному использованию ультразвуковой технологии изготовления контакт-деталей герконов | 238 |
| Литература к гл. 1 | 249 |
| Глава 2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА И МЕТАЛЛИЗАЦИЯ | 264 |
| 2.1 Физико-химические процессы в расплавах при воздействии ультразвуковых колебаний | 264 |

| | |
|---|------------|
| 2.1.1. Ультразвуковые эффекты и явления в расплавах | 284 |
| 2.1.2. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания | 290 |
| 2.1.3. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами | 301 |
| 2.2 . Оборудование и инструменты для ультразвуковой пайки и металлизации | 305 |
| 2.2.1. Оборудование и инструменты для ультразвуковой пайки | 318 |
| 2.2.2. Устройства металлизации неметаллических материалов | 329 |
| 2.2.3. Способы нагрева при ультразвуковой пайке и металлизации | 339 |
| 2.3 . Ультразвуковые процессы пайки и металлизации | 346 |
| 2.3.1. Подготовка металлируемых поверхностей к пайке | 346 |
| 2.3.2. Влияние параметров ультразвуковых процессов на прочностные и электрические свойства соединений | 357 |
| 2.3.3. Контроль качества паяных соединений и металлизированных покрытий | 375 |
| Литература к гл. 2 | 384 |

CONTENS

LIST OF CONVENTION

| | |
|---|-----|
| FOREWORD | 22 |
| Chapter 1. APPLICATION OF ULTRACONIC UNDER PLASTIC DEFORMATION OF ELECTRONICS MATERIALS | 32 |
| 1. 1. Analysis of electronics material ultrasonic treatment | 32 |
| 1.1.1 Properties and application of refractory metals in electronics. The trends of their quality improvement. | 32 |
| 1.1.2. Methods of pieces from refractory metals and alloys fabrication and their intensification via ultrasonic | 36 |
| 1.1.3. Research and modeling methods of metals and alloys plastic deformation | 40 |
| 1.1.3.1. Theoretical and experimental methods of metals mechanical working research | 40 |
| 1.1.3.2. Theoretical and experimental research analyses of ultrasonic flattening method | 43 |
| 1.2. Physicomathematical bases of refractory materials ultrasonic plastic deformation | 47 |
| 1.2.1. Physical bases, methods and equipment for refractory metals and alloys plastic deformation | 47 |
| 1.2.2. The general approaches and principles of thermophysical and dynamical processes modeling under ultrasonic methods of refractory metals treatment | 64 |
| 1.2.3. Mathematical models of processes based on metal ultrasonic microplastic deformation | 69 |
| 1.2.3.1. Mathematical model of refractory metals and alloys wires heating in vacuum process | 69 |
| 1.2.3.2. Mathematical models of ultrasonic flattening kinematics and dynamics | 75 |
| 1.2.3.3. Mathematical models of ultrasonic winding kinematics and dynamics | 124 |
| 1.2.3.4. Modeling of metal stress-strained state under refractory metals ultrasonic microplastic deformation | 126 |

| | |
|---|------------|
| 1.3. Experimental equipment, methodic and software for study and modeling of refractory metals ultrasonic microplastic deformation | 132 |
| 1.3.1. Experimental equipment and research methodic | 132 |
| 1.3.1.1. The general demands and recommendations | 132 |
| 1.3.1.2. Experimental apparatus, measuring equipment and arrangement for metals | 133 |
| 1.3.2. Methods of physicomachanical, technological properties and structure research of fabricating pieces | 144 |
| 1.3.3. Software for computer modeling of refractory metals and alloys ultrasonic microplastic deformation | 147 |
| | |
| 1.4. Research of electronic devices component fabrication by ultrasonic microplastic deformation methods | 159 |
| 1.4.1. Selection and characteristics of investigated materials | 159 |
| 1.4.2. Heating conditions influences on deformability and material properties | 160 |
| 1.4.2.1. Metal heating application features under various methods of ultrasonic microplastic deformation | 160 |
| 1.4.2.2. Temperature working conditions research under infra-red and electrocontact heating | 161 |
| 1.4.2.3. Heating temperature effect on processing force characteristics, properties and microstructure of refractory metals and alloys pieces | 164 |
| 1.4.3. Interaction of deformed material with instruments | 173 |
| 1.4.3.1. The general characteristics | 173 |
| 1.4.3.2. Ultrasonic oscillation amplitude stability of deforming instruments and ultrasonic oscillation system dynamic characteristics | 174 |
| 1.4.3.3. Kinematics and dynamics interaction of worked metals with instrument | 186 |
| 1.4.3.4. Metal shape changing in deformation center | 192 |
| 1.4.3.5. Friction conditions and adhesive interaction of deforming metals and instruments | 198 |

| | |
|---|-----|
| 1.4.4. Metal structure formation features, physicomechanical properties and stress-strained of deforming metal | 205 |
| 1.4.5. Research of precision properties of fabricated pieces under ultrasonic microplastic deformation | 206 |
| 1.5. Equipment and technological processes realized of ultrasonic microplastic deformation methods | 221 |
| 1.5.1. Recommendation for development of ultrasonic equipment and technological processes for fabrication of flat wire and spirals | 221 |
| 1.5.2. Equipment for production of ribbon profile from refractory metals and alloys which are used in electronic tubes of special purpose | 223 |
| 1.5.2.1. Apparatus for fabrication micro flat wire from tungsten | 224 |
| 1.5.2.2. Apparatus for fabrication of precision ribbon from refractory metals and alloys (“Mustang”) | 225 |
| 1.5.2.3. Apparatus and technological process for fabrication of refractory metals flat wire for constructive elements of high power devices | 231 |
| 1.5.2.4. Apparatus and technological process for ultrasonic winding of spiral for TWT-devices | 238 |
| 1.5.3. Ultrasonic apparatus for fabrication of flat wires used in communication technique | 242 |

| | |
|--|------------|
| 5.4. Possibilities and recommendations for industrial use of ultrasonic technologies for hermetically sealed contact tips fabrication List of reference to chapter 2 | 238 |
| List of reference to chapter 1 | |
| Chapter 2. ULTRASONIC SOLDERING AND METALLIZATION | 249 |
| 2.1. Physico-chemical processes in melts under of ultrasonic oscillations effect | 264 |
| 2.1.1. Ultrasonic effects and phenomena in melts | 264 |
| 2.1.2. Removal oxide films and intensification of watering wetting process | 264 |
| 2.1.3. Diffusion and chemical interaction of melts and soldered materials | 279 |
| 2.2. Ultrasonic equipment for soldering and bonding | 290 |
| 2.2.1. Ultrasonic soldering devices | 301 |
| 2.2.2. Device of metallization of non-metallic materials | 301 |
| 2.2.3. Methods of heating in ultrasonic equipment | 318 |
| 2.3. Ultrasonic processes of soldering and metallization | 329 |
| 2.3.1. Preparation of soldered metallized surfaces | 339 |
| 2.3.2. Influencing of ultrasonic processes parameters on strength and electrical properties of connections | 339 |
| 2.3.3. Quality control of solder joints and metallized coatings | 349 |
| List of reference to chapter 2 | |
| | 364 |

Перечень условных обозначений

A - амплитуда ультразвуковых колебаний; площадь конечного элемента; матрица жесткости;

A_i - площадь сечения элемента;

${}^t a_{ij}$ - трансляция поверхности текучести;

b – ширина получаемой ленты;

b_0 - ширина ленты-заготовки;

b_x – переменная по ширине зоны деформации;

[B] - матрица форм деформаций;

B_0 – точка, относительно которой колеблется инструмент;

C — удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);

${}^t C_{ij}$ - девиаторы напряжений в момент времени t ;

C_0 – собственная емкость колебательного контура.

[C] — матрица теплоёмкости;

[D] - матрица упругих постоянных;

[D]^{ep} - упруго-пластическая матрица характеристик материала;

D^e - матрица упругости материала;

D^{ep} - мгновенная упруго-пластическая матрица;

D_{ij}^{ep} - упруго-пластическая матрица характеристик материала;

d_0 – начальный диаметр;

d - диаметр;

${}_{t+\Delta t} E_{ij}$ - декартовы компоненты тензора бесконечно малых перемещений;

$E, E_{(T)}$ – модуль продольной упругости;

E_{ij} - компоненты тензора бесконечно малых перемещений;

${}^{t+\Delta t} f^{(i-1)}$ - функция оценки достоверности решения;

${}^{t+\Delta t} F$ - вектор узловых сил, соответствующий внутренним напряжениям в конечных элементах;

f_1 и f_2 - частоты колебаний инструментов;

{ F } - вектор нагрузки;

F_0 – амплитуда силы возбуждения, приведенная к рассматриваемому сечению колебательной системы;

g - ускорение свободного падения;

h - толщина зоны контакта; толщина ленты;

h_0 - соответственно толщина исходной ленты;

h_x - высота, в зависимости от переменной x .

I - сила тока;

I_s - теоретический обратный ток;

1K - линейная матрица жесткости без учета эффектов начальных перемещений;

$[K]$ - матрица теплопроводности;

κ_1 - удельная теплоемкость;

k - коэффициент сухого трения, коэффициент, учитывающий усилие противонапряжения;

$k_{(T)}$ - коэффициент трения;

K_p - поправочный коэффициент;

l - длина элемента; длина рассматриваемого участка проволоки; длина участка деформации; базовая длина;

l_K - длина калибрующей площадки инструмента;

L - путь, проходимый заготовкой в течение одного периода колебаний инструментов;

собственная емкость колебательного контура;

m - поправочный коэффициент;

m_0 - масса единицы длины стержня;

m_{ij} - элементы матрицы перехода;

M - матрица (2×2) перехода для участка колебательной системы;

n - число элементов; число отрезков ($\lambda/4$, λ - длина волны), укладываемых по длине стержня; координата по внешней нормали к поверхности, м;

P - постоянный коэффициент;

P_0 - сила осадки заготовки;

P_x - продольная составляющая силы давления инструмента;

P - периметр поперечного сечения проволоки;

P - удельное давление в зоне контакта Н/м²;

P_0 - величина статистического усилия противонапряжения;

p - давление;

R_c – радиус окружности, образованной внешней поверхностью проволоки;

${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$ – вектор внешних узловых усилий в момент времени $t + \Delta t$;

R_t – удельное контактное сопротивление, Ом·м²;

${}^t s_y$ – предельное напряжение в момент времени t ;

S_l и S_n (S_3) – соответственно, площадь сечения ленты и проволоки;

S – площадь контакта; площадь сечения; площадь рабочей поверхности датчика; площадь поперечного сечения проволоки;

t – толщина треугольного симплекс-элемента; текущее время

${}^{t+\Delta t} t_{ij}$ – декартовы компоненты тензора напряжений Коши;

T – период колебаний; температура, функция распределения температуры;

T_0 – начальная температура;

T_∞ – температура на поверхности нагревателя;

$\{T\}$ – вектор узловых температур;

u – расстояние между поверхностью инструмента и недеформированной поверхностью заготовки;

$u(z)$ – комплексная амплитудная функция, характеризующая амплитуду и фазу колебаний в сечении с координатой z ;

U – напряжение;

U_T – термический потенциал;

$\cdot U_g$ – длина рассматриваемого интервала разбиения по оси X ;

v – скорость, скорость движения деформируемой заготовки относительно инструментов;

v_S – скорость движения ленты в фазе осадки;

$W_{упр.пл.}$ – работа при упруго-пластической деформации;

$W_{деф.пл.}$ – элементарная составляющая работы пластического деформирования;

$W_{упр.сил.}$ – работа сил упругости;

$W_{тр.}$ – работа сил трения;

$W_{прот.}$ – работа сил противонапряжения;

x – координата;

$x(y)$ – функция, описывающая контур поверхности проволоки;

X_0 – максимальная величина контролируемых перемещений;

y – координата, расстояние точек профиля до его средней линии.

α – угол захода инструментов; коэффициент конвективного теплообмена; коэффициент линейного расширения, суммарная неустойчивость частоты автогенератора и детектора;

α_m – термическая проводимость фактического контакта ;

α_T – коэффициент теплового расширения материала;

Δ – величина единичного обжата;

Δh – величина деформации проволоки при ультразвуковой навивке;

$\Delta u^{(i)}$ – вектор приращений для узловых перемещений на i -й итерации;

δ – величина упругой деформации;

\mathcal{E} – относительная диэлектрическая проницаемость среды,

ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м,

ϵ_p – приведённый коэффициент теплообмена;

$\epsilon_{(T)}$ – коэффициент эмиссии;

$\{\epsilon_0\}$ – вектор начальной деформации;

λ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); коэффициент Ламэ;

λ_m – усредненная теплопроводность материалов инструмента и заготовки, Вт/(м·К);

$\lambda_{g(T)}$ – коэффициент теплопроводности плазмообразующего газа;

$\lambda_{p(T)}$ – коэффициент теплопроводности и материала частиц;

μ – коэффициент Пуассона;

ρ – плотность;

ρ_l – удельное электросопротивление материала проволоки;

σ_p – предел прочности более пластичного материала, Па;

$\sigma_{(T)}$, $\sigma_{S(T_k)}$ – предел текучести;

$\sigma(v, u)$ – контактное напряжение в точке с координатами v и u ;

$\sigma_{(T)} = \sigma_b \cdot \epsilon_{(T)}$ – приведенный коэффициент излучения;

σ_b – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma_b = 5,67 \times 10^8$ Вт/м²К⁴);

τ – время, с;

ω_k – угловая скорость вращения керны.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первые работы по изучению ультразвука относятся к 1827 г., когда на Женевском озере впервые была измерена скорость его распространения в воде. С тех пор ультразвук оставался лишь предметом лабораторных исследований. Трагическая гибель 14 апреля 1912 г. английского океанского лайнера "Титаник" при столкновении его с айсбергом заставила ученых решить проблему предотвращения подобных катастроф. Эта проблема была успешно решена благодаря ультразвуку, получившему, таким образом, первое практическое применение в мореплавании.

Тем не менее подлинное развитие ультразвуковая техника получила лишь после второй мировой войны. В этот период выполнен ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, позволявших создать мощное направление как в науке, так и в производстве -- ультразвуковую технологию.

Большая заслуга в этом принадлежит ученым стран СНГ: О.В.Абрамову, Б.А.Агранату, В.И.Башкирову, И.П.Голяминой, В.Ф. Казанцеву, О.К.Келлеру, Ю.И.Китайгородскому, В.В.Клубовичу, Е.Г. Коновалову, А.В.Кулемину, В.А.Лабунову, Д.М.Лямшеву, Д.О.Макарову, А.И.Маркову, В.Д.Мартынову, И.И.Муханову, И.С.Пугачеву, Л.Д.Розенбергу, В.П.Северденко, М.Г.Сиротюку, А.В.Степаненко, И.И.Теумину, Н.Н.Холопову, Н.Н.Хавскому, Г.И.Эскину. Благодаря творческому вкладу этих и многих других ученых и инженеров разработаны и внедрены в производство новые ультразвуковые технологические процессы, которые по критериям производительности, а также качества и себестоимости продукции превосходят традиционные технологические процессы и успешно конкурируют с другими новыми электрофизическими и электрохимическими методами обработки [1-33].

К числу мощных электрофизических воздействий, резко интенсифицирующих технологии производства, относятся электронное, ионно-плазменное, лазерное излучения, электромагнитное поле и ультразвук [1-33]. Из анализа литературных источников [1, 2, 7] следует, что электронное, ионно-плазменное, лазерное излучения обладают ограниченными технологическими возможностями, определяемыми тепловым эффектом. Электромагнитное воздействие также характеризуется тепловым эффектом (вихревые токи) или эффектом взаимодействия пондеромоторных сил, возникающих только в токопроводящих материалах (металлах) [4]. Ограничены технологические возможности и у электрохимической, электроэрозионной и электрогидравлической обработок [3, 5, 6], которые могут преимущественно применяться для воздействия на металлы и для решения довольно узких технологических задач (разделительные операции, операции формообразования и электрополировки). Кроме того, многие из указанных электрофизических воздействий весьма критичны к масштабному фактору с точки зрения микроминитюаризации обрабатываемых изделий

или вообще не могут применяться в технологии изделий электронной техники (ИЭТ) из-за значительных тепловых воздействиях, которые не допустимы для большинства ИЭТ.

Наиболее широкими технологическими возможностями характеризуется ультразвук. Ультразвуковой обработке одинаково эффективно могут подвергаться как проводники, так полупроводники и диэлектрики. Ультразвуковая обработка может реализовываться как в вакууме, так и в воздушной и жидкой средах. В зависимости от технологической необходимости ультразвуковая обработка может выполняться при нормальных, высоких или криогенных температурах. Главное достоинство ультразвуковой технологии -- ее невысокая критичность к масштабному фактору, когда одинаково успешно могут обрабатываться как масштабные, так и в особенности микроминиатюрные изделия. Технологические возможности различных электрофизических воздействий, по данным [1-37], приведены в табл. В.1.

Таблица В.1

Технологические возможности различных электрофизических и электрохимических воздействий [1-37]

| Технологическое использование | Вид воздействия | | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|------------------|----------|-------------------|-------------------|-----|-----------------------|------------------------|----------------|
| | электрохимическое | электроэрозионное | ионно-плазменное | лазерное | электроннолучевое | магнитоимпульсное | ТВЧ | электрогидравлическое | инфракрасное излучение | ультразвуковое |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Формообразование за счет отдельного локального объема | + | | + | | | + | | + | | + |
| Формообразование плавлением | | | + | + | + | | | | + | |
| Пластическое формообразование | | | | | | + | | + | | + |
| Металлизация | + | | + | + | + | | | | + | + |
| Лужение | + | | + | + | + | | | | + | + |
| Пайка | | | + | + | + | | + | | + | + |
| Сварка | | | + | + | + | | + | | + | + |
| Склеивание | | | | | | | | | | + |
| Мокрая очистка | | | | | | | | | | + |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сухая очистка | | | + | | + | | | | + | |
| Отделочная обработка | + | + | + | + | + | | | | | + |
| Упрочняющая обработка | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Совершенствование физико-механических свойств материалов и их структуры | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

Примечание - + – имеет место.

Однако применительно к производству изделий в микроминиатюрном исполнении использование ультразвука до настоящего времени считается неэффективным из-за возможных повреждений и разрушений наименее прочных конструктивных микроэлементов в процессе обработки изделий. Это обстоятельство требует проведения новых теоретических и экспериментальных исследований с целью выявления и устранения причин, приводящих к указанным негативным последствиям.

Основой для разработки ряда типовых технологических процессов, которые в зависимости от агрегатного состояния обрабатываемой среды и в соответствии с работами [8-27] могут быть систематизированы (табл.В.2), послужил тот факт, что ультразвук оказывает существенное влияние на многие физико-механические свойства вещества [8-37].

Таблица В.2

Типовые ультразвуковые технологические процессы [8-37]

| Агрегатное состояние обрабатываемой среды | Типовой ультразвуковой технологический процесс | | |
|---|--|--------------------------------|----------------------------------|
| | | Применяемый в производстве ИЭТ | Перспективный в производстве ИЭТ |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Газ | Горение в ультразвуковом поле | | |
| Комплекс: "жидкость-газ" | Получение аэрозолей | + | |
| | Коагуляция аэрозолей | + | |
| | Дегазация жидкостей | + | |

| | | | |
|---|--|---|---|
| Жидкость | Получение эмульсий | + | + |
| | Обработка расплавов металлов | + | |
| Комплекс: "твердое тело – жидкость – газ" | Получение зольей Акустическая (низкотемпературная сушка) Коагуляция зольей | | + |
| Комплекс: "твердое тело – жидкость" (гель) | Прецизионная очистка изделий в микроминиатюрном исполнении | + | + |
| | Пропитка лаками и компаундами | + | |
| | Химическая обработка | + | + |
| | Электрохимическая обработка | + | |
| | Химико-термическая обработка | | |
| | Термическая обработка | + | |
| | Кристаллизация | + | |
| | Металлизация | + | |
| | Бесфлюсовая пайка | + | + |
| | Ультразвуковое (размерное) резание | + | + |
| | Склеивание | | + |
| | Суспензирование | | |
| | Диспергирование | + | + |
| | Гидроабразивная обработка | + | + |
| | Гидрометаллургия | + | + |
| | Снятие заусенцев, облоя | + | + |
| Получение псевдосплавов типа метоллосуспензий | + | | |

| | | | |
|--------------|--|---|---|
| Твердое тело | Интенсификация традиционных методов сварки | + | + |
| | Интенсификация традиционных процессов обработки давлением | + | |
| | Отделочно-упрочняющая обработка | + | |
| | Интенсификация традиционных способов отделочно-упрочняющей обработки | + | + |
| | Интенсификация традиционных процессов резания | | |
| | Улучшение физико-механических свойств металлов и сплавов | + | |
| | Ультразвуковая сварка | | |
| | Ультразвуковое микропластическое деформирование (микроковка) | + | |
| | Ультразвуковое резание | | + |
| | | + | |
| | | | + |
| | | | + |

Большинство типовых ультразвуковых технологических процессов было создано до появления ИЭТ и до широкого применения методов их микроминиатюризации. Поэтому существующие ультразвуковые технологические процессы по причинам, указанным выше, не всегда могут быть применены для производства изделий в микроминиатюрном исполнении, что послужило стимулирующим фактором для дальнейших исследований и технологий в области ультразвуковой техники и технологии.

Так, можно отметить высокую эффективность способа получения металлических лент микронных и малых сечений ультразвуковым холодным пластическим деформированием проволок [17-21]. Этот способ получения лент из пластичных металлов в 5-20 раз повышает производительность труда по сравнению с плющением на прокатных станах при одновременном

снижении усилия плющения в 2,5-5,0 раз, повышает физико-механические свойства обработанного металла и снижает шероховатость обработанной поверхности [17].

Однако анализ существующих процессов обработки давлением не выявил эффективных способов изготовления длинномерных изделий типа лент и ленточных спиралей из тугоплавких и трудно деформируемых металлов, широко применяемых в электронной технике [38-50]. Способы обработки давлением этих материалов характеризуются низкой производительностью и низким выходом годных изделий, не превышающим 20-40% [38-50].

Постоянный рост сложности и прецизионности ИЭТ повышает требования к надежности клееных и паяных соединений. Перспективным направлением в технологии производства ИЭТ является ультразвуковая активация процессов склеивания, металлизации и пайки. Анализ литературных данных показал, что существующие традиционные способы склеивания, металлизация и пайки не обеспечивают высокого качества и прочности соединений ИЭТ [50-60]. Кроме того, отсутствуют припои, не содержащие драгоценных металлов и позволяющие получать надежные прочные спаи с широким кругом неметаллических материалов, включая стеклокерамические. Механизмы склеивания, металлизации и образования спая с неметаллическими материалами в ультразвуковом поле полностью не раскрыты [50-60]. Слабо исследовано влияние мощных ультразвуковых полей на процессы формирования клееных и паяных соединений. В силу перечисленных причин ультразвук недостаточно используется для активации процессов склеивания, металлизации и пайки при производстве ИЭТ.

Повышение степени интеграции ИЭТ предъявляет предельно высокие требования к качеству их очистки. Ни одна отрасль техники не требует такой высокой степени чистоты изделий как электроника. Для отдельных сборочных единицах ИЭТ с расстоянием между токоведущими моментами в десятые доли миллиметра остатки любых загрязнений могут явиться причиной короткого замыкания, отказа и выхода из строя. Традиционные методы очистки (ручная, вибрационная, химическое и электрохимическое обезжиривание, струйная промывка и др.) не обеспечивают надлежащего качества очистки и сохранности электронных компонентов в микроминиатюрном исполнении. Использование плазменной, плазмохимической и других так называемых "сухих" методов очистки применительно к ИЭТ на этапе их монтажа и сборки не допустимо из-за высокой температуры процесса, которая отрицательно влияет на работоспособность ИЭТ.

Качественную очистку ИЭТ при высокой степени их интеграции и микроминиатюризации может обеспечить только ультразвуковая очистка (УЗО) [26-28]. В настоящее время УЗО широко применяется в машиностроении. Однако в приборостроении, в технологии ИЭТ она не находит должного применения. Это объясняется тем, что, несмотря на накопленный опыт ее использования, отсутствуют научно обоснованные рекомендации по выбору режимов УЗО, которые обеспечили бы

качественную очистку компонентов ИЭТ без их разрушения и появления скрытых стадий усталости, повреждения наименее прочных конструктивных микроэлементов [61,62], что сделало технологический процесс УЗО неприемлемым для очистки ИЭТ в производственных условиях. В то же время промышленное внедрение УЗО ИЭТ позволит не только повысить качество изделий, но и осуществить дальнейшую их микроминиатюризацию.

Анализ литературных данных [8-10,23-34] свидетельствует о том, что в ряде технологических процессов и в особенности в технологических процессах ультразвуковой очистки продолжают использоваться взрыво- и пожароопасные растворители (бензин, ацетон, спирт и т.п.), а также галогеналканы, которые представляют серьезную экологическую и социальную опасность. Так, трихлорэтилен и перхлорэтилен требуют утилизации отходов методом захоронения с отчуждением санитарно-защитных зон. Применение фреонов оказывает отрицательное действие на защитный озоновый слой атмосферы Земли.

В связи с изложенным выше, перед учеными стран мирового сообщества стоит глобальная проблема разработки экологически чистых технологических процессов.

В настоящей монографии приведены разработки в области ультразвуковых технологий производства изделий электронной техники, выполненные на кафедре электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники и в других организациях и учреждениях СНГ. В первом томе рассматриваются технологические процессы и оборудование для изготовления деталей электронной техники и приборостроения методами пластического деформирования, ультразвуковая пайка и металлизация. Во втором томе - ультразвуковая микросварка, интенсификация с помощью ультразвука процессов склеивания, ультразвуковая очистка электронных компонентов, разработки в области измерения параметров ультразвукового воздействия, а также специализированные ультразвуковые технологии и оборудование.

Предисловие и глава 1 первого тома монографии написаны совместно д-р.техн.наук., проф. С.П. Кундасом, д-р.техн.наук., проф. Тявловским М.Д. (парагр. 1.2, 1.4 – совместно С.П. Кундасом и канд.техн.наук В.А. Колтовичем), глава 2 – совместно канд.техн.наук, доцентом В.Л. Ланиным и акад., д-р.техн.наук, проф. А.П. Достанко.

Авторы выражают большую благодарность сотрудникам и студентам БГУИР за помощь в оформлении монографии: инженеру Б.А. Тонконогову, переводчику И.Н.Романовской, магистранту Р. Ламницкому, студенту Д. Марковнику.

Литература к предисловию

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. и др. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов М.: Машиностроение, 1985. 495 с.
2. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники В 3 т. Т.1 / А.П.Достанко, С.П.Кундас, С.В.Бордусов и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: ФУА информ, 2000. 424 с.
3. Чачин В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов. Мн.: Наука и техника, 1978. 183 с.
4. Дудин А.А. Магнито-импульсная сварка металлов. М.: Metallurgy, 1979. 128 с.
5. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 302 с.
6. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.
7. Шияев А.С. Ультразвуковая обработка расплавов при производстве и восстановлении деталей машин. Мн.: Наука и техника, 1992. 175 с.
8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяминой М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
9. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Роэенберга. М.: Наука, 1970. 688 с.
10. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. М.: Metallurgy, 1974. 504 с.
11. Абрамов О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука, 2000. 311 с.
12. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Мн.: Наука и техника, 1973. 286 с.
13. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность. Мн.: Наука и техника, 1976. 448 с.
14. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвуковая обработка материалов. Мн.: Наука и техника, 1981. 295 с.
15. Асташев В.К., Смирнов В.К. О влиянии высокочастотной вибрации на процессы пластического деформирования. // Машиноведение, 1983. № 2. С.3-12.
16. Волосевич П.Ю., Козлов А.В., Мордюк Н.С. и др. Пластическая деформация стали в ультразвуковом поле // Металлофизика, 1983. Т.У, № 6. С.101-106.

17. Коновалов Е.Г., Игнашев Е.П. Площение круглой проволоки в микроленты вибрацией ультразвуковой частоты // Докл. АН БССР. 1971. Т.ХУ. № 12. С.985-987.
18. Кундас С.П., Вышинский Н.В., Тявловский М.Д. Ультразвуковое площение лент из тугоплавких металлов, применяемых в электронной технике и приборостроении / Под ред. А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2001. 296 с.
19. Никифоров Б.А., Каюков А.С., Королев Н.А. Геометрические параметры лент, полученных методом ультразвуковой ковки. Изв. вузов. Черная металлургия, 1978. № 4. С.63-20.
20. Никифоров Б.А., Каюков А.С., Королев Н.А. Энергосиловые параметры процесса ультразвуковой ковки лент микронных сечений Изв. вузов. Черная металлургия, 1978. № 6. С.60-62.
21. Кудрин Ю.А., Рейхельсон Ю.А. Ультразвуковое площение прецизионной ленты для периодических структур ЭВП спирального типа. // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология, организация, производство и оборудование. М.: ЦНИИ Электроника, 1981. Вып.6 (781). 61 с.
22. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Ибрагимов В.И. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. Мн.: Тесей, 2001. 344 с.
23. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 240 с.
24. Муханов И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом. М.: Машиностроение, 1978. 44 с.
25. Прохоренко П.П., Пугачев С.И., Семенова Н.Г. Ультразвуковая металлизация материалов. Мн.: Наука и техника, 1987. 270 с.
26. Бреславец А.В., Хуторненко В.Д. Ультразвуковая чистка радиоаппаратуры. М.: Сов. радио, 1974. 80 с.
27. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
28. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем. / Под ред. В.С. Григорьева и Л.Д. Розенберга. Изд. 2-е. М.: Изд. иностр. лит., 1957. 726 с.
29. Труэлл Р., Эдъбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела М.: Мир, 1972. 308 с.
30. Физическая акустика // Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969. т.1-4.
31. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 200 с.

32. Скучик К. Основы акустики: Пер. с англ. / Под ред. Д.М. Лямшева. М.: Мир, Т.2. 1976. 543 с.
33. Гершгал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, изд. 3-е, перераб. и доп. 1976. 319 с.
34. Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Докл. I Всесоюзн. семинара. Киев.: Наукова думка, 1977. 250 с.
35. Тяпунина Н.А., Наими Е.К., Зеленкова Г.М. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами М.: Изд-во Московск. ун-та, 1999. 237 с.
36. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Докл. III Всесоюзн. семинара. Киев: Наукова думка, 1983. 348 с.
37. Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения // Тез. докл. Междунар. симпозиума Киев: Наукова думка, 1984. 212 с.
38. Махнач В.И. Моделирование и оптимизация в САПР технологических процессов кузнечно-штампового производства: Дис. ...д-ра техн. наук. АН Беларуси. Ин-т. техн. кибернетики. Минск, 1994. 225 с.
39. Климов К.М., Новиков И.И., Шнырев Г.Д. Электропластичность тугоплавких металлов и сплавов при прокатке проволоки в ленту. Физ.-механ. и теплофиз. свойства металлов М.: Наука. 1976. С.186-189.
40. Корнеев Н.И., Певзнер С.Б., Разуваев Е.Н. и др. Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов М.: Metallurgy, 2-е изд. перераб. и доп. 1975. 439 с.
41. Крупин В.З. Прокатка металлов в вакууме. М.: Metallurgy, 1974. 248 с.
42. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов / Под ред. Р.А. Нилендера. М.: Энергия, 1973. 336 с.
43. Коликов А.Н., Полухин П.И., Крупин А.В. и др. Технология и оборудование для обработки тугоплавких металлов М.: Metallurgy, 1982. 327 с.
44. Галант М.Б., Маклаков А.А., Шур М.Б. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов М.: Советское радио, 1969. 408 с.
45. Шахназов Х.С. Производство метизов. М.: Metallurgy, 1977. 392 с.
46. Тимофеева З.А., Петрова Т.Г., Журмунская Л.Б. Торсионы и растяжки из сплава МР-47ВП. Исследование и применение сплавов рения М.: Наука, 1975. С.121-128.

47. Климав К.М., Солдатов В.М., Шнырев Г.Д. Влияние упругой деформации на электрическое сопротивление тонких проволок и лент из мадидбен-рениевых и вольфрам-рениевых сплавов. Исследование и применение сплавов рения. М.: Наука. 1975. С.48-88.
48. Тейлор А. Рентгеновская металлография: Пер. с англ. / Под ред. Б.Я. Пинеса. М.: Металлургия, 1965. 663 с.
49. Котляр А.А., Шпаро Н.Б., Ямпольский А.М. Зависимость остаточного электросопротивления вольфрама от степени деформации и термической обработки // Электронная техника. 1967. Вып. 43. С.73-76.
50. Северденко В.П. Формирование текстуры в железной полосе при деформации с наложением ультразвуковых колебаний // Изв. АН СССР. Металлы. 1976. № I. С.79-81.
51. Стрекалов В.П. Оптимизация технологического процесса приклейки ферритов // Спец. электроника. 1980. № I С.96-104.
52. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений. М.: Химия, 1971. 256 с.
53. Базаров Ф.Ф., Колесова Д.С. Клеи в производстве радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1975. 112 с.
54. Кейгл Ч. Клеевые соединения / Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 295 с.
55. Стрекадов В.П. О некоторых особенностях прогнозирования надежности приборов ферритовых СВЧ диапазона. Ферритовые СВЧ приборы и материалы: Материалы XII Всесоюз. науч.-техн. конф. Л.: Связь. 1982. Т.2. С.110-111.
56. Голощапов В.М. Долговечность клеевых и паяных соединений ПФ СВЧ в условиях сохраняемости. Ферритовые СВЧ приборы и материалы: Материалы XII Всесоюз. науч.-технич. конф. Л.: Связь. 1982. Т.2. С.112-114.
57. Пупшис А.А., Баландин М.Ю., Гайдамак Ю.К. Надежность ПФ СВЧ гибридно-интегрального исполнения. Модель изменения работоспособности приборов во времени. Ферритовые СВЧ приборы и материалы Л.: Связь. 1980. Т.2. С.100-102.
58. Стрекалов В.П. Сокращение объемов испытаний ферритовых СВЧ приборов // Электронная техника. 1980. Сер.8. Вып.8 (86). С.13-15.
59. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Пайка металлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.
60. Атанасянц А.М., Пашкина Л.А. Методика определения прочности сцепления металлического покрытия с диэлектриком // Обмен опытом в радиопромышленности. 1978. Вып. II. С. 34-35.

61. Иванов В.И., Карпов М.Н., Шамгин М.Н. К вопросу о расчете резонансных частот элементов конструкций полупроводниковых приборов. Электрон. техника. 1972. Сер.2. № I (65). С.3-10.
62. Прочность, устойчивость, колебания: Справ. / Под общ. ред. И.А.Биргера и Я.Г.Поновко. М.: Машиностроение, 1968. Т.1-3.

Г л а в а 2

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА И МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

2.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПЛАВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

2.1.1. Ультразвуковые эффекты и явления в расплавах

Первые научно-исследовательские работы по применению ультразвука для лужения и пайки алюминия и его сплавов проведены в Германии в 1936 г., а первый ультразвуковой паяльник был запатентован в 1939 г.[1]. Было установлено, что введение ультразвуковых колебаний частотой 18–25 кГц в расплавленный припой разрушает оксидные пленки на поверхности паяемого металла, которая затем быстро смачивается припоем [2]. В СССР ультразвук для пайки и лужения труднопаяемых металлов, таких, как алюминий и его сплавы, был применен Г.И. Апухтиным в 1958 г. В ходе исследований отмечалось, что при воздействии ультразвуковых колебаний в припое возникает явление кавитации, которое вызывает эрозию оксидной пленки на алюминии и растворение ее в припое [3]. В.Ф. Захаров и В.В. Ганрио предложили использовать активацию энергией ультразвуковых колебаний расплавленного припоя для лужения и пайки изделий из керамики, абразивов, ферритов и других неметаллических материалов [4, 5]. Исследования В.В. Ганрио показали, что механические характеристики спаев зависят от параметров ультразвука, наибольшая прочность спая достигалась для установочной пористой керамики на основе стеатита, имеющей развитый микрорельеф поверхности [6, 7].

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.

В 70-х годах в США фундаментальные исследования процесса ультразвуковой пайки провели J.N. Antonevich и G. Denslow. Установлено, что смачивание паяемых материалов находится в прямой зависимости от амплитуды УЗ колебаний и температуры расплава. Для УЗ пайки рекомендованы припои систем Sn–Zn–Pb, Sn–Pb–Cd, Sn–Zn–Cd и др.[8,9].

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 содержания 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 оксидные пленки и загрязнения на паяемой поверхности, которая затем хорошо смачивается припоем. Появляющиеся в кавитационной области микро- и макропотоки уносят частицы оксидов и загрязнений, перемешивают расплав, а микроудары способствуют абразивному воздействию частиц твердой фазы, находящихся в расплаве припоя [10]. 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, главными эффектами, возникающими 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:

$$M = \frac{V}{c} = \frac{2\pi fA}{c} . \quad (2.1)$$

Нелинейные эффекты возникают при значениях числа Маха 10^{-4} – 10^{-3} . Если на частоте 22 кГц амплитуда колебаний составляет 10 мкм, то этого достаточно, чтобы в расплаве припоя возникли микропотоки, а на частоте 44кГц – развитая кавитация (рис. 2.1).

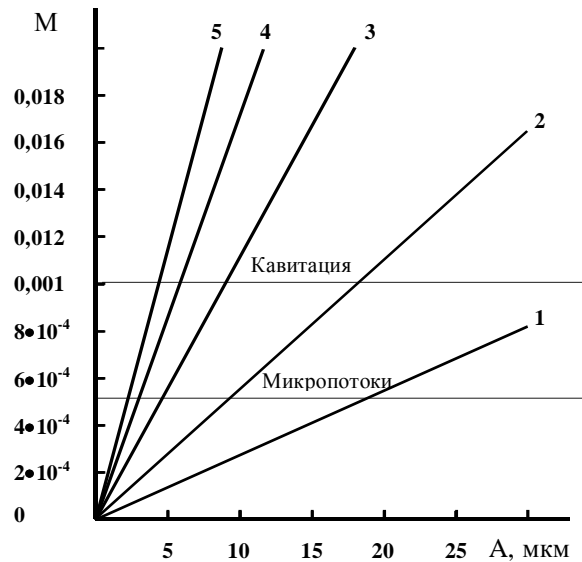


Рис. 2.1. Зависимость числа Маха от амплитуды и частоты колебаний:

1 – 11 кГц, 2 – 22 кГц, 3 – 44 кГц, 4 – 66 кГц, 5 – 88 кГц

В процессе кавитации происходят явления 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. Появление 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 извещенном состоянии. Кроме того, зародыши кавитации могут образовываться на твердой несмачиваемой жидкостью частице, имеющей трещину, заполненную нерастворимым газом (рис. 2.2). 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 [11]

$$P_g - P_n - P_o = -2\sigma/R, \quad (2.2)$$

где P_g – парциальное давление газа в пузырьке; P_n – давление насыщенного пара; P_o – давление в жидкости; σ – поверхностное натяжение на границе жидкость – поверхность частицы.

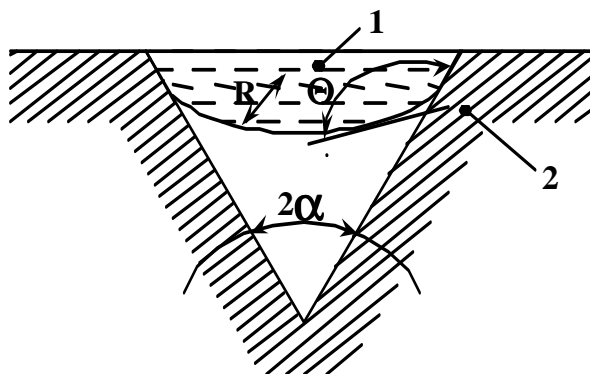


Рис. 2.2. Модель кавитационного зародыша, образовавшегося на несмачиваемой трещине

Если угол смачивания $\theta \geq \pi/2 + \alpha$, 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 $\theta < \pi/2 + \alpha$. 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 броуновское движение частиц во взвешенном состоянии будет преобладающим при их радиусе менее $5 \cdot 10^{-7}$ м [12].

Процесс образования зародышей кавитации на сферических твердых частицах, находящихся во взвешенном состоянии в расплавах металлов, которые не содержат растворенного газа, рассмотрен в работе [13]. 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 увеличивают количество зародышей кавитации в припое.

Для оценки амплитуды акустического давления, необходимого для расширения зародыша до критического радиуса, Блейк применил теорию равновесия. Пусть P_A – амплитуда акустического давления, а P_{LO} – внешнее давление. Тогда полное давление P_L будет иметь максимальное отрицательное значение, когда

$$P_L = -P_A + P_{LO}. \quad (2.3)$$

Поэтому можно написать

$$|P_L - P_n| = P_A - P_{LO} + P_n, \quad (2.4)$$

где P_n – давление пара.

Откуда получаем выражение для критического радиуса

$$R_c = \frac{4\sigma}{3(P_A - P_{LO} + P_n)}. \quad (2.5)$$

До начала звукового облучения равенство давлений на границе раздела зародыша запишем в виде

$$P_L + P_n = P_{LO} + \frac{2\sigma}{R_n}. \quad (2.6)$$

При воздействии УЗ колебания, амплитуду давления увеличивают до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное отрицательное давление, при котором зародыш расширится до своего критического размера. Условием такого расширения является равенство

$$P_n \left(\frac{R_n}{R_c} \right)^3 + P_c = -P_A + P_{LO} + \frac{2\sigma}{R_c}. \quad (2.7)$$

Если исключить из этого равенства R_c , то можно получить выражение для амплитуды акустического давления, необходимого для расширения зародыша радиуса R_n до критического радиуса R_c .

Зародыш радиуса R_n будет расти взрывообразно при увеличении амплитуды акустического явления до порогового значения $P_t^{(1)}$, которое называется порог Блейка:

$$P_t^{(1)} = P_{LO} - P_n + \frac{4\sigma}{3\sqrt{3}R_n} \left[1 + (P_{LO} - P_n) \frac{R_n}{2\sigma} \right]^{-1/2}. \quad (2.8)$$

Присутствие УЗ поля может существенно изменить этот процесс; зародыш, пульсируя под действием звукового поля, может расти за счет диффузии газа из жидкости в полость даже в том случае, когда жидкость не насыщена газом.

Согласно теории Хи – Плессета, существует амплитуда порогового давления $P_t^{(2)}$, при которой зародыш начинает расти за счет выпрямленной диффузии. Если P_A меньше этого порога для данного R_n , то свободный зародыш, растворяясь в результате диффузии, быстро исчезает. Порог $P_t^{(2)}$ Хи – Плессета для выпрямленной диффузии имеет вид

$$P_t^{(2)} = \sqrt{\frac{2}{3}} P_{LO} \left\{ 1 + \frac{2\sigma}{R_n P_{LO}} - \frac{c_\infty}{c_0} \right\}^{1/2}. \quad (2.9)$$

Здесь c_0 – концентрация насыщенного газа при окружающем давлении P_{LO} , а c_∞ – действительная концентрация газа в жидкости на большом расстоянии от зародыша.

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 $P_t^{(1)}$ (порог паровой кавитации Блейка) и $P_t^{(2)}$ (порог Хи – Плессета) для расплавов In, Ga и Fe (рис. 2. 2, кривые 2- 4) при всех значениях R_0 выше, чем

для воды 1, причем для пузырьков с $R_o < 10^{-7}$ м величины $P_t^{(1)}$ могут отличаться в 5–30 раз [13].

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_o величиной поверхностного натяжения σ , значения которого для расплава 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 δ , так и от плотности расплава ρ [14]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_o + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}, \quad (2.10)$$

где R_p – резонансный размер пузырька; γ – показатель политропы, равный 1 для изотермических и 4/3 для адиабатических пульсации полости.

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^{-6} 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 [13].

Движение парогазового пузырька в ультразвуковом поле под действием звукового давления описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка и, в

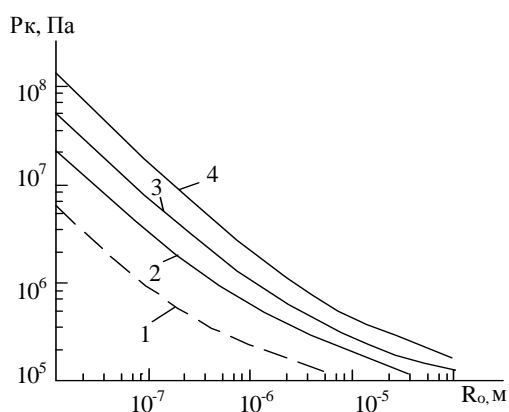


Рис. 2.3. Пороги акустической кавитации в жидкостях и расплавах

частности, уравнением Нолтинга – Непайраса [15]:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2R} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho R} \left\{ P_o - P_a \sin \omega t - \left[\left(P_o - P_{\Pi} + \frac{2\delta}{R_o} \right) \cdot \left(\frac{R_o}{R} \right)^{3\gamma} + P_{\Pi} - \frac{2\sigma}{R} \right] \right\}, \quad (2.11)$$

где R – текущий радиус полости; P_a – амплитуда звукового давления.

В численных расчетах на ПЭВМ IBM PC/AT динамики кавитационной полости для расплавов олова ($\sigma = 0,45$ Н/м) при определении гидростатического давления P_o было учтено давление столба жидкого металла в ультразвуковых ваннах:

$$P_o = P_{амм} + h\rho g, \quad (2.12)$$

где $P_{амм}$ – атмосферное давление, равное 10^5 Па; h – высота столба жидкого металла над излучателем ванны.. Поскольку в расплавленном припое отсутствуют пары воды и других легкоиспаряемых веществ, давление газа внутри пузырька начального радиуса R_o

P_A

ωt

находилось исходя из условия равновесия пузырька [15]:

$$P_{\Gamma} = P_o + 2\sigma/R_o, \quad (2.13)$$

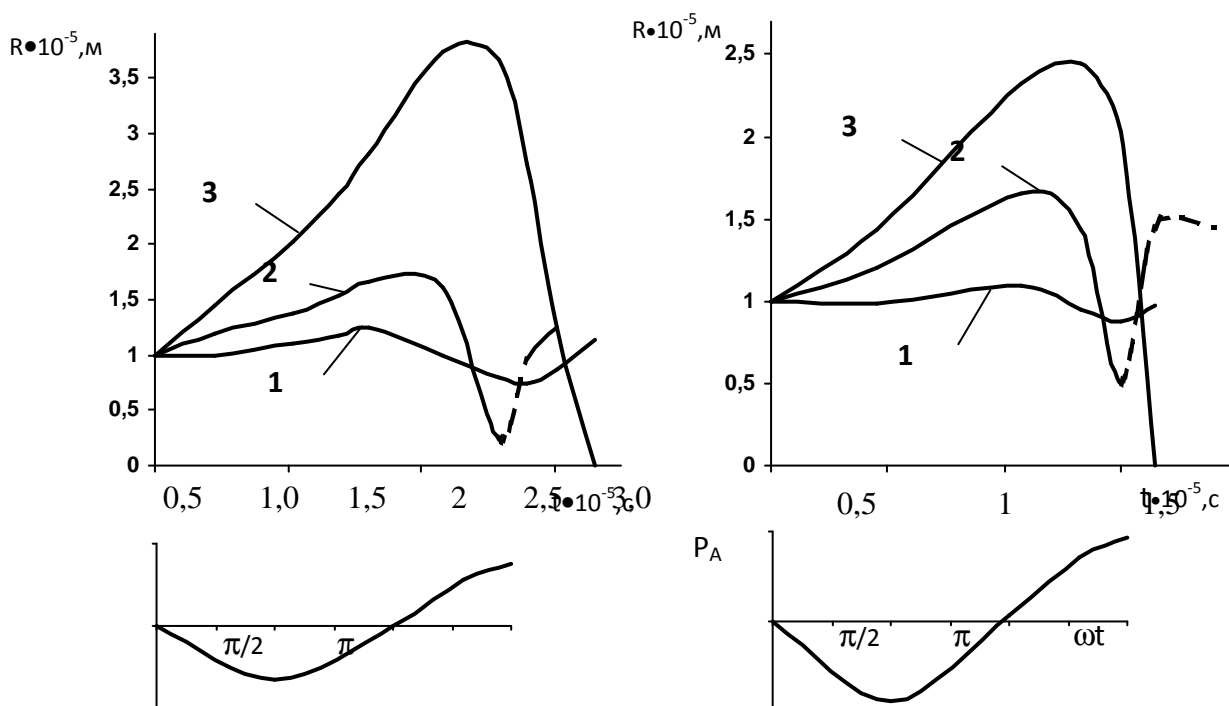
Динамика кавитационных полостей с начальным радиусом 10^{-5} м в расплаве припоя Sn-Zn на частоте 22 кГц при давлении ультразвуковых колебаний $(0,5;1;2) \cdot 10^5$ Па и условии адиабатического сжатия полостей ($\gamma = 4/3$) приведена на рис. 2.4. Расчеты показали, что кавитационные полости с начальными радиусами порядка $1 \cdot 10^{-4}$ м не захлопываются, а пульсируют с незначительным увеличением радиуса при различных частотах и давлении ультразвуковых колебаний. Полости с радиусом $1 \cdot 10^{-5}$ 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 [16].

Таким образом, при одинаковом соотношении количества зародышей кавитации с различными начальными радиусами увеличение частоты ультразвуковых колебаний

Рис. 2.4. Динамика кавитационной полости в расплаве припоя Sn-Zn на частотах 22 (а) и 44(б) кГц: 1-0,5 МПа; 2-0,1 МПа; 3-0,2 МПа.

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. 2.5,



позволяет сделать аналогичное заключение.

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 $R > R_{рез}$.

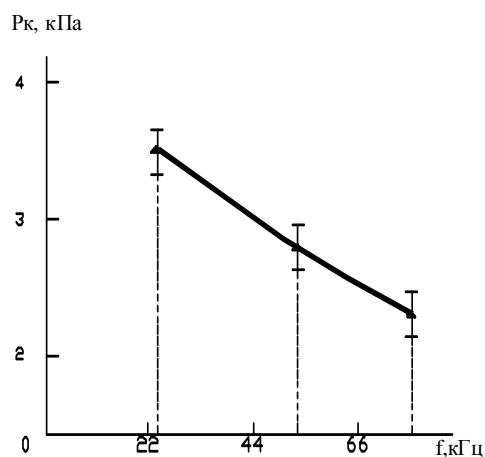


Рис. 2.5. Зависимость локального кавитационного давления в расплаве припоя Sn-Zn от частоты ультразвуковых колебаний

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, а из центра захлопнувшегося пузырька распространится ударная сферическая волна. Максимальное давление, согласно Рэлею, на расстоянии, равном 1,587 радиуса от центра пузырька, составит [14]:

$$P = P_o \frac{R_o^3}{6.35R^3}, \quad (2.13)$$

При $R = 1/10R_o$ и $P_o = 10^5$ Па получаем величину давления вблизи поверхности пузырька, равную 15,75 МПа.

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

$$V = \sqrt{\frac{3P_o}{2\rho} \left[\left(\frac{R_o}{R} \right)^3 - 1 \right]}; t = 0.915R_o \sqrt{\frac{\rho}{P_o}}, \quad (2.14)$$

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 °С и выше) [17].

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

$$T_o R_o^{3(\gamma-1)} = TR^{3(\gamma-1)}, \quad (2.15)$$

где T_o , R_o – соответственно 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 250–300°С, и учитывая, что R может на порядок отличаться от R_o в сторону уменьшения, получаем температуры порядка 2600–3000°С. 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. 2.6). 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 , [18]:

$$I_k = \frac{c(T_{nl} - T_{np})S_{nl}h\rho}{tS}, \quad (2.16)$$

где c – теплоемкость материала, T_{nl} , T_{np} – температуры расплавления материала и припоя, S_{nl} , S – площади расплавленных участков и наблюдений, h – глубина расплавленных участков.

Экспериментально показано, что при использовании в качестве подложки стекла марки К8 с температурой расплавления 630°C площадь расплавленных участков при обработке в течение 3 с составила $0,75 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$, а интенсивность кавитации в припое Sn - Pb – $1,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. На слюде марки СНЧ с температурой расплавления 1400°C 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 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.).

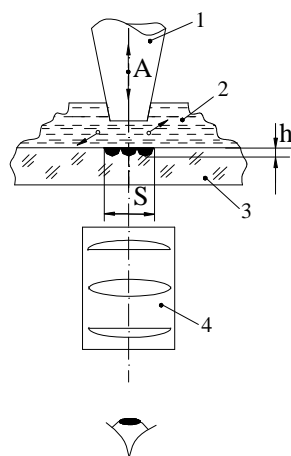


Рис. 2.6. Схема определения термического эффекта кавитации

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 значительно уменьшить наличие и скорость микропотоков на границе расплавленный 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 Sn - Zn 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. 2.7). Изучение возникающих микро- и макропотоков в глицерине осуществлялось под микроскопом МБС-2, в расплаве припоя вблизи границы припоя – поверхность подогреваемого до 220 °С кварцевого сосуда– под микроскопом ММР-2Р [19].

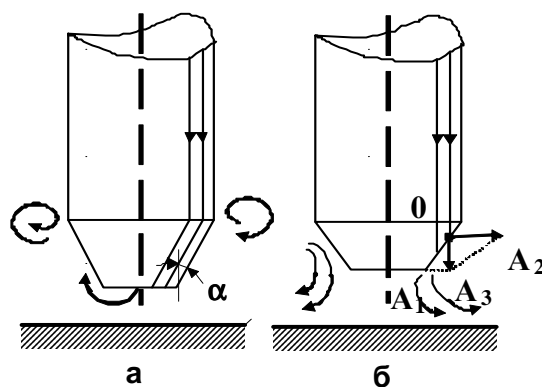


Рис. 2.7. Микропотоки в жидкостях при различной геометрической форме излучающей поверхности

Скорость микро- и макропотоков определялась по движению металлических частиц (алюминиевой пудры) размером около 10 мкм, находящихся во взвешенном состоянии в глицерине и припое. Фотографирование изучаемого макропотока проводилось 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 $\alpha=0-20^\circ$ микропотоки в глицерине и расплаве припоя имели место главным образом у выступов и неровностей излучающей поверхности инструмента и носили вихревой характер (рис. 2.7,а). Образующиеся микропотоки носили

локальный характер, массоперенос у обрабатываемой поверхности отсутствовал. Скорость микропотоков 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 амплитуды колебаний A_2 . В результате равнодействующая векторов A_1 и A_2 – A_3 увлекала частицы жидкости и уносила их в направлении к обрабатываемой поверхности (рис. 2.7, б).

Акустическое число Рейнольдса Re определяет роль нелинейных диссипативных эффектов в процессе распространения ультразвуковой волны в жидкости или расплаве [20]:

$$Re = \rho V l / \eta = V l / \gamma, \quad (2.17)$$

где ρ , η , 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, акустическое число Рейнольдса составляет 40–150 ед. Таким образом, в ультразвуковых макропотоках доминирует влияние вязкости жидкости или расплава и поэтому ультразвуковая волна затухает раньше, чем успевают развиваться 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. Впервые УЗ капиллярный эффект был исследован академиком АН БССР Е.Г.Коноваловым в 1962 г, но только через 10 лет он был зарегистрирован как открытие. Теоретическим и

экспериментальными исследованиями Н.В. Дежкунова, Г.Е. Коновалова был установлен кавитационный механизм УЗ капиллярного эффекта [21,22].

Воздействие ультразвука на жидкость или расплав в капилляре обусловлено в основном захлопыванием кавитационных пузырьков. Так как вследствие потери устойчивости формы кавитационного 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 (рис. 2.8). В работе [23] 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_n и соответственное увеличение потенциальной энергии, а также на работу против сил трения:

$$\Delta E_c = \pi r^2 \Delta h_n \Delta P_n + \frac{\rho V_n^3}{2} S \lambda \frac{H_0}{d} \Delta t_n, \quad (2.18)$$

где V_n – скорость подъема жидкости в капилляре; S , r – площадь поперечного сечения и радиус капилляра; λ – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса, $\lambda = 64/Re$; H_0 – длина столбика жидкости в капилляре; Δt_n – время подъема.

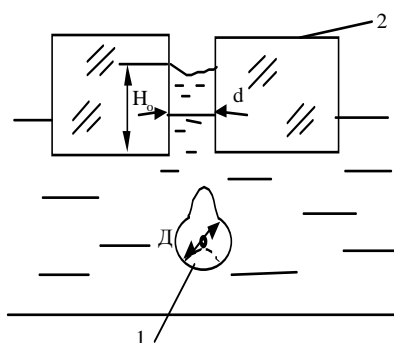


Рис. 2.8. Схема захлопывания кавитационного пузырька 1 у торца капилляра 2

Учитывая то, что $\Delta E_c = 4/3 \pi R_{\max}^3 \rho \omega$, а время вытекания жидкости $\Delta t_b = t_n = T/(V_{ц}N)$, где R_{\max} – максимальный радиус пузырька; T – период колебаний; $V_{ц}$ – объем цилиндра; N –

количество пузырьков в объеме $V_{ц}$, а также то, что параметры $P_a=2 \cdot 10^5$ Па, $R_{max}=10^{-4}$ 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 [24].

Ультразвуковой капиллярный эффект значительно ускоряет процессы пропитки капиллярно-пористых тел и оказывает положительное воздействие на увеличение прочности сцепления припоев с пористыми неметаллическими материалами в процессе ультразвуковой металлизации. В результате применения УЗ колебания в несколько раз сокращают время пропитки и многократную пропитку можно заменить одноразовой при сохранении требуемого качества. За счет УЗ капиллярного эффекта интенсифицируется процесс очистки фильтров, что обеспечивается более глубоким проникновением моющих составов в щелевые зазоры и неровности.

Интенсивность механических колебаний УЗ частоты прямо пропорциональна квадрату амплитуды давления этих колебаний P и обратно пропорциональна волновому сопротивлению среды $\rho \cdot c$:

$$I = \frac{P^2 A}{2 \rho \cdot c}, \quad (2.19)$$

При распространении УЗ колебаний на границе припой-воздух однонаправленное УЗ давление от излучателя создает вспучивание поверхности припоя h . По данным М. Корнфельда при $|x| \leq r$, где x - текущая координата, r - радиус пучка ультразвука, давление компенсируется массой поднятой жидкости и давлением, вызванным искривлением поверхности. При $|x| > r$ давление колебаний близко к нулю, а масса поднятой жидкости компенсируется давлением, вызванным искривлением поверхности [25].

В этих двух случаях справедливы, следовательно, уравнения

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho g z = p, \quad (2.20)$$

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho g z = 0, \quad (2.21)$$

где σ , ρ – поверхностное натяжение и плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, R_1 , R_2 – главные радиусы кривизны поверхности, x , z – текущие координаты точки на поверхности жидкости.

Высоту подъема жидкости, т.е. значение z при $x = 0$ можно найти по формуле:

$$h = \frac{\rho r^2}{\sigma} \cdot \frac{1 - \alpha r K_1(\alpha r)}{\alpha^2 r^2}, \quad (2.22)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}}, \quad (2.23)$$

$K_1(\alpha r)$ – Бесселева функция мнимого аргумента.

Однако при этом не учитывается влияние расстояния от излучателя и природа жидкости, так как расплав припоя обладает значительно большей плотностью и вязкостью.

Высоту подъема припоя h (рис. 2.9) при УЗ активации можно определить из условия равенства энергий: колебаний E_k , потенциальной $E_{\text{п}}$ микроволны, поверхностного натяжения припоя $E_{\text{н}}$ на поверхности раздела.

$$E_k = E_{\text{п}} + E_{\text{н}}. \quad (2.24)$$

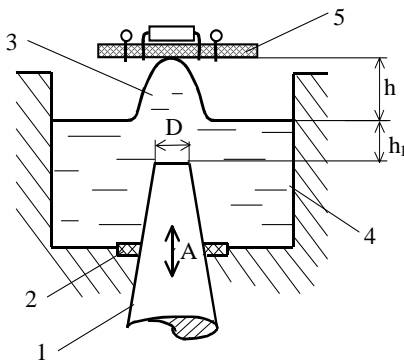


Рис. 2.9. Образование микроволны припоя:

1 - концентратор, 2 - акустическая развязка, 3 - микроволна, 4 - ванна,

5 – электронная сборка

Потенциальная энергия E_{π} складывается из энергии массы припоя в ванне и микроволны:

$$E_{\pi} = \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot g \cdot h_1 / 4 + \pi \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot h / 6 = \pi \cdot \rho \cdot g \left(\frac{D^2 h_1}{4} + \frac{h^2}{6} \right), \quad (2.25)$$

где m – масса, h_1 – уровень припоя, D – диаметр столба припоя в ванночке.

Поверхностное натяжение действует по границе поверхности ванны диаметром D :

$$E_{\sigma} = \sigma \cdot S = \sigma \cdot \pi \cdot D^2 / 4, \quad (2.26)$$

Подставляя (2.24) и (2.25) в уравнение (2.23) получаем

$$2\pi^2 \rho \cdot f^2 A^2 S = \pi \cdot \rho \cdot g \left(\frac{D^2 h_1}{4} + \frac{h^2}{6} \right) + \sigma \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (2.27)$$

Преобразуя (2.26) получаем:

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} D \cdot \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot f^2 \cdot A^2}{g} - \frac{\sigma}{g \cdot \rho} - h_1}, \quad (2.28)$$

Для припоя ПОС 61 с известной плотностью и поверхностным натяжением при амплитуде 10 мкм, на частоте 22 кГц подъём припоя составляет 7,5 мм, на частоте 44 кГц - 10 мм. Теоретически рассчитанная величина несколько больше экспериментальных значений, что можно объяснить тем, что в физической модели учитывается лишь поверхностное натяжение припоя, а не оксидной плёнки на его поверхности. Микроволна припоя может использоваться для пайки миниатюрных электронных сборок [26].

Часть энергии, которая переносится УЗ волнами, поглощается средой и амплитуда звукового давления уменьшается по закону [27]:

$$\Delta P_d = \Delta P_o e^{-\frac{d}{d_e}}, \quad (2.29)$$

где ΔP_0 – амплитуда давления входящих в среду волн, ΔP_d – амплитуда после прохождения расстояния d , d_e – расстояние, на котором амплитуда давления уменьшается в e раз.

В связи с тем, что коэффициент поглощения незначителен $5.5 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2/\text{м}$, а расстояние распространения волны также мало, то потерями УЗ энергии при практических расчетах можно пренебречь.

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

2.1.2. Удаление оксидных пленок и интенсификация процесса смачивания

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными 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. Оксидные 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 оксидные пленки снова начинают расти, особенно при нагреве на воздухе. Процесс окисления определяется химическим сродством металла к кислороду, температурой и длительностью нагрева. Удаление оксидных пленок при пайке с поверхности металлов и сплавов без флюса может быть осуществлено путем диссоциации оксидов 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 [28]

$$K_p = \frac{P_{Me}^n P_{O_2}^{m/2}}{P_{Me_nO_m}}, \quad (2.30)$$

где K_p – константа равновесия; P_{Me} , P_{O_2} , $P_{Me_nO_m}$ – соответственно давление паров металла, кислорода и оксида, уменьшение парциального давления кислорода в газовой среде и увеличение температуры смещают равновесие в сторону диссоциации оксида. Таким образом, достигается полное разложение оксидов металла при пайке в нейтральных газовых средах и вакууме.

Анализ зависимостей давления диссоциации оксидов от температуры и парциального давления кислорода показывает, что обеспечить условия диссоциации оксидов многих металлов не представляется возможным ввиду необходимости необычно низкого парциального давления кислорода, которое при температуре 1150°C для железа и хрома составляет $10^{-8} - 10^{-13}$ Па, марганца – 10^{-6} , титана – 10^{-19} и для алюминия – 10^{-25} Па [29]. 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 оксидной пленки с поверхности основного металла и припоя происходит в результате восстановления оксидов 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 [28].

Сущность механического способа удаления оксидных 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 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 оксидных пленок используют также припои 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 оксидной 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 оксидной пленки – низкая производительность процесса, неравномерность толщины слоя лужения, наличие необлуженных мест ввиду трудности контроля процесса разрушения пленки, загрязнение припоя частицами абразива.

Наиболее важны процессы бесфлюсовой пайки при сборке электронных 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, снижаются надежность и долговечность электронной аппаратуры. При пайке микрополосковых устройств, кремниевых кристаллов полупроводниковых приборов к неметаллизированным керамическим подложкам предложено удалять оксидной 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 [30, 31].

Схема данного способа показана на рис. 2.10. 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 оксидные пленки на паяемых поверхностях 4 разрушаются. Процесс пайки осуществляется без флюсов в интервале температур 130–610°С в течение 30–60 с. Прочность паяных соединений при этом достаточно высокая и превышает значения, полученные в случае пайки в среде защитных газов [32]. К недостаткам метода притирки следует отнести длительность процесса (до 60 с 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 оксидных 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 оксидных пленок вызывается высокими местными давлениями (порядка 10^5 МПа), возникающими вблизи захлопывающихся кавитационных пузырьков.

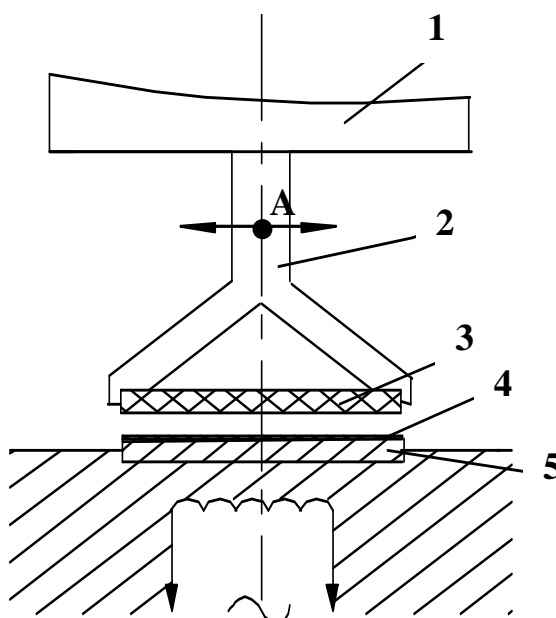


Рис. 2.10. Схема пайки способом притирки паяемых поверхностей

Схематично разрушение оксидной пленки 1 на поверхности алюминия 3 показано на рис. 2.11. 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 оксидной пленки при ультразвуковом лужении определяется ее раскалыванием и

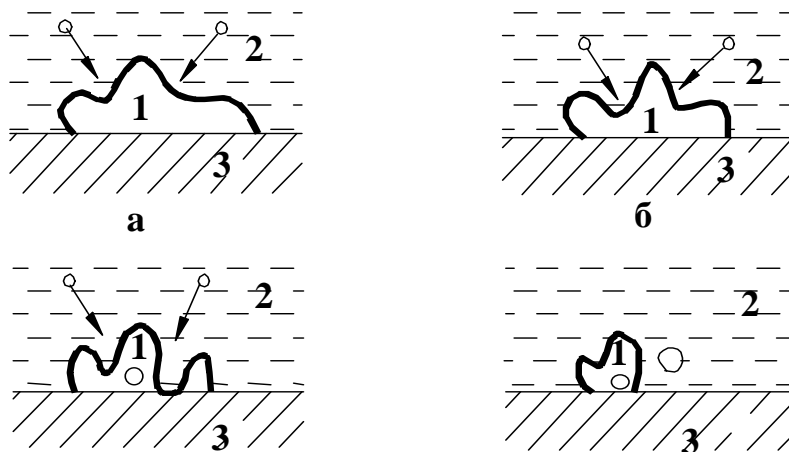


Рис. 2.11. Последовательность разрушения оксидных пленок при кавитации (а–г)

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 сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободные кусочки пленки отрываются от поверхности (рис. 2.12, б). Если прочность пленки превосходит силы сцепления, то вся пленка отслаивается от поверхности (рис. 2.12, а).

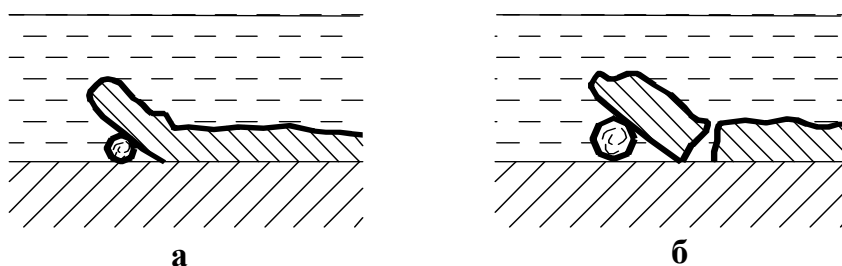


Рис. 2.12. Схема отслоения пленки пульсирующим кавитационным пузырьком

Схема процесса ультразвукового лужения металлов с помощью излучателя, перемещаемого вдоль облуживаемой поверхности, показана на рис. 2.13. 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 оксидную 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.

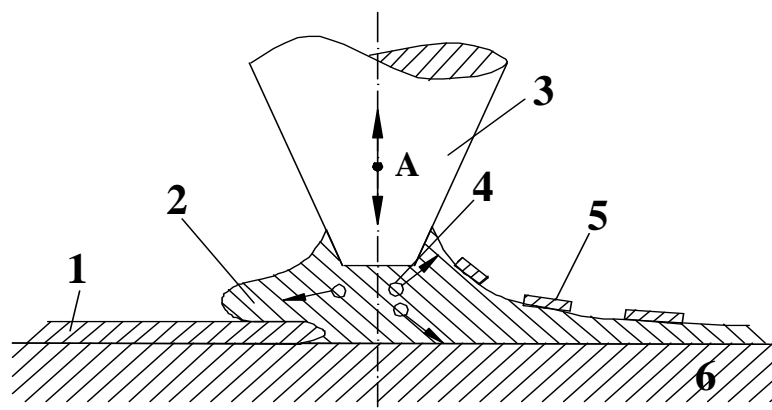


Рис. 2.13. Схема процесса ультразвукового лужения металлов

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 [28]: $K = \Delta V_{\text{ср}} \rho N / M$, где M , ρ – масса и плотность образца; $\Delta V_{\text{ср}}$ – средний объем металла, удаленного при лужении. Глубина эрозии возрастает с увеличением температуры и для алюминиевых сплавов при температурах порядка 260°C 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 $20\text{--}50\%$, микропорошка ферротитана $4\text{--}7\%$. Продолжительность лужения составляет $5\text{--}40$ с при интенсивности ультразвука $(2\text{--}8) \cdot 10^4$ Вт/см². Температурный режим лужения алюминия для некоторых припоев приведен в табл. 2.1.[28].

Таблица 2.1

Температура ультразвукового лужения алюминия

| Тип припоя | Вид абразива | Температура лужения, °C | Тип припоя | Вид абразива | Температура лужения, °C |
|------------|--------------|-------------------------|------------|--------------|-------------------------|
| Олово | 4–5% | 140–280 | П250 | Первичные | 180–260 |
| П150А | Первичные | 153-163 | П350 | Первичные | 300-320 |
| П200А | 4–5% | 180-260 | | | |

Кавитационное давление, измеренное с помощью кавитометра, также зависит от

процентного содержания цинка в припое (рис. 2.14). 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 [33].

В процессе ультразвукового лужения часть энергии трансформируется в теплоту и затрачивается на нагрев припоя, что создает эффект увеличения температуры расплава припоя Sn–Zn (рис. 2.15). Этот эффект в большей степени проявляется при длительном озвучивании припоя и увеличении процентного содержания цинка в расплаве. Таким образом, кавитация и вторичные эффекты ультразвука интенсифицируют процесс смачивания расплавом припоя поверхности твердого тела, сопровождающегося понижением угла смачивания и увеличением коэффициента растекания.

Образование паяного соединения предполагает сближение взаимодействующих сред до расстояний межатомного взаимодействия, которое осуществляется на этапе смачивания расплавом припоя паяемой поверхности. Смачивание, являясь одним из важнейших факторов, определяющих адгезионную прочность спая, представляет особый вид взаимодействия жидкой и твердой сред и описывается уравнением Лапласа

$$\cos\Theta = (\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}) / \sigma_{1,2} \quad (2.31)$$

Из уравнения (2.31) 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 (2.31) 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.

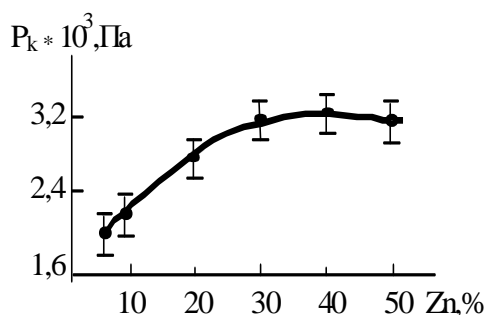


Рис. 2.14. Зависимость кавитационного давления в расплаве припоя от содержания цинка

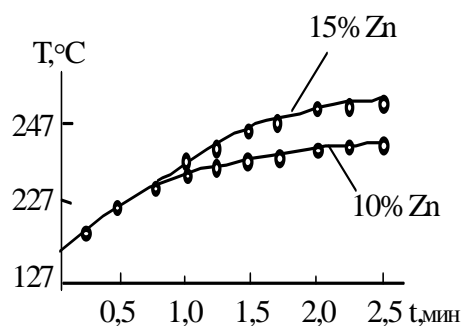


Рис. 2.15. Зависимости температуры расплавов припоев от времени воздействия ультразвука

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

$$A_{адг} - A_{ког} = \sigma_{1,2}(\cos\Theta - 1), \quad (2.32)$$

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 $\sigma_{1,2}$, $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{2,3}$ – соответственно поверхностные натяжения на границах припой – газ, газ – твердое тело, припой – твердое тело. Таким образом, для растекания припоя необходимо, чтобы $\sigma_{1,3} > \sigma_{1,2}\cos\Theta + \sigma_{2,3}$, что 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 1300–1400°C 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 1200°C [34]. В то же время возбуждение ультразвуковых колебаний в припое практически мгновенно обеспечивает снижение угла смачивания и растекание капли припоя по поверхности подложки. Изучение динамики ультразвукового смачивания высокоскоростной киносъемкой показало, что продолжительность процесса смачивания составляет менее 0,02 с [35].

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 поверхностное 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 [36] $E=4\pi ze /R^2$, где e – заряд электрона, равный $1,6\cdot 10^{19}$ Кл. Умножая E на толщину конденсатора, равную R , (R – расстояние между положительными ионами), определяем искомую разность потенциалов

$$\Phi=4\pi ze/R, \quad (2.33)$$

Полагая 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.

Учитывая, что энергия плоского конденсатора равна:

$$W = \epsilon_0 \epsilon_0 U^2 S / 2d, \quad (2.34)$$

где: U – разность потенциалов, S – площадь смачиваемой поверхности, d – толщина оксидной плёнки, то поверхностное натяжение электростатических сил, как энергия отнесенной к площади для $\epsilon \leq 6-7$, составит примерно $1,5\cdot 10^{-3}$ Н/м, что значительно меньше величины поверхностного натяжения припоя. Для эффективного смачивания необходима высокая разность потенциалов, однако вследствие повреждения тонкой оксидной плёнки в УЗ поле обеспечить это невозможно.

Другие гипотезы теоретически и экспериментально доказывают, что при введении ультразвуковых колебаний тангенциальная составляющая колебательного движения σ_t 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 снижается краевой угол смачивания и улучшается

процесс растекания припоя по паяемой поверхности [37]. Поверхностное натяжение в этом случае может быть записано в виде $\sigma = \sigma_0 - \sigma_T$. Величина σ_T 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 оксидных пленок с нее, то при пайке неметаллических материалов применение флюсов неэффективно, так как не только паяемая поверхность, но и вся масса материала представляет собой оксидный 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 $125\text{--}130^\circ$ [38]. Смачивание пьезокерамики начинается при 1000°C и краевой угол при этом составляет $88\text{--}90^\circ$ [39].

Введение ультразвуковых колебаний в систему расплавленный припой 3– паяемый неметаллический материал 2 с помощью волноводного излучателя 1 (рис. 2.16), 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 (рис. 2.17), показывает, что энергия взаимодействия W для исследованных припоев Sn – Zn 2 и системы Pb – Sn–Zn–In 1 [33] увеличивается примерно в 5 раз при оптимальной величине кавитационного давления в

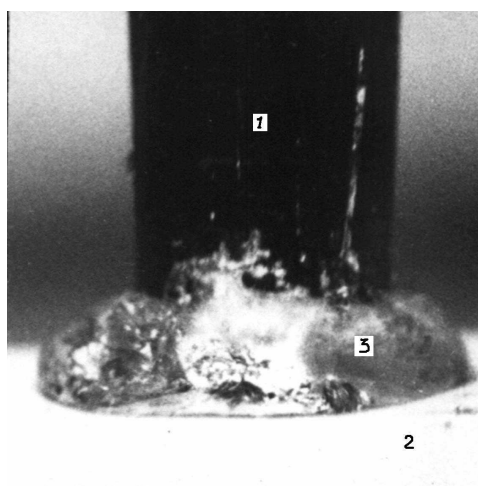


Рис. 2.16. Смачивание поверхности припоем при ультразвуковой активации

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).

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 [40]. 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.

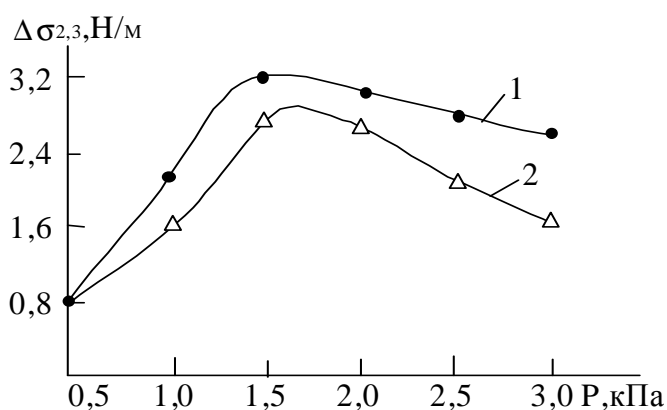


Рис. 2.17. Зависимости поверхностного натяжения на границе припой – стеклокерамика от кавитационного давления

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 $W = \sigma_{l,2}(1 + \cos\Theta)$, 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 100°C на основе сплава Вуда с добавками металлов Li, Zn, Ga, Ge, In, Pb, Bi, Cd установлено, что температурный порог ультразвукового лужения находится в пределах $240\text{--}280^\circ\text{C}$. При увеличении мощности ультразвуковых колебаний порог лужения снижается до температуры плавления припоя [41].

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 – 320°C [42].

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 200°C , а оптимальные значения прочности сцепления припоя Pb – Sn – Zn – In со стеклокерамикой 18–19 МПа достигаются в интервале температур $250\text{--}270^\circ\text{C}$ и времени 5–7 с., а для припоя П200А - при температуре $320 \pm 20^\circ\text{C}$ [43]. Помимо температурного порога, процесс ультразвуковой металлизации характеризуется определенным временным интервалом, зависящим от инерционности процессов физико-химического взаимодействия между припоем и паяемым материалом.

2.1.3. Диффузия и химическое взаимодействие расплавов с паяемыми материалами

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 [29]

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (2.35)$$

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 (2.35) примет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \quad (2.36)$$

Коэффициент диффузии зависит от температуры T [29]:

$$D = D_0 \exp(-Q / RT), \quad (2.37)$$

где D_0 – коэффициент, определяемый типом кристаллической решетки; Q – энергия активации диффузии.

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

$$v = BF, \quad (2.38)$$

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

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial x} + vC. \quad (2.39)$$

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, не превышает 0,05 м/с, в то время как в водных растворах она равна 1,5–2,0 м/с [14]. Микропотоки способствуют протеканию процессов массообмена в диффузионном слое, особенно на границе расплав – твердое тело, а макропотоки – во всем объеме жидкой фазы припоя [44]. 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 [45]:

$$Z = D \int_s \frac{\partial B}{\partial N} \partial S. \quad (2.40)$$

Интенсивность диффузии зависит от произведения частоты на амплитуду колебаний, возбуждаемых в расплаве, что вызывает нарушение 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 снижением внутреннего трения и диссипацией акустической энергии в жидком припое с последующей ее трансформацией в теплоту [46].

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 [47]. Аналогичные исследования показали, что наиболее эффективное измельчение зерна в процессе кристаллизации припоев происходит у припоя П250А, содержащего 20% Zn и имеющего широкий интервал кристаллизации [48].

Измельчение первичных кристаллов в расплаве припоя приводит к увеличению коэффициента диффузии в соответствии с уравнением [49]

$$D = \frac{1}{3} (A_H^2 W_H + A_B^2 W_B) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (2.41)$$

где A_H , A_B – амплитуды вынужденных колебаний в жидкости соответственно 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.

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 [50].

Исследование переходной зоны между припоем и неметаллическим материалом может быть проведено с помощью различных методов анализа, включая металлографический, оптический, рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный, электронно-микроскопический и др. Структурно–логическая схема исследований переходной зоны "металлизированный слой – материал" с указанием разрешающей способности каждого метода в мкм приведена на рис. 2.18. 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. 2.19). При этом суммарная емкость образца и его тангенс угла диэлектрических потерь определяются так [50]:

$$C = \frac{C_A C_B}{C_A + C_B}, \quad (2.42)$$

$$tg \delta = \frac{C_B tg \delta_A + C_A tg \delta_B}{C_A + C_B}, \quad (2.43)$$

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

С уменьшением толщины металлизированного образца C_B и $tg \delta$ увеличиваются, а C_A уменьшается. Увеличения ширины переходной зоны и соответственно потерь в зоне приводят к значительному повышению $tg \delta_A$, а следовательно, и $tg \delta$ всего образца.

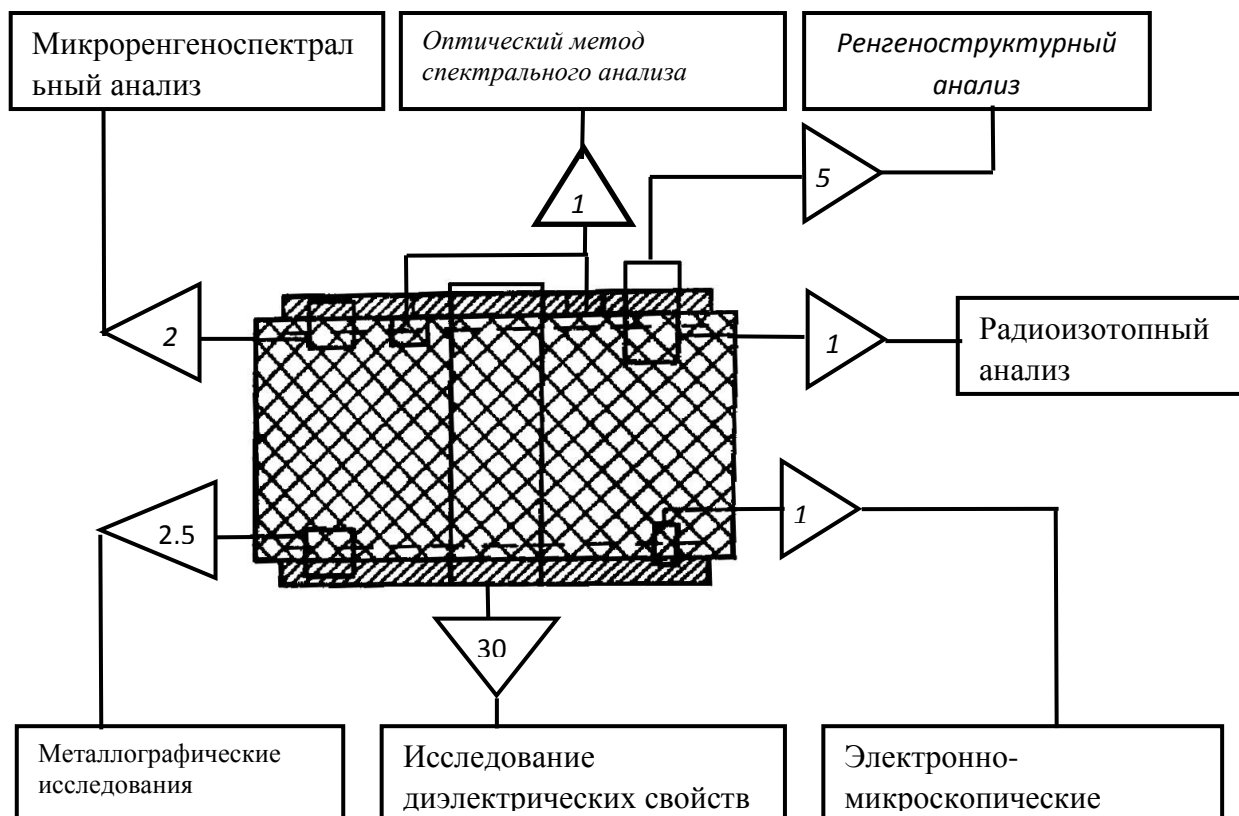


Рис 2.18. Структурно-логическая схема исследований переходной зоны в металлизированных диэлектриках

Поскольку механическим сошлифовыванием и последующей металлизацией удастся получить толщину образца порядка 300–350 мкм, разрешающая способность этого метода невысока.

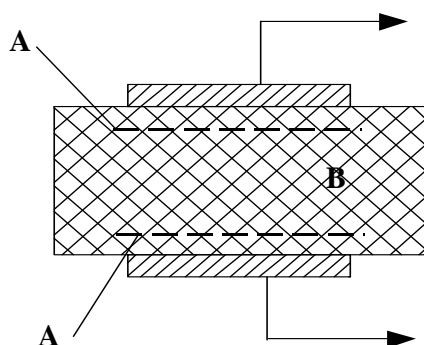


Рис. 2.19. Расположение слоев в металлизированном диэлектрике

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, МИИ-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 дает возможность 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 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 дифрактометров типа ДРОН-2 с остророфокусированным рентгеновским излучением повышает разрешающую способность метода до 40–50 мкм.

Анализ зоны спая радиоактивными изотопами (авторадиографический контроль) основан на явлении искусственной радиоактивности. Этот метод позволяет фиксировать радиоактивное излучение изотопов некоторых компонентов припоя, например Fe⁵⁹, Zn⁶⁵, 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 проводят 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 [51]:

$$C_{обр}^A / C_{эт}^A = (I_{обр}^A / I_{эт}^A)_0, \quad (2.44)$$

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. Растровый электронный микроскоп Stereoskan-360 (Англия) с микроанализатором AN-1000 позволяет анализировать поверхности размером от 1 мкм² до 0,5 мм².

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. Электронные микроскопы просвечивающего типа ЭМ5, УЭМБ-100, ЭММА-2 обеспечивают увеличение до 10 000 раз, а Н-800 (Япония) – до 50 000 раз.

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 ВаТiО₃ 40 мкм, для керамики (Pb_{0,60}Ва_{0,40})Nb₂O₆–10 мкм. Проникновение металла в пьезокерамику происходит за счет межкристаллитной диффузии. При анализе проб, взятых с поверхности керамики ВаТiО₃, обнаружен Ti, с ЦТС-19 – Ti и Zn [52].

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 [53].

Рентгеноструктурный анализ показал наличие фазы $Zn_2 SiO_4$ в системе ЦТБС–3 – припой и $ZnTiO_4$ 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 оксидами, 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 оксидов SiO_2 , BaO , PbO , включая добавки оксидов Na_2O , K_2O , TiO_2 , а также керамические материалы Т-80, Т-150, Т-260 на основе оксидов $SrTiO_2$, $CaTiO_3$ и TiO_2 [54]. Ультразвуковую металлизацию стеклокерамических образцов осуществляли на лабораторной установке при температуре $270 \pm 5^\circ C$, 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 $Pb-Sn-Zn-In$ с температурой плавления $180^\circ C$ [55]. Исследования переходной зоны между припоем и стеклокерамикой проводили методами измерения тангенса угла диэлектрических потерь, металлографического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов [56].

Для определения тангенса угла диэлектрических потерь образцы из стеклокерамики шлифовали 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 рассчитывали по формуле [57]:

$$tg \delta = \frac{C_2(Q_2 - Q_1)}{Q_1 Q_2 (C_2 - C_1)}, \quad (2.45)$$

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

Анализ полученных экспериментальных данных (табл. 2.2), показывает, что с уменьшением толщины стеклокерамических образцов их емкость изменилась незначительно (на 15%), в то время как $tg \delta$ 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 на микроскопе МИМ–8, показал (рис. 2.20, а), что в спае вдоль поверхности стеклокерамики наблюдается тонкая темная зона оксидных соединений, образовавшихся в пограничном слое припоя 1, примыкающем к поверхности стеклокерамики 3. На фотографии микрошлифа спая отчетливо заметно смачивание части-

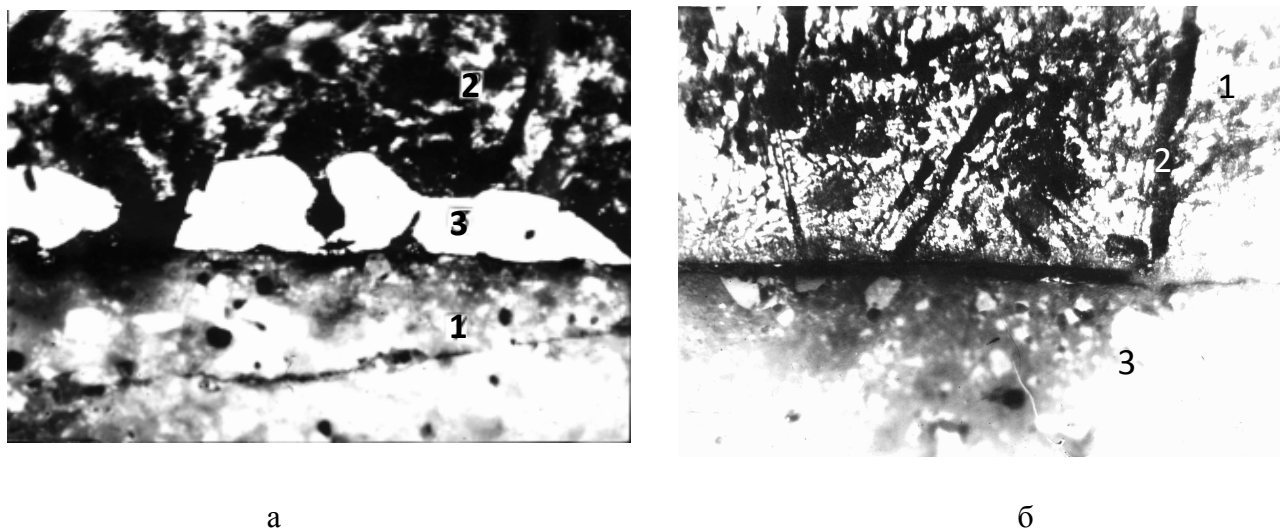


Рис.2.20. Микроструктуры соединений стеклокерамики с припоями: Pb–Sn–Zn–In (а) и Sn–Zn (б).

цами 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 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.

**Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь
металлизированных образцов стеклокерамики**

| Номер 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 показали (рис. 2.20, б), 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 [58]. 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, образовании стекловидных областей, располагающихся вблизи границы с припоем (рис. 2.20, а).

Анализ металлокерамического спая с целью определения состава стеклофазы в керамике, объемов стекла и пустот в зависимости от расстояния до межфазной границы металлируемой керамики на основе Al_2O_3 показал, что возле металлируемой зоны наблюдаются 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 [59].

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 оксидами 2PbOSiO_2 и 2BaOSiO_2 , а также уменьшенная интенсивность рефлексов оксида SiO_2 по сравнению с оксидами PbO и BaO . Это указывает на физико-химическое взаимодействие окислов, составляющих аморфную фазу

стеклокерамики, в процессе спекания стеклокерамической массы при 700–750°C. Анализ припоев в исходном состоянии, применяемых для ультразвуковой металлизации, показал наличие в них окислов цинка ZnO , образовавшихся в процессе приготовления припоя, а именно при растворении цинка в свинцово-оловянистой массе припоя [58].

На рентгенограммах спаев отмечены рефлексы, соответствующие сложным оксидным соединениям $Pb_2ZnSi_2O_7$ и $BaZnSiO_4$, в то же время относительная интенсивность рефлексов двойных оксидов $2PbOSiO_2$ и $2BaOSiO_2$ была уменьшена по сравнению с интенсивностью, наблюдаемой на рентгенограмме исходного материала (рис. 2.21). Это подтверждает факт

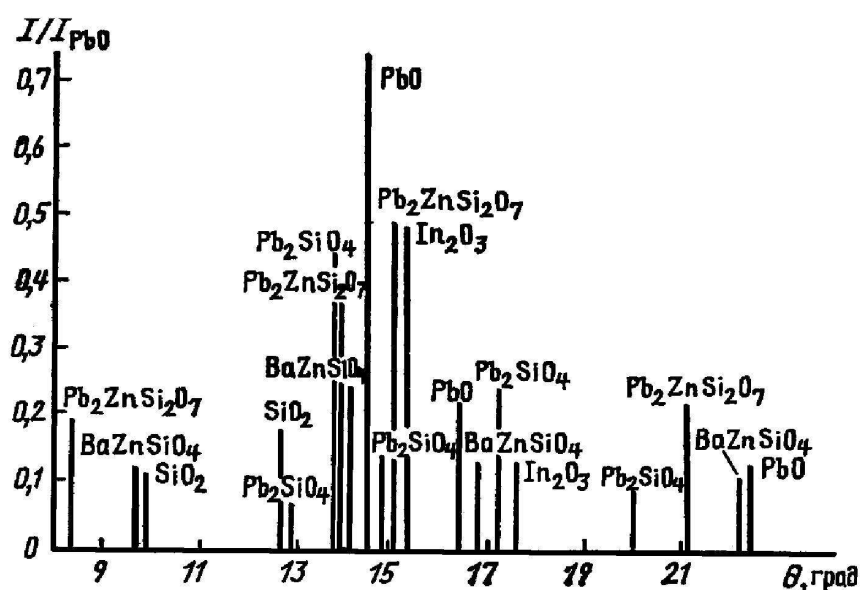


Рис. 2.21 Относительная интенсивность рентгеновских рефлексов некоторых оксидов аморфной фазы стеклокерамики и оксидных соединений в спае

химического взаимодействия между компонентами припоя, а именно Zn , с одной стороны, и оксидами 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 растворовом электронном микроскопе MINI–SEM с увеличением в 700 раз (рис. 2.22), размеры зоны сложных оксидных соединений, образовавшихся в припое вблизи границы со стеклокерамикой, не превышают 3 мкм.

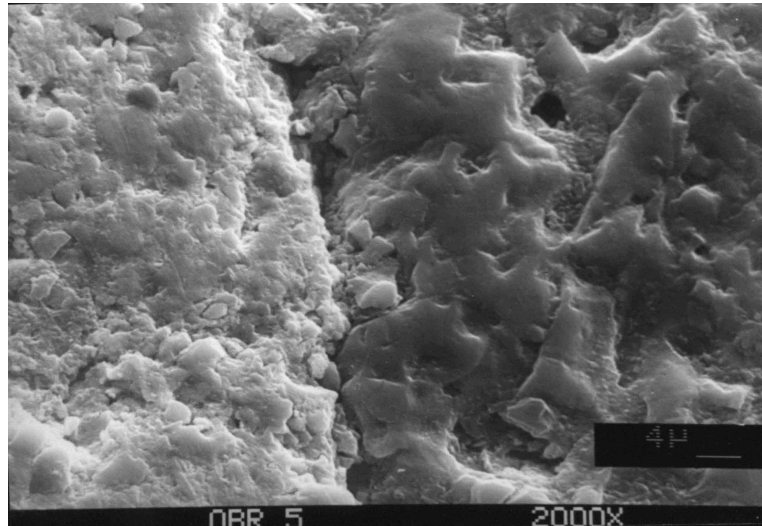


Рис. 2.22. Переходная зона на границе припой – стеклокерамика

Таким образом, металлографические, электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования позволяют достаточно глубоко исследовать структуру и химический состав переходной зоны в спаях с керамическими и стеклокерамическими материалами.

2.2 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАЙКИ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

2.2.1 Оборудование и инструменты для ультразвуковой 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 [14]. 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 [10]. 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 использовании ручного ультразвукового паяльника в процессах пайки и металлизации [60]: невозможно определить оптимальную величину удельной акустической мощности, вводимой в расплав; отсутствует точный контроль времени металлизации; трудно поддержать наиболее эффективный угол наклона излучателя к паяемой поверхности в процессе работы. Эти недостатки вызывают значительный разброс в свойствах паяных

соединений, а именно в 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. 2.23) [61]: ультразвукового генератора с излучателем магнитострикционного 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 Т-41/1. Нагреватели деталей и инструмента снабжены системой контроля, регулирования и стабилизации температуры с точностью $\pm 1\%$. Применение разработанной

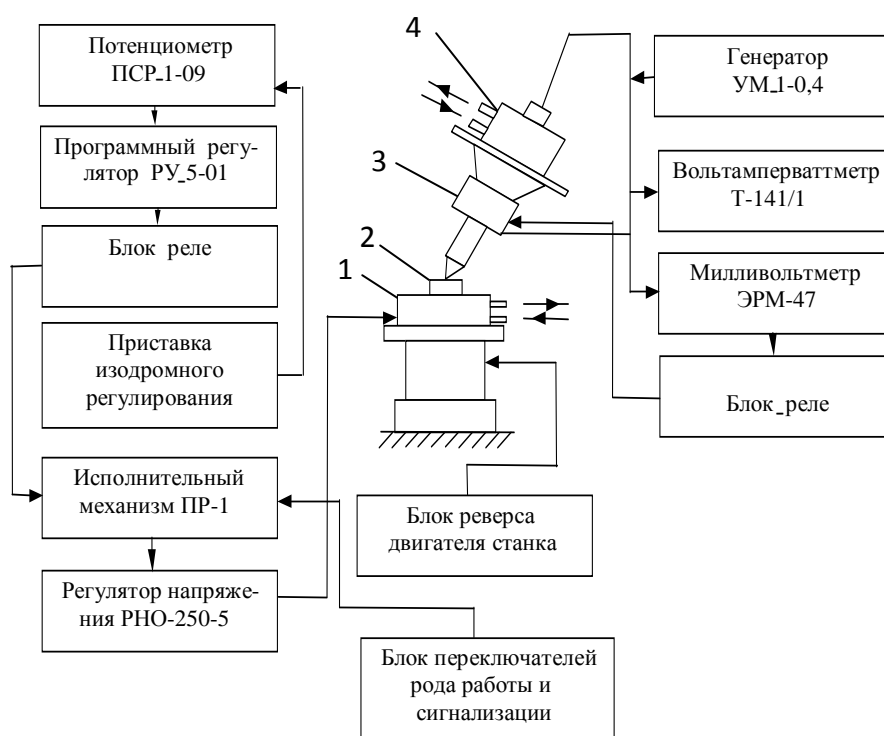
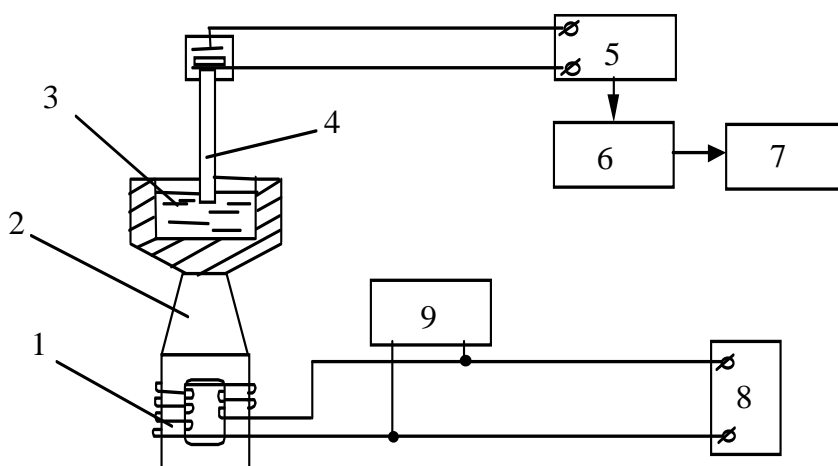


Рис. 2.23 Схема установки ультразвуковой металлизации УММ-1

установки позволило определить и поддерживать оптимальные параметры процесса

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

Увеличение эффективности отделения оксидной 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 [62]. 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. 2.24) [63]. От генератора ультразвука 8 и источника подмагничивания 9 на магнитострикционный 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. 2.24. 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. Из рис.2.25 видно, что в расплаве возникают две области состояния жидкого припоя: докавитационная I и кавитационная II. 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 $(2-8) \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$. 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.

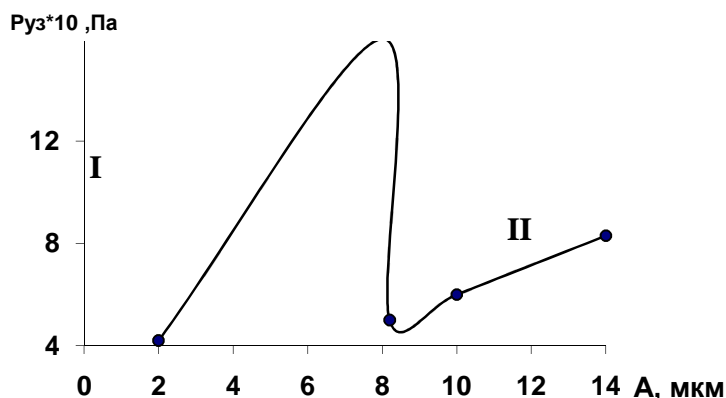


Рис. 2.25. Зависимость ультразвукового давления в расплаве припоя от амплитуды колебаний

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 обеспечиваются 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 [64]. 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. 2.26 скорость смачивания медных плат при температуре припоя 250°C 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.

На рис. 2.26 показано также 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 250°C. Наложение ультразвуковых колебаний в процессе пайки с флюсом позволяет увеличивать скорость смачивания в 1,5–2,0 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

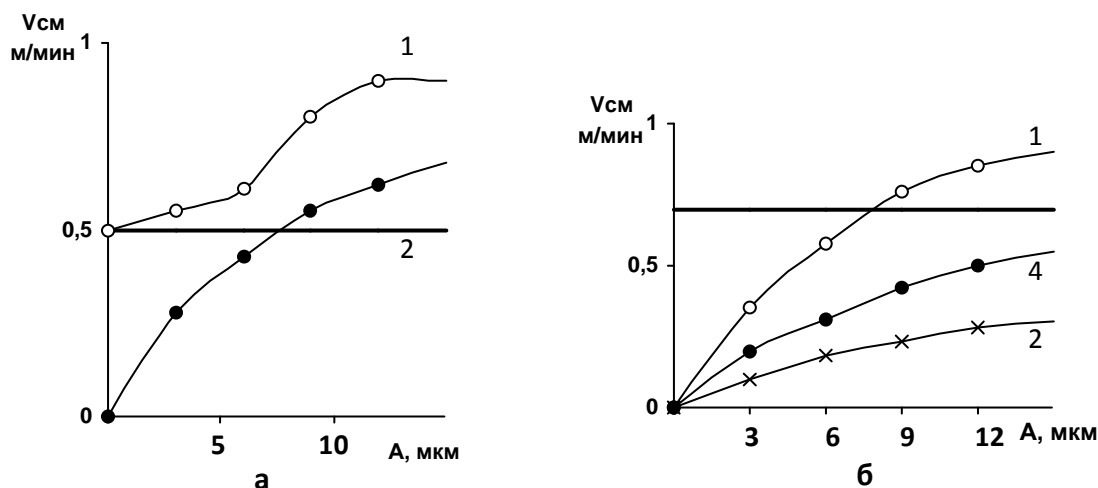


Рис. 2.26. Зависимость скорости смачивания плат: *а* – от амплитуды ультразвуковых колебаний (1 – с флюсом; 2 – без флюса; 3 – без ультразвука); *б* – при различных расстояниях плат от излучателя (1 – 1,5 мм; 2 – 3,0; 3 – 4,5 мм; 4 – с флюсом)

поверхности печатных плат покрываются легкопаяемыми покрытиями (горячее лужение, покрытие припоем ПОСВ33 и т. д.), используются водорастворимые флюсы, отличающиеся большей активностью, чем спиртоканифольный, применение способа ограничено.

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 [65].

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 [66].

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 оксиды создают демпферный слой, поглощающий определенную долю ультразвуковых колебаний, в результате чего качество лужения снижается. Удаление шлакового демпферного слоя скребком и повторное залуживание стенок увеличивают трудоемкость процесса лужения и приводят к повышенному расходу припоя. В работе [67] 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 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 °С, что равносильно повышению температуры припоя на 20–30 °С. Это позволяет

снизить температуру лужения до 200°C, благодаря чему значительно облегчается защита припоя от окисления. Полная защита расплавленного припоя от окисления достигается созданием защитной среды в зоне лужения, например аргона. 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 % [68].

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 М30ЗК, термопары ХК и силового реле типа МКУ [69]. 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. 2.27, а). Интенсивность кавитации достигает максимального значения на дне ванны и нелинейно

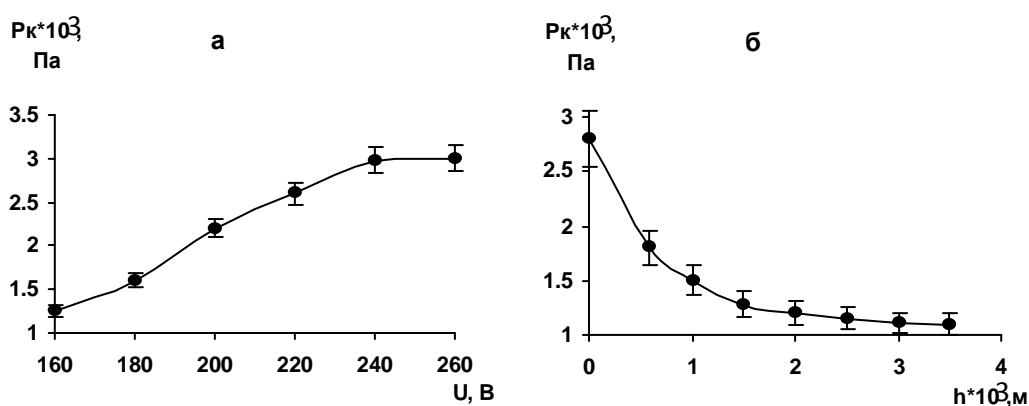


Рис. 2.27. Зависимость интенсивности кавитации в расплаве припоя от напряжения на выходе генератора (а) и расстояния до дна ванны (б)

падает при увеличении расстояния h от дна, являющегося мембраной преобразователя (рис. 2.27, 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.

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 Рэлея, Лэмба, Лява, Сезава, Стоуна 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 магнитострикционные пленки [70].

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 $1/4 \lambda$. 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 [71].

В схеме ультразвуковой бесфлюсовой пайки плат к основанию корпуса микросборки (рис. 2.28) 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

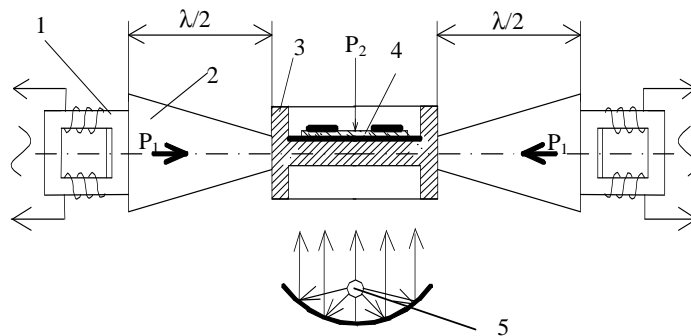


Рис. 2.28. Схема ультразвуковой бесфлюсовой пайки микроплат

магнитострикционных преобразователей 1, соединенных последовательно. Преобразователи настраивались на резонансную частоту 21,3 кГц с помощью 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.

Степень смачиваемости, как отношение площади платы, покрытой припоем $S_{\text{пр}}$ к исходной 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) [72]. 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 50 В 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

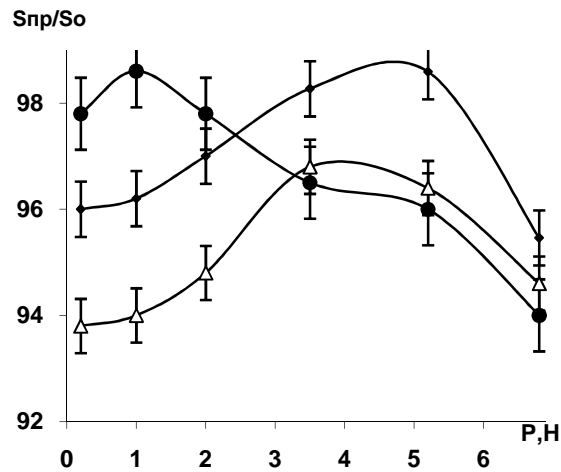


Рис.2.29. Зависимости степени смачиваемости подложек припоем от усилия прижима их к корпусу микросборки: 1 – покрытие олово – висмут, припой ПОС61; 2 – припой ПОИ50; 3 – покрытие золотом, припой ПОС61

воздействии ультразвуковых колебаний в течение 15 с 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 оксидных пленок. Оптимальное усилие прижима микрополосковых плат к основанию корпуса составило для припоя ПОС61 3–5 Н в интервале температур процесса пайки 220–240 °С, для припоя ПОИ 50 1–2 Н при 160–180 °С (рис. 2.29). 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.

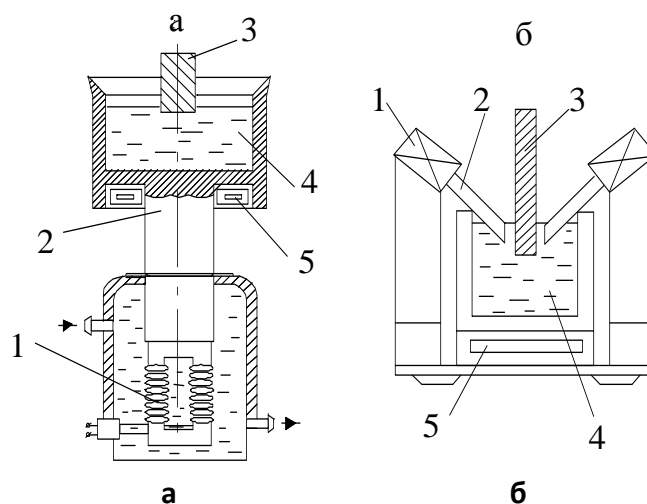
Генерирование упругих механических колебаний ультразвуковой частоты в технологических установках, предназначенных для ультразвуковой пайки, может осуществляться магнитострикционными, пьезокерамическими или ферритовыми преобразователями. Для использования в процессах ультразвуковой пайки и лужения преобразователи 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 [73]: с возбуждением всей массы припоя в ванне (рис. 2.30, а) и локальным воздействием ультразвука на ограниченный объем жидкого припоя (рис. 2.30, б). При первом способе

Рис. 2.30. Ультразвуковые ванны 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

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.



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 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 отечественных (УП-21, УП-42) и зарубежных фирм "Milliard" (Англия) были рассчитаны на питание от ультразвуковых генераторов с выходной мощностью, не превышающей 50 Вт. Паяльники имели низкую акустическую

мощность, перегревались при высокотемпературной металлизации (450—700 °С), вследствие чего снижался коэффициент магнитострикции преобразователей [74].

В СССР в 70-х годах выпускались ультразвуковые паяльники УЗП2-0,025 и ванны лужения УЗВЛ-0,4; УЗВЛ-1, источником ультразвуковой энергии для которых служил генератор типа УЗГ3-0,4 с максимальной выходной мощностью 400 Вт. Характеристики ультразвукового серийно выпускаемого технологического оснащения в сравнении с ранее выпускавшимися моделями [75] приведены в табл. 2.3, характеристики ультразвуковых генераторов – в табл. 2.4. Рабочее место УЗ пайки с помощью паяльника показано на рис 2.31.



Рис.2.31 Рабочее место УЗ пайки паяльником

В процессе практического использования паяльников типа УЗП2-0.025 выявлены такие недостатки, как нестабильность режима работы, неэффективность воздушного охлаждения, малая мощность нагревателя, низкая производительность ручного труда. Ваннам лужения УЗВЛ-0,4 присущи также недостатки: низкая интенсивность колебаний, что приводит к наличию необлуженных мест; ограниченные размеры рабочей поверхности припоя; загрязнение ванны оксидами припоя и шлака; наличие водяного охлаждения преобразователя. Температуру нагрева преобразователя в ультразвуковых паяльниках снижают путем снабжения волновода воздушным радиатором [76], профилирования пластин преобразователя и сборки в пакет с заданным воздушным зазором [77], а также расположения ребер охлаждения на волноводе вдоль образующей [78].

Таблица 2.3

Технологическое оснащение для ультразвуковой пайки и металлизации

| Модель | Частота, кГц | Мощность, Вт | | Габаритные размеры, мм |
|------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| | | нагревателя | потребляемая | |
| Паяльники | | | | |
| УП-21 | 23—26 | 70—120 | 100—150 | 260x230x45 |
| УЗП-1 | 22 | -- | 250 | 370x170x50 |
| Ванны | | | | |
| УП-40 | 22 | 1000 | 1500 | 430x360x220 |
| УЗВА-1 | 18-25 | 300 | 800 | 360x360x480 |
| УЗУЛ-1М | 23-25 | 300 | 500 | 200x300x250 |

Таблица 2.4

Ультразвуковые генераторы

| Тип | Конструктивные особенности, исполнение, нагрузка | Мощность, кВт | Рабочая частота, кГц | Цена, (у.е) |
|---------------|--|---------------|----------------------|-------------|
| УЗГ1-0,063/22 | АПЧ,ПП | 0,063 | 22 | 95 |
| УЗГ2-0,063 | АПЧ,ИА,ПП | | | 150 |
| УЗГ13-0,1/22 | АПЧ,АСА,ИА,ПРМ,ПП | 0,1 | | 275 |
| УЗГ14-0,16/22 | АПЧ,ИА,СРМ,ПП | | | 200 |
| УЗГ7-0,25/22 | | 0,25 | | 675 |
| УЗГ7-0,4/44 | АПЧ,АСА,ИА,ПРМ, ВПО,МП,ИП | 0,4 | | 1500 |
| УЗГ8-0,4/22 | АПЧ,ИА,СРМ,МП,ИП | | | 665 |

| | | | | |
|--|------------------------------|------|----|-------|
| УЗГЗ-1,0/22 | | 0,1 | | 1200 |
| УЗГ15-1,6/22 | АПЧ,АСА,ИА,ПРМ,ВПО, МП,ИП | 1,6 | | 2000 |
| УЗГ16-1,6/22М | АПЧ,ИА,СРМ,ВПО,МП,ИП | | | 1400 |
| УЗГ16-1,6/22П | АПЧ,ИА,СРМ,ВПО,ПП | | | 1300 |
| УЗГ5-4,0/16 | ИА,СРМ,ВПО,МП,ИП | 4,0 | 16 | 4000 |
| УЗГ4-25,0/16 | ВО,ВПО,МП,ИП | 25,0 | | 11000 |
| Примечание: АПЧ – автоматическая подстройка частоты; АСА – автоматическая стабилизация амплитуды; ИА – индикатор амплитуды; ПРМ – плавная регулировка мощности; СРМ – ступенчатая регулировка мощности; ВО – водяное охлаждение; ВПО – воздушное принудительное охлаждение; ПП – пьезокерамический преобразователь; МП – магнитострикционный преобразователь; ИП – источник тока подмагничивания | | | | |

Стабильность режимов работы магнитострикционных преобразователей в ультразвуковом технологическом оборудовании повышают автоматической подстройкой генератора сигналом, снимаемым со вспомогательной обмотки в сочетании с дополнительным переманчиванием преобразователя на инфразвуковой частоте в диапазоне 0,01—200 Гц [79]. 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 [80].

Весьма важно при ультразвуковой пайке правильное дозирование припоя. С этой целью разработан ряд конструкций паяльников с дозированием припоя. На рис. 2.32 изображена схема ультразвукового паяльника с дозирующим устройством, использующим ультразвуко-

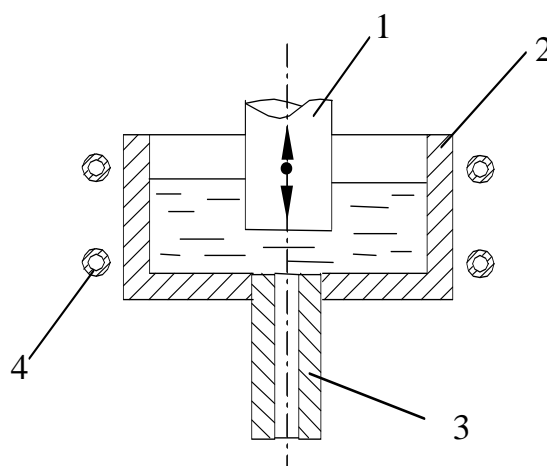


Рис. 2.32. Ультразвуковой паяльник с дозирующим устройством: 1 – излучатель ультразвука; 2 – камера для припоя; 3 – капиллярная трубка; 4 –нагреватель

вой 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 [81]. 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.

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. 2.33). 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 [82]. 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.

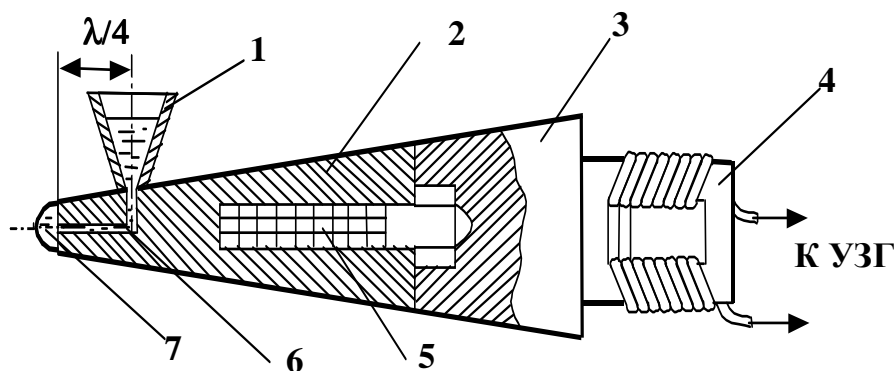


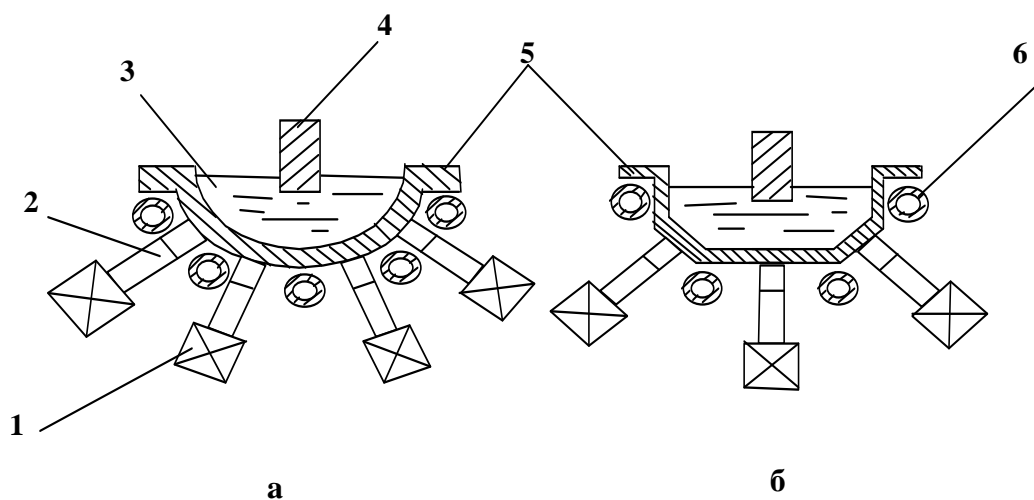
Рис. 2.33. Ультразвуковой паяльник с дозирующей подачей припоя: 1 – дозирующая емкость; 2 – волновод; 3 – согласующий элемент; 4 – ультразвуковой преобразователь; 5 – нагреватель; 6 – капиллярные отверстия; 7 – рабочий наконечник

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 магнестрикционного 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 магнестрикционного преобразователя осуществлялось вентилятором мощностью 3,5 Вт, обеспечивающим скорость воздушного потока 2 м/с [69].

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 330°C 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 имеют ультразвуковые ванны с круглым и фасонным профилем дна (рис. 2.34). Такие ванны позволяют применять большое количество преобразователей (до 48 шт.) и 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 [83].



6

Рис. 2.34. Ультразвуковые ванны лужения с круглым (а) и фасонным (б) профилем дна: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – волновод; 3 – жидкий припой; 4 – изделие; 5 – корпус ванны; б - 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. 2.35). В свободном конце пластинчатого волновода в отверстии закреплен трубчатый излучатель ультразвука 1, погруженный в припой. Таким образом, возбуждаемые продольные ультразвуковые колебания посредством волноводов 3- 5 преобразуются в поперечные колебания трубчатого излучателя, в результате чего активируется объем припоя внутри излучателя, где и происходит лужение деталей 2 [84].

В работе [85] описан способ пайки, в котором 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 [86].

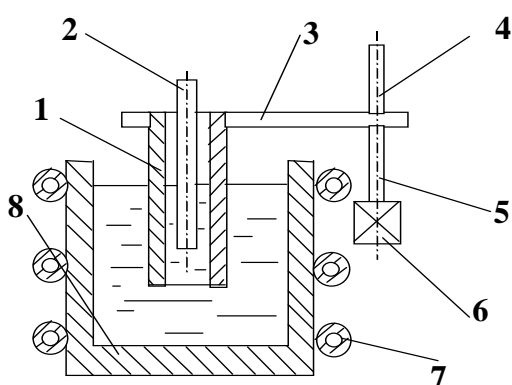


Рис. 2.35. Устройство УЗ лужения длинномерных изделий: 1 – трубчатый излучатель;

2 – изделие; 3-5 – волноводы; 6 – преобразователь; 7 – нагреватель; 8 – ванна

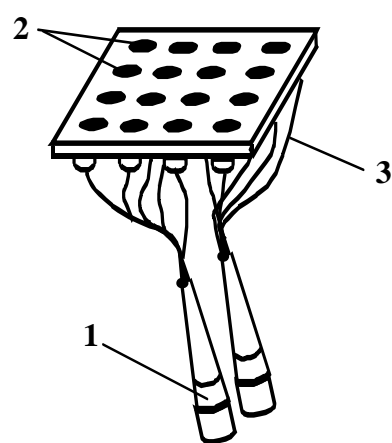


Рис.2.36. Сотовая ультразвуковая ванна для пайки и лужения миниатюрных изделий:

1 - преобразователи; 2 – паяльные тигли; 3 –

Сотовая паяльная ванна состоит из двух преобразователей 1 и большого количества (до 25 шт.) маленьких паяльных тиглей 2 емкостью 200—250 мл. Ультразвуковые колебания передаются к днищам тиглей по гибким волноводам 3 (рис. 2.36). Такая конструкция применяется при пайке и лужении малогабаритных деталей [83].

В процессе ультразвуковой активации расплавленный припой подвергается повышенному окислению, в результате чего на его поверхности образуется пленка оксидов, 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 [87], либо подают инертный или восстановительный газ на поверхность припоя [88]. Помещая ультразвуковой волновод и ванну 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 [89].

Точное позиционирование наконечника ультразвукового инструмента на объекте пайки осуществляют с помощью 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 [90].

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 [91].

Эффект подъема припоя по излучающей поверхности волновода использован при разработке устройства для УЗ лужения стеклокерамических конденсаторов без их погружения в расплав припоя. Устройство (рис. 2.37) [92] содержит две ультразвуковые колебательные системы, состоящие из магнитострикционных преобразователей 1, акустических трансформаторов упругих колебаний 2, волноводов 3, рабочие концы которые

имеют Г-образную форму и опущены в ванну 4, с расплавленным припоем 5. Колебательные системы установлены на основаниях, имеющих возможность точного горизонтального перемещения. Для расплавления припоя и поддержания необходимой температуры пайки использован резистивный нагреватель 6. Г-образные концы волноводов колеблются в полуволновом резонансе, что приводит к появлению двух пучностей и узла колебаний. При колебании рабочего конца волновода на припой действует гидродинамическая сила, направленная перпендикулярно рабочей плоскости конца. Под действием её вертикальной составляющей припой поднимается до уровня верхней пучности, где удерживается за счёт адгезии. Таким образом, зона верхней пучности, расположенная выше уровня припоя в ванне, является рабочей, чем и обеспечивается возможность автоматизации процесса лужения.

Разработана и внедрена в серийное производство полуавтоматическая установка ультразвукового лужения торцов заготовок стеклокерамических конденсаторов с электродами из алюминиевой фольги. Изделия подаются в зону лужения с помощью ротора с зажимами со скоростью 5-100 мм/с. В качестве источников УЗ-колебаний использованы два генератора типа УЗГ3-0,4. В акустических системах устройства применены магнитострикционные преобразователи с резонансной частотой 44 ± 1 кГц. Лужение изделий производится припоем П300К Sn – 15%, Zn – 65%, Cd-20% при следующих параметрах: температура припоя 430-470°C, напряжение на выходе генератора 20-30 В, скорость лужения 40-60 мм/с. Внедрение устройства позволило полностью механизировать операцию лужения и обеспечить высокий процент выхода годных изделий.

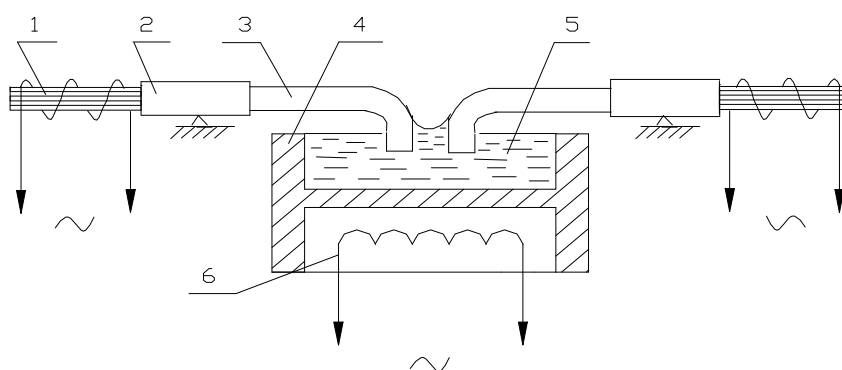


Рис. 2.37. Устройство УЗ пакетов стеклокерамических конденсаторов

Анализ современных устройств для ультразвуковой пайки и металлизации показывает, что они еще не обеспечивают высокой производительности процессов, которая

необходима при серийном или массовом типах производства изделий радиоэлектроники. В большинстве конструкций устройств используются магнитострикционные преобразователи, имеющие значительные потери и габариты, и требующие принудительного охлаждения. Перспективным направлением при разработке ультразвукового технологического оборудования является использование пьезоэлектрических преобразователей, питаемых от широкодиапазонных генераторов колебаний. Высокого качества пайки и металлизации можно достигнуть, лишь обеспечив высокую интенсивность и равномерность кавитации в рабочем объеме, а также надежные средства для измерения параметров ультразвукового воздействия.

2.2.2. Устройства металлизации неметаллических 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. 2.5). Механическая прочность соединений, полученных ультразвуковой пайкой, почти в 2 раза превышала прочность соединений, полученных обычной пайкой по слою серебра, нанесенного вжиганием [93].

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 0,5–5,0 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.

Исследование механической прочности ультразвуковых спаев различных типов припоев с установочной керамикой свидетельствует о том, что выбор припоя для металлизации играет важную роль (табл. 2.6) [7]. Как показал анализ, только применение оловянно-цинковых припоев обеспечивает получение достаточной прочности спаев с керамикой. Для стеатитовой керамики прочность сцепления металлизации припоями ПОС30, ПОС61 и П250А зависит от степени шероховатости поверхности керамики (рис. 2.38). Наибольшая прочность спаев, которая составила 17,9 МПа, была достигнута для шероховатых поверхностей, подвергнутых дробеструйной обработке и металлизированных припоем П250А, по сравнению с обычными необработанными поверхностями, что в 2,0–2,5 раза выше прочности сцепления серебряных покрытий с керамикой (рис.2.38) [94].

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 размером 20×20 мм и толщиной 0,2–0,25 мм проводилось на частотах 22 и 44 кГц с использованием ультразвуковых ванн 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 УЗ колебаний-- 3–5 мкм, величина зазора между излучателем и металлируемой поверхностью-- 0,2–0,4 мм, угол наклона излучателя -40–55°, скорость металлизации 830 мм/мин, температура металлизации на 5–10°С 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 [95].

Таблица 2.5

Прочность паяных соединений неметаллических материалов

| Материал соединения | Припой | Вид паяного соединения | Предел прочности при растяжении, | Место разрыва |
|---------------------|--------|------------------------|----------------------------------|---------------|
|---------------------|--------|------------------------|----------------------------------|---------------|

| | | | | |
|---------------------|-------|----------|-----------|----------------|
| Керамика – керамика | П200А | Встык | 7,8–11,7 | По месту пайки |
| | П200А | Внахлест | 9,3–12,7 | По керамике |
| | ПСр3 | | 10,8–13,7 | |
| Керамика – стекло | П200А | Встык | 2,9–4,1 | По месту пайки |
| | П200А | Внахлест | 5,6–7,4 | По стеклу |

Таблица 2.6

Механическая прочность ультразвуковых спаев керамики

| Тип припоя | Температура плавления, °С | Температура металлизации, °С | Прочность, 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 |

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 [96].

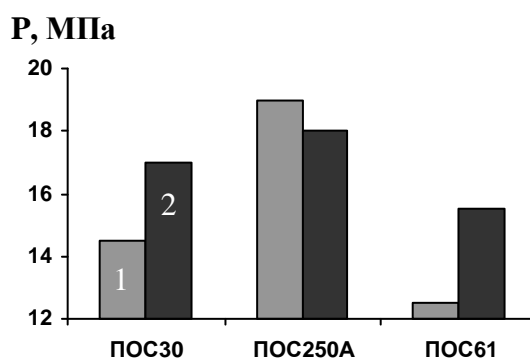


Рис. 2.38. Прочность спаев с керамикой для необработанных (1)

и шероховатых (2) поверхностей

Ввиду ряда недостатков, присущих методу металлизации с использованием ручного ультразвукового паяльника, разработана специальная ультразвуковая установка металлизации пьезокерамики УМП-1, состоящая из следующих основных элементов [97]: ультразвукового генератора УЗГ-2,5А; механизма перемещения кассеты, в качестве которого использовалась станина со столом от горизонтально-фрезерного станка; магнитострикционного преобразователя типа ПМС-7 с концентратором и сменным инструментом; электрического нагревателя с системой терморегулирования в диапазоне температур 200–300°С с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$; кассеты для размещения пьезокерамических деталей различных типоразмеров; 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 BaTiO_3 это проникновение достигает 40 мкм. В переходной области отмечено образование новых фаз за счет химического взаимодействия цинка с компонентами пьезокерамики [52].

В результате рентгеноструктурного анализа переходной области спая с пьезокерамикой установлено, что в системах керамики ТБК-3 и ЦТБС-3 присутствуют оксиды 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 [53].

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 [98].

Для повышения адгезии к керамическим материалам и увеличения прочности сцепления с ними разработан припой состава Pb-Sn-Zn-In, в котором добавка индия увеличивает смачивающую способность при воздействии ультразвуковых материалов [99].

В работе [99] 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 магнитострикционных преобразователей: продольных колебаний с частотой 44 кГц (рис.2.39,*а*), поперечных 41 кГц (рис.2.39,*б*), крутильных 22 кГц (рис.2.39,*в*), импульсных продольных колебаний со скважностью 2–6 (рис.2.39,*г*). Источником питания преобразователей служил ультразвуковой генератор УЗГЗ-0,4 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.

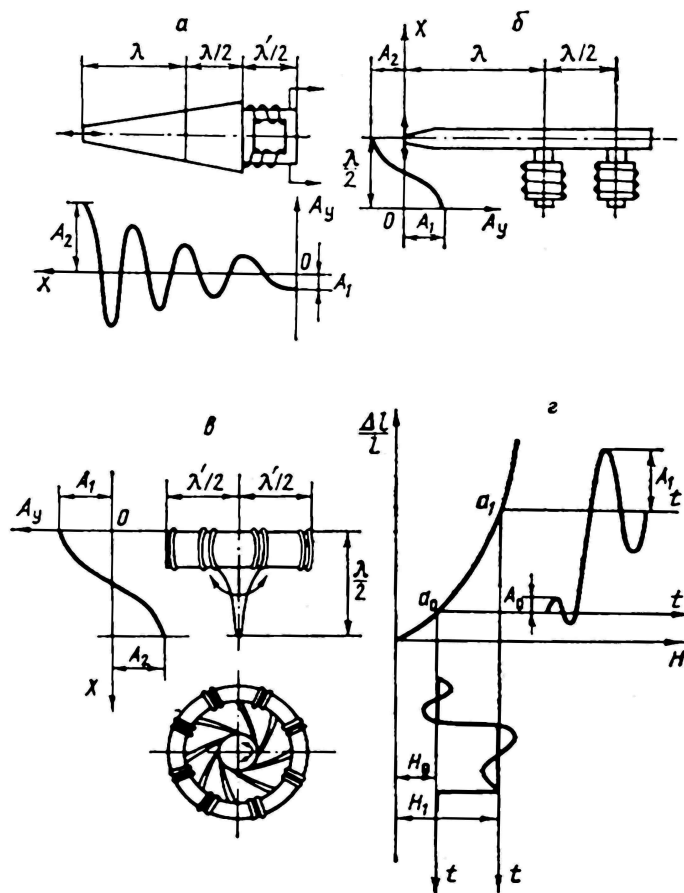


Рис. 2.39 Схема возбуждения ультразвуковых колебаний в припое

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 специальным генератором. Для увеличения постоянной составляющей тока подмагничивания был использован дополнительный источник постоянного тока типа ВСА-10 (рис. 2.40).

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 [100]. 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 измерительным 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.

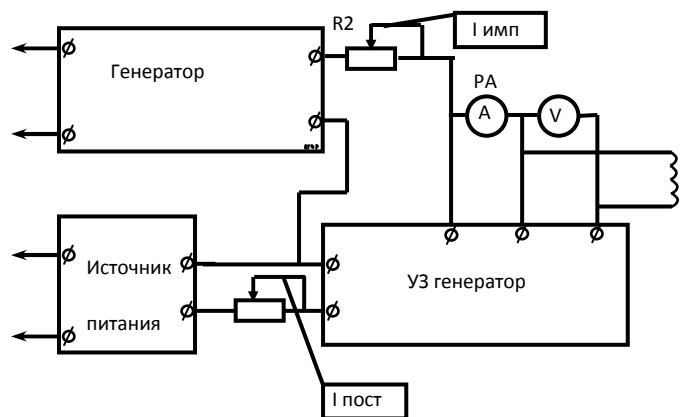


Рис.2.40. Схема возбуждения импульсных колебаний

Уровни кавитационного давления в припое системы Pb–Sn–Zn–In при различных видах ультразвуковых колебаний, вводимых в тонкий слой припоя размером 0,1 мм между излучателем и измерительным щупом, приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Кавитационное давление в расплаве припоя для различных видов колебаний

| Вид колебаний | Частота, кГц | Амплитуда колебаний, мкм | Кавитационное давление •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 |

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 кН/мин и основное -8,8 кН/мин.

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

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. Металлизируемые 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 [101].

В результате исследований были определены максимальная адгезионная прочность металлизации с указанными типами сополимеров (табл. 2.8), а также оптимальные технологические параметры процесса металлизации: электрическая мощность на выходе генератора P_d , 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 соединений с полимером наибольшая (рис. 2.41).

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 оксидами 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 спая незначительна и определяется сугубо силами адгезионного взаимодействия. Из табл. 2.9 видно, 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.

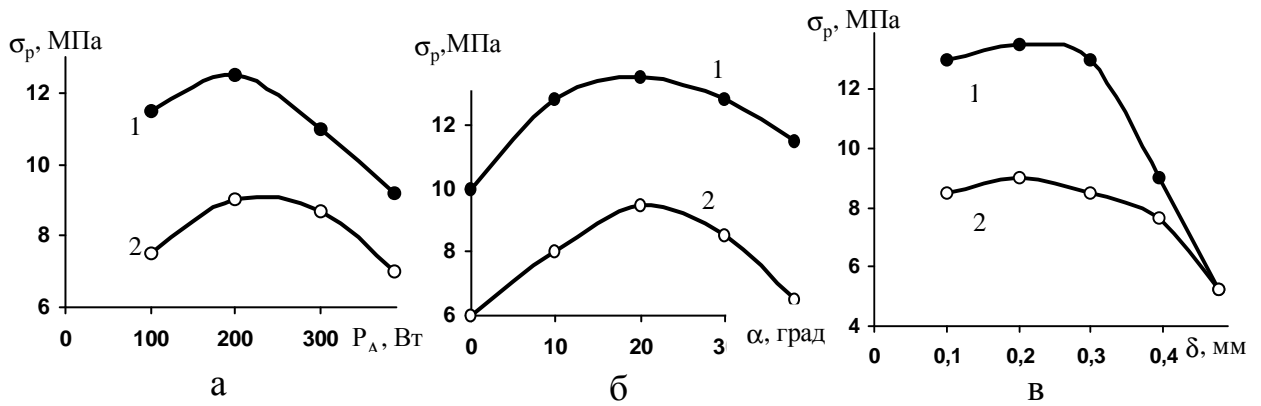


Рис. 2.41. Зависимости предела прочности при растяжении соединения полимер – припой от электрической мощности (*а*), угла наклона излучателя (*б*), зазора между излучателем и деталью (*в*) : 1 – сплав Cd –Pb - Bi; 2 – сплав Вуда

Таблица 2.8

Максимальная адгезионная прочность ультразвуковой металлизации сополимеров сплавами

| Сплав | Температура плавления, °С | Адгезионная прочность, МПа | | | | |
|------------|---------------------------|----------------------------|------|-------|------|-------|
| | | МСН | САМ | ПС-СУ | СТАН | СПС-С |
| Вуда | 70 | 9,5 | 9,3 | 8,5 | 8,3 | 7,6 |
| Cd — Pb—Bi | 112 | 13,7 | 13,4 | 11,8 | 9,6 | 9,0 |

Таблица 2.9

Прочность сцепления припоя П200А при ультразвуковой металлизации синтетических материалов

| Материал | Температура металлизации, | Прочность сцепления •10 ⁴ , | Характер отрыва |
|---------------------|---------------------------|--|-----------------|
| Фторопласт | 352 | Не свыше 5,0 | Адгезионный |
| Феррит | 350 | 66,6 | То же |
| Органическое стекло | 70 | 19,6 | То же |
| | 300 | 93,1 | Смешанный |

Для металлизации неметаллических материалов (керамики, абразивов, ферритов, стекла, кварца) чистыми металлами (цинком, алюминием, серебром и др.) необходимы высокие рабочие температуры (470–1100°C). 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 460–470°C, 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 наконечника необходимо выполнить прорези (воздушный радиатор) для охлаждения, более эффективно охлаждать преобразователь проточной водой. Детали нагревают до температуры 1100–1150°C в инфракрасной печи с диффузными отражателями, обеспечивающей нагрев как металлируемых деталей, так и наконечника волновода.

Использование в качестве припоев металлов с высокой температурой плавления повышает механическую прочность спаев с керамическими материалами. Как видно из табл. 2.10, 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 [5].

Для ультразвуковой металлизации поликристаллических сверхтвердых материалов–композита O2(β -BN) и гексаниа P(γ -BN) –применялись высокоплавкие припои на основе меди. Установлены интенсивное диспергирование поликристаллов в процессе металлизации при температуре 627–897°C, 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 [102].

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 750°C и времени воздействия

ультразвуковых колебаний до 1,0 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 [103].

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 [104].

Таблица 2.10

**Механическая прочность высокотемпературной металлизации
различными металлами**

| Металл | Температура металлизации, °С | Рабочая температура конструкции, °С | Механическая прочность на разрыв, |
|---------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Цинк | 450 | 250 | 19,6 |
| Алюмини | 700 | 450 | 20,0 |

Таким образом, ультразвуковые высокотемпературные процессы металлизации обеспечивают не только высокую прочность спаев, но и создают предпосылки для получения новых материалов в технике.

В качестве металлизующих покрытий при УЗМ в основном применяются низкотемпературные сплавы, образующие двойные, тройные или многокомпонентные системы (табл. 2.11) [105]. Для повышения производительности процесса УЗМ и расширения области его применения разработана полуавтоматическая установка для соединения материалов УЗУН-1 [105]. Основные элементы установки: ультразвуковой генератор типа УЗГ5-1,6/22, станок для металлизации, пульт управления и сигнализации; ультразвуковая головка. Мощность установки 4 кВт; рабочая частота ультразвукового излучателя 22 кГц;

диапазон рабочих температур 20 - 500°C; подача стола станка (ручная и автоматическая); ход станка от среднего положения ± 250 мм; угол наклона ультразвукового инструмента относительно поверхности стола станка $\pm 60^\circ$. В установке реализована схема механического сканирования ультразвуком металлируемой поверхности колебательная система содержит систему автоматического поддержания резонансной частоты.

Таблица 2.11

Параметры металлизации материалов в ультразвуковом поле

| Материал подложки | Материал покрытия | ξ мкм | $\nu \cdot 10^{-3}$, м | $\delta \cdot 10^3$, м | α , град | Прочность на разрыв, МПа |
|-------------------|-------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|
| BT5-1 | Sn-Zn | 5,20 | 1,5 | 0,20 | 30 | 32 * |
| AMr6 | То же- | 5,65 | 1,5 | 0,15 | 40 | 94 |
| ТБ | --/-- | 5,20 | 2,0 | 0,30 | 40 | 22 |
| ТБК-3 | --/-- | 5,20 | 2,0 | 0,30 | 40 | 20 |
| НБС-1 | --/-- | 5,20 | 1,8 | 0,25 | 30 | 14 |
| ЦТС-19 | --/-- | 5,55 | 2,0 | 0,30 | 35 | 25 |
| ЦТС-23 | --/-- | 5,20 | 2,0 | 0,30 | 35 | 21 |
| ЦТБС-3 | --/-- | 5,55 | 1,8 | 0,25 | 30 | 20 |
| МСН | Cd-Bi-Pb | 4,80 | 2,0 | 0,18 | 20 | 14 |
| САМ | То же | 4,45 | 1,8 | 0,15 | 20 | 14 |
| УПС | --/-- | 4,85 | 2,0 | 0,20 | 20 | 12 |
| СТАН | --/-- | 5,00 | 2,0 | 0,15 | 25 | 09 |

* Гидропескоструйная обработка с последующим оксидированием.

Дальнейшей оптимизацией технологии УЗМ является использование устройств, обеспечивающих равномерную и регулируемую подачу адгезива к поверхности детали.

2.2.3. Способы нагрева при ультразвуковой пайке и металлизации

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. 2.42).

В процессе нагрева паяемых изделий электропаяльником необходимо тщательно контролировать его термические характеристики, 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. 2.43) [33].

При пайке ультразвуковым паяльником следует 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 термический цикл ультразвукового паяльника при наличии ультразвуковых колебаний в процессе пайки отличается временем восстановления температурного режима и рабочими температурами (рис. 2.44).

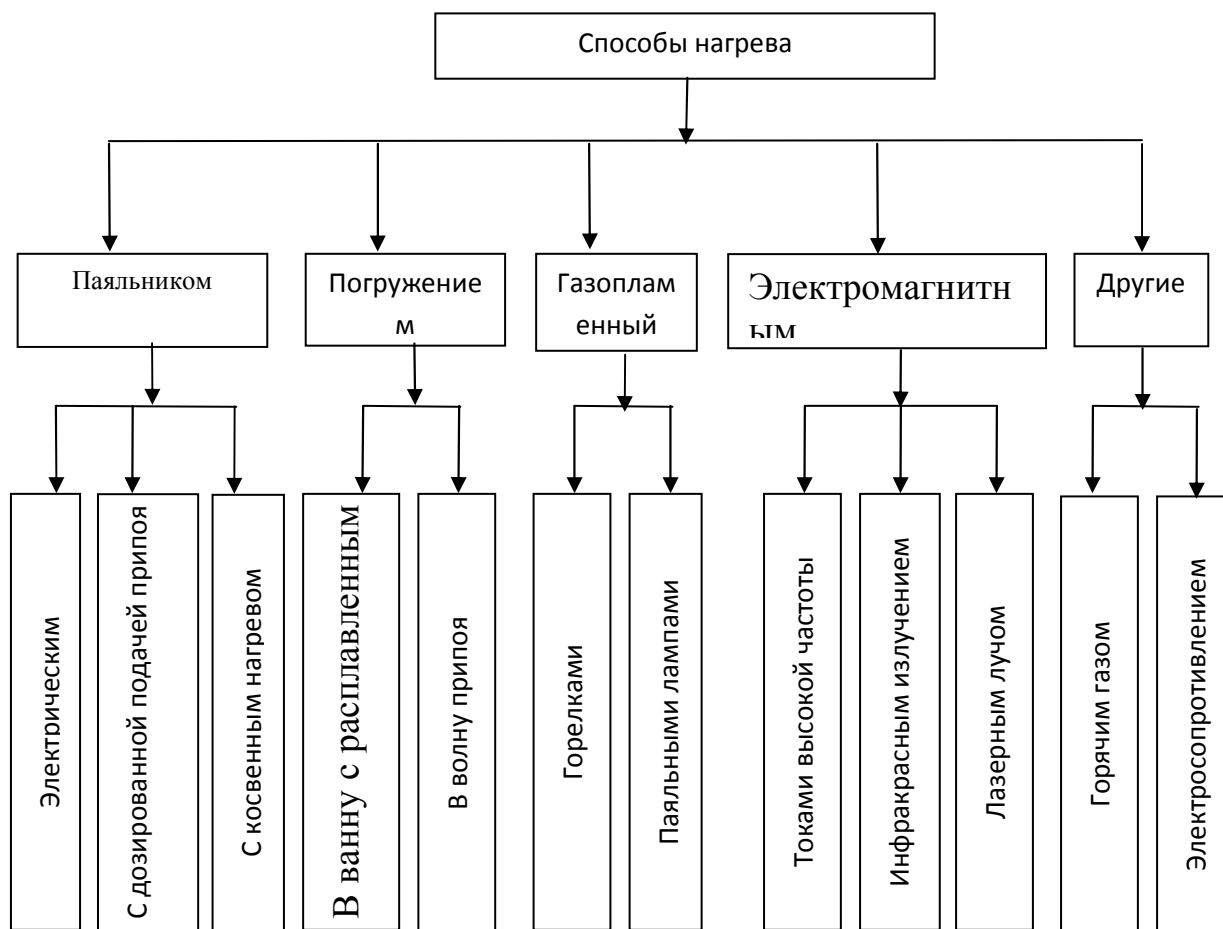


Рис. 2.42. Классификация способов нагрева при ультразвуковой пайке

Перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности жала паяльника, которое служит аккумулятором теплоты. Температура в рабочей зоне T_P связана с температурой жала T_J соотношением:

$$T_P = \frac{T_J}{ch(ml)}, \quad (2.39)$$

где ch – косинус гиперболический, l – длина жала, m – обобщенный параметр, равный:

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \Pi}{\lambda S}}, \quad (2.40)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Π – периметр поперечного сечения, S – площадь поперечного сечения жала.

Для жала диаметром D параметр m равен:

$$m = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda D}}, \quad (2.41)$$

Для медного жала диаметром 6 мм и длиной 100 мм $m=3.12$, а $T_P=T_J/1.05$, что

связано с потерями тепла.

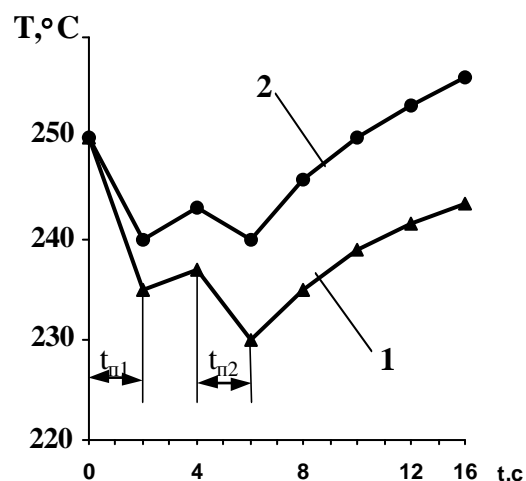
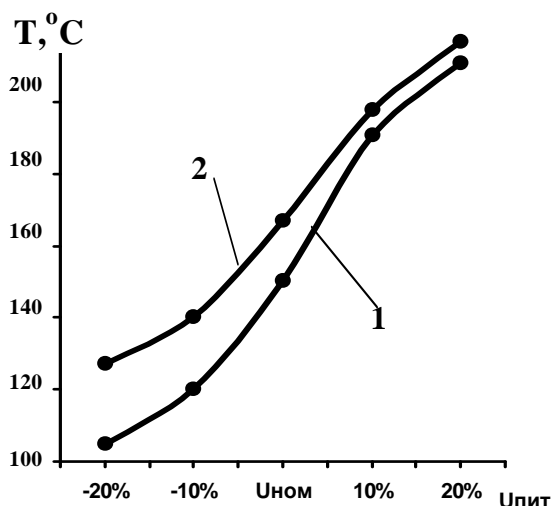


Рис. 2.43. Зависимость температуры жала УЗ паяльника от напряжения питания нагревателя: 1 – при отсутствии колебаний; 2 – при наличии ультразвуковых колебаний; 2 – при наличии

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 [107]: $q = a(T_n - T)$, где a – коэффициент теплоотдачи между пламенем и нагреваемым материалом; T_n , T – температуры потока газов пламени и поверхности материала.

Эффективность газопламенного нагрева оценивается к.п.д., представляющим собой отношение эффективной мощности пламени к полной тепловой мощности q_n , подсчитываемой по теплотворной способности горючего газа: $\eta = q/q_n = q/3,5 V_r$, где V_r – расход горючего газа. Следовательно, расход горючего газа будет определять производительность газопламенного нагрева. Ручной газопламенный нагрев горелкой 1 (рис. 2.45) 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.

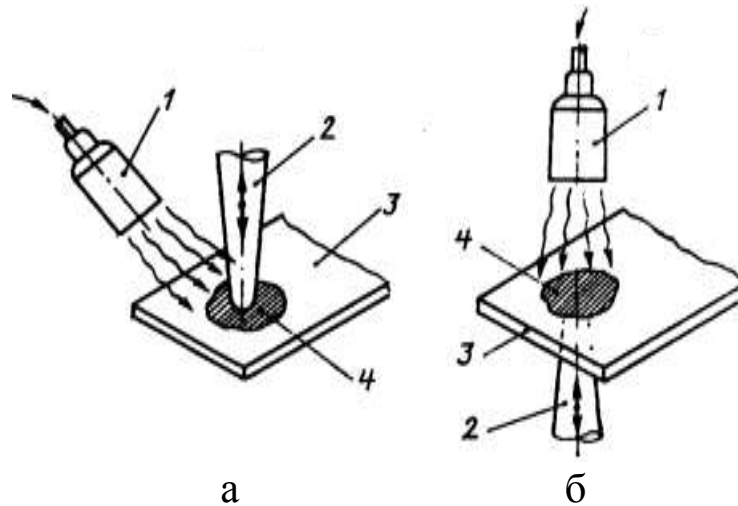


Рис. 2.45. Прямой (а) и косвенный (б) нагрев горелкой при ультразвуковой пайке

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:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\rho / \mu f}, \quad (2.42)$$

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

Термический к. п. д. системы нагрева индуктор–деталь для кругового индуктора рассчитывается по формуле [108]

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left(1 + 6,25 \frac{\delta^2}{d^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}}, \quad (2.43)$$

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

Анализ выражения (2.43) 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 $(1 + 6,25 \delta_2/d_2)$ достигает максимального значения, равного 1,1, при выполнении требования

$$\delta / d \leq 1 / \sqrt{6,25} \approx 1,8. \quad (2.44)$$

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 (2.44) следует, что минимальное значение частоты равно

$$f_{\min} = 16 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\mu d^2}. \quad (2.45)$$

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

Мощность, выделяемая при высокочастотном нагреве, определяется как [109]

$$P_{\text{над}} = \frac{V_{\text{эф}}^2 \cos \varphi \eta}{n \cdot R_{\text{изд}}}, \quad (2.46)$$

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: [110]

$$R_{\text{изд}} = \frac{2\pi L_{\text{изд}}}{c} \sqrt{\rho \mu f}. \quad (2.47)$$

Здесь $L_{\text{изд}}$ – 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 $L_k = L_{\text{изд}}$ можно рассчитать следующим образом:

$$R_{\text{изд}} / R_k = \sqrt{\rho \mu / \rho_k}, \quad (2.48)$$

где ρ_k – удельное электрическое сопротивление материала контура.

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 [111]. Медное

покрытие толщиной до 25–30 мкм позволяет увеличить скорость нагрева изделий из ковара (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, уменьшаются 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, применяемого 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 260–350°C, 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 [112].

Технологические возможности нагрева плазмой тлеющего разряда, возбужденного СВЧ-энергией, обеспечивают [113]: 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, который даёт возможность, 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:

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \quad (2.49)$$

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 пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени:

$$E = eC_0 (T/100)^4 = C(T/100)^4, \quad (2.50)$$

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 [114]: $\zeta = 1 - 0,576 \sqrt{\rho T} + 0,124 \rho T$. 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 применяют галогенные кварцевые лампы мощностью 100–650 Вт для точечных и 1000–5000 Вт для полосовых излучателей, а 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. 2.46). 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%) [115].

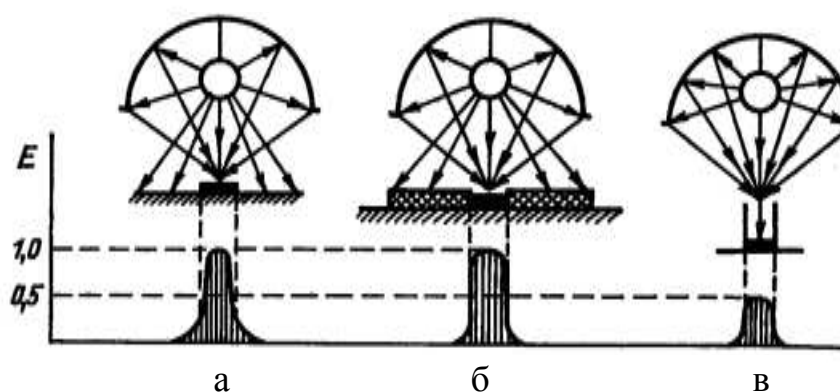


Рис. 2.46. Фокусировка ИК излучения: (а) оптическая; (б) локальная; (в) калейдоскопическая

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. На основе эллиптического рефлектора А.А. Беловым разработан "лучевой" паяльник, который создает в зоне нагрева интенсивность ИК излучения до 120 Вт/см^2 и температуру до 1000°C при мощности ИК лампы 1 кВт. Масса паяльника 0,5 кг, габаритные размеры 120x150x200 мм, используется для локальной пайки металлоемких изделий, волноводов, корпусов.

Фирмой ERSA разработано современное технологическое оснащение - универсальный настольный комбайн IR500A для ручной пайки (рис. 2.47). В состав настольного комбайна входят инструменты контактного типа с микропроцессорным регулированием температуры и инфракрасные излучатели. При работе с ним не требуется никаких сменных насадок для пайки микросхем в различных корпусах.

ИК нагреватель предназначен для монтажа и демонтажа любых компонентов с линейными размерами 10-50 мм, устанавливаемых на плату как поверхностно, так и в отверстия. Монтаж и демонтаж малоразмерных компонентов выполняется контактной пайкой с помощью 4 видов паяльников, входящих в комплект устройства. Максимальная температура в зоне пайки – 450 °С.

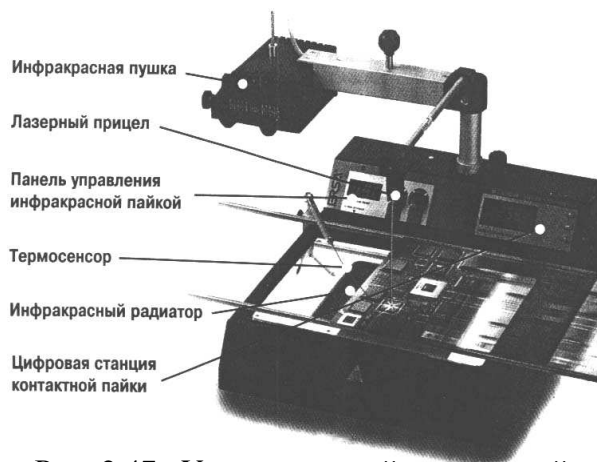


Рис. 2.47. Универсальный настольный комбайн IR500A

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 [116]:

$$I = 1,36 \frac{P}{vD}, \quad (2.51)$$

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

паяк/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. 2.48). 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 управляемым отражателем 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.

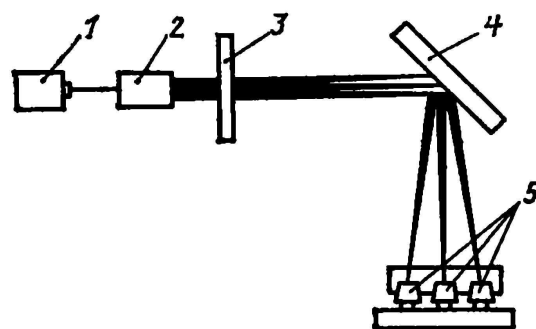


Рис. 2.48. Схема лазерной установки с

голографическим делением луча

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

2.3. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПАЙКИ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ

2.3.1. Подготовка паяемых поверхностей перед ультразвуковой пайкой и металлизацией

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 образования прочных связей между ними. Однако вопрос о необходимости подготовки паяемых поверхностей к ультразвуковой пайке до сих пор остается дискуссионным. Авторы работ [10,117] считают, что в результате интенсивной кавитации захлопывающиеся кавитационные полости создают ударные волны с давлением до 10^5 МПа, которые разрушают пленки оксидов и загрязнений на паяемой поверхности. Возникающие в кавитационной области микропотоки уносят частицы оксидов 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 [3, 7, 73] 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 под действием кавитации, но и ускоряется процесс химического взаимодействия моющей жидкости с загрязнением под действием акустических течений, предложено классифицировать все загрязнения по трем основным признакам [14]: 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 перенос вещества макропотоками. В пределах диффузионного слоя перенос описывается уравнением [118]:

$$v_x = \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial x} = D_{\Sigma} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (2.52)$$

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:

$$T = \frac{\rho h}{C_S K_{mk}}, \quad (2.53)$$

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, позволяет выявить их различие по сравнению с механизмом ультразвуковой очистки в моющей жидкости. В первую очередь следует 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 росту 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 припой, вызывает появление в нем градиента интенсивности ультразвука, что отрицательно сказывается на процессе разрушения оксидных пленок и загрязнений. Если в непосредственной близости от излучающего торца волновода одновременно будут происходить удаление оксидных 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 оксидных 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 облуживаемых изделиях, что также затрудняет удаление загрязнений. Таким образом 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 оксидов может осуществляться гидropескоструйной обработкой, пневматической обработкой 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 в себя 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 70–80°C. 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 60–80°C в течение 1–30 мин в зависимости от состояния поверхности. Для электрохимического обезжиривания алюминия применяют электролиты, в состав которых входит по 20 г/л углекислого натрия и тринатрийфосфата. Однако эти химические реактивы в электронике использовать не рекомендуется из-за их химической активности, приводящей к коррозии.

Обезжиривание деталей проводят 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 [119]. Ускорение процесса очистки от жировых загрязнений и повышение ее качества достигаются применением ультразвуковых колебаний [118, 120].

Гальванические покрытия сплавами на основе олова, никеля, серебра, золота и других металлов широко используются в технологии электронной аппаратуры 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, растворо-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.[120].

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 краевым 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 $K_p = S_p / S_0$. Паяемость определяется на образцах-спутниках размером $25 \times 25 \times 1$ мм, изготовленных из исследуемого материала с покрытием (рис. 2.49, а). Образцы 1 предварительно обезжириваются в органическом растворителе, твердый припой 3 прокатывается до толщины листа 0,3мм, доза его в виде диска диаметром 8 мм вырубается с помощью штампа или пробойника. Температура испытаний устанавливается на $65\text{--}70^\circ\text{C}$ 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.

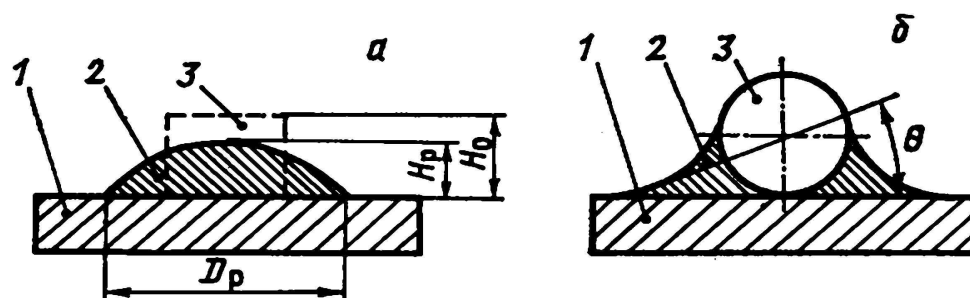


Рис. 2.49. Схема определения коэффициента растекания припоя (а) и угла смачивания (б)

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. 2.49, 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 рассчитывается по формуле [121] $K = 3l^2 / 2td$, где l – глубина затекания припоя; d – зазор между образцами; t – время испытаний.

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

Скорость течения в капилляре выражается соотношением

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{R\sigma}{4\eta l}, \quad (2.54)$$

где l – расстояние, на которое припой проник в капилляр за время t ; η – вязкость припоя. Интегрируя выражение (2.54), получаем

$$l = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\eta} \cdot \frac{1}{2} \right) Rt. \quad (2.55)$$

Коэффициентом проникновения припоя в данном случае будет величина

$$K = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\eta} \cdot \frac{1}{2} \right). \quad (2.56)$$

Если в процессе капиллярного проникновения припой должен вытеснять жидкий флюс, то коэффициент проникновения равен [121]

$$K = \frac{\sigma_{np.\phi} \cos \theta}{2(\eta_{np} + \eta_{\phi})}, \quad (2.57)$$

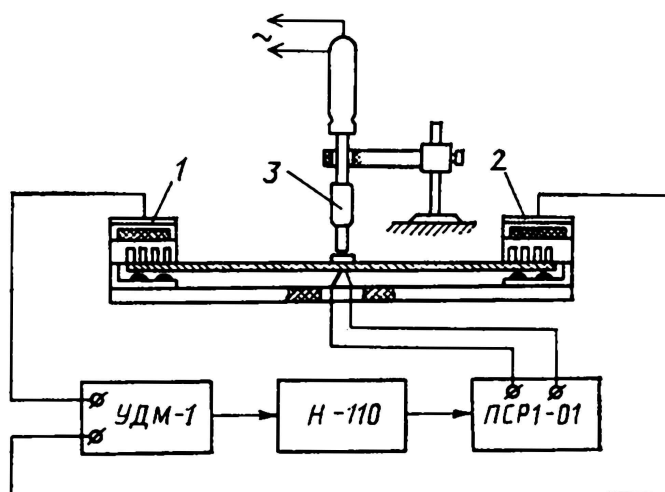
где η_{np} , η_{ϕ} – вязкость припоя и флюса.

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 [66]. Установка для определения характеристик смачивания ультразвуковым методом (рис. 2.50) 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 ПСП1–01 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 ПСР1-0,1.

Анализ совмещенных кривых синхронной записи изменений во времени температуры образца T и величины амплитуды ультразвуковых импульсов A (рис. 2.51) 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. 2.12.

Рис. 2.50. Схема установки для определения характеристик смачивания ультразвуковым методом

Реальная чувствительность ультразвукового метода зависит от минимальной площади контакта расплава припоя с поверхностью образца в зоне испытаний, которая должна быть не менее $4-6 \text{ мм}^2$. Для получения стабильных результатов эксперимента расстояние между датчиками выбирается не менее 40 мм.

Исследования паяемости металлических покрытий, используемых в электронике, в зависимости от искусственного старения в течение 24 ч в атмосфере насыщенного водяного пара при 100°C и старения в нормальных условиях в течение 6 мес показали, что наилучшую паяемость имеет горячее лужение оловом или сплавом олово-свинец [122].

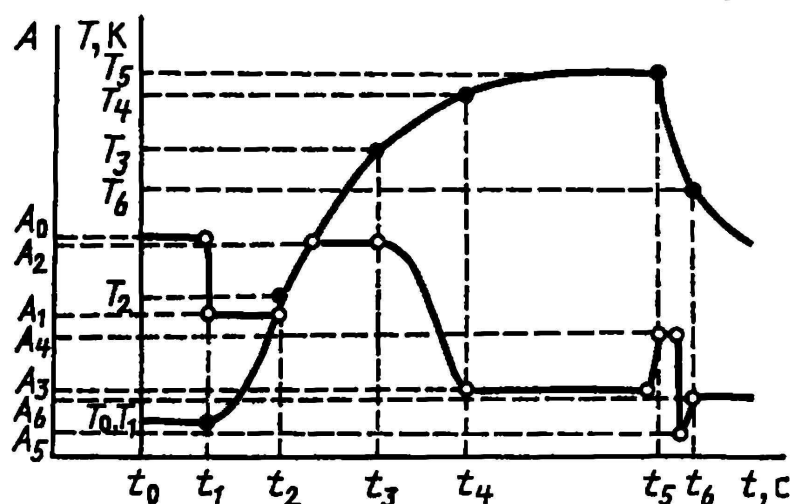


Рис. 2.51. Временные зависимости температуры образца и амплитуды ультразвуковых импульсов, прошедших через зону испытаний

Установлено, что способность к пайке большинства гальванических покрытий при старении уменьшилась в результате: потускнения их поверхности вследствие образования сульфидных и оксидных пленок под воздействием атмосферы; диффузии металла покрытия в основной металл, что приводило к уменьшению толщины покрытия; диффузии основного металла в покрытие, что служило причиной окисления или коррозии покрытия.

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.

Минимальные температуры смачивания припоями типа ПОС

| Тип припоя | Температуры перегрева припоя выше ликвидуса | Минимальная температура смачивания | |
|------------|---|------------------------------------|----------|
| | | медь М1 | сталь 20 |
| ПОС30 | 20 | 288 | 237 |
| | 60 | 225 | 239 |
| | 100 | 230 | 240 |
| ПОС40 | 20 | 208 | 215 |
| | 60 | 203 | 207 |
| | 100 | 207 | 212 |
| ПОС61 | 20 | 185 | 190 |
| | 60 | 180 | 185 |
| | 100 | 186 | 193 |

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 1 м^3 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 [123].

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 [124].

Существуют два основных метода определения коррозионной стойкости гальванопокрытий – качественный и количественный. Оба метода без увеличения или с увеличением в 50–200 раз устанавливают наличие или отсутствие зон коррозии, их

распространенность и интенсивность. Качественный метод реализуется визуальным и микроскопическим способами. При количественном методе оценка коррозионной стойкости может определяться: интервалом времени, через который появляются первые очаги коррозии; изменением механических и электрических свойств, отражательной способности покрытий; 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 3 мес 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 мес складского хранения, а у оловянно-висмутового – через три года хранения [125].

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 оксидов 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 мес 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 [69]. 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. 2.13).

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 с серебряным покрытием, микросхем типа 1ЛБ и блоков резисторов Б20 с покрытием горячим лужением.

Таблица 2.13

**Паяемость выводов резисторов, имеющих серебряное покрытие,
после 24 мес хранения**

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

Таким образом, использование ультразвуковых колебаний позволяет осуществлять бесфлюсовое лужение паяемых поверхностей электрорадиоэлементов и деталей с достаточно высокой производительностью и восстанавливать паяемость по-

крытий после длительного срока хранения, а также снизить трудоемкость подготовки их к монтажу.

2.3.2 .Влияние параметров ультразвуковых процессов на прочностные и электрические свойства соединений

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 [46] исследована зависимость вязкости жидкого припоя от времени воздействия ультразвука. Ванна с расплавом припоя служила продолжением концентратора магнитострикционного преобразователя ПМС-15А18, развивающего при работе 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 сплава Вуда и припоев ПОС61, ПОССу10-2 в зависимости от времени воздействия ультразвуковых колебаний. Анализ зависимостей (рис. 2.52) 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 повышение вязкости.

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. Выпадая из расплава, кристаллиты цинка способствуют развитию кавитации, которая в свою очередь приводит к измельчению структуры припоя в

процессе его кристаллизации.

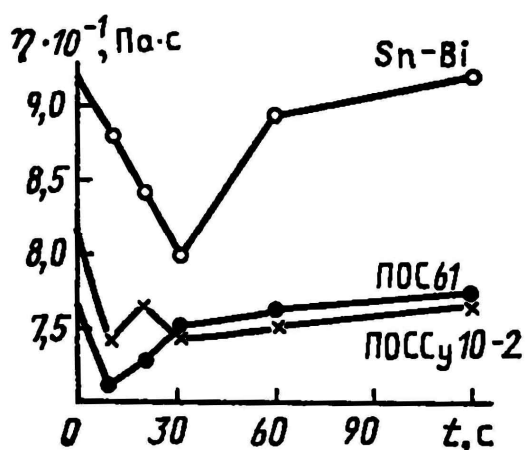


Рис. 2.52. Зависимость вязкости расплавов припоя от времени воздействия ультразвука

Исследована микроструктура припоев в исходном состоянии и после воздействия ультразвука частотой 44 кГц в течение 30 с интенсивностью $10 \cdot 10^4 \text{ В/м}^2$, 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 [33]. В структуре таких припоев, как ПСр1,5 и ПОССу10–2, содержатся 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 такого значительного эффекта (рис. 2.53).

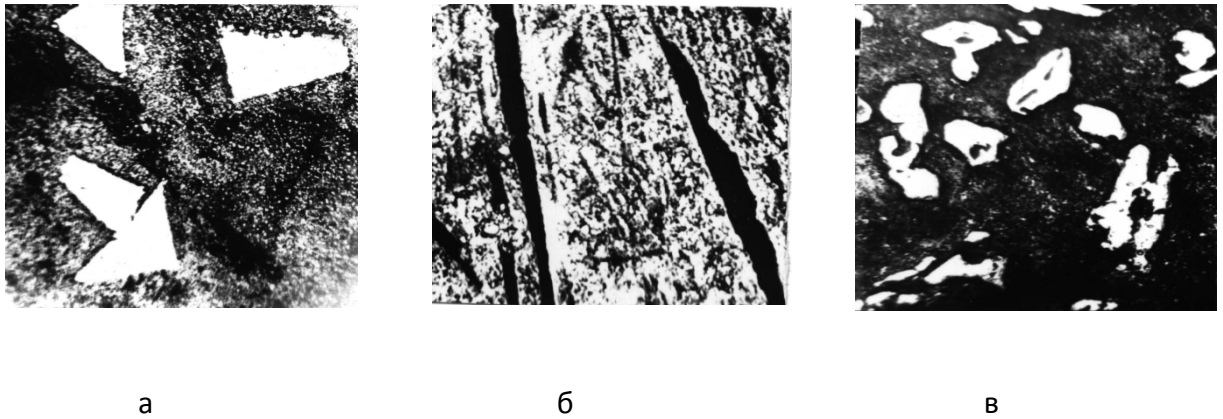


Рис. 2.53. Микроструктуры припоев: а – Sn-Sb, б – Sn-Zn, в – Sn-In

Наличие индия в припое ПОИ50 существенно улучшает его смачивающую способность, однако снижает температуру плавления. Повышенная легкоплавкость эвтектического сплава Sn–In (117°C) 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, зависит от коэффициента пропускания [126]:

$$K_{\text{пр}} = \frac{z_{\text{в}} / z_{\text{пр}}}{(z_{\text{в}} + z_{\text{пр}})^2}, \quad (2.58)$$

где $z_{\text{в}}$, $z_{\text{пр}}$ – акустические сопротивления волновода и расплава припоя. Оценка величины ультразвуковой энергии осуществлялась с помощью экспериментальной установки (рис. 2.54). Ультразвуковые колебания от генератора 1 поступали на преобразователь 2, возбуждающий упругие механические колебания в волноводе 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 припою. Исследования, выполненные для различных припоев при расстоянии между ультразвуковыми волноводами 15 мм и резонансной длине волновода $\lambda/2$, приведены в табл. 2.14 , а значения акустических сопротивлений – в табл.2.15 [126].

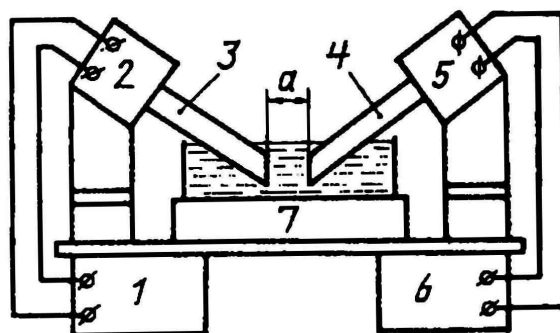


Рис. 2.54. Схема установки для оценки ультразвуковой энергии, вводимой в расплав припоя

Для оловянно-цинковых и цинково-алюминиевых припоев ввиду их высокого акустического сопротивления коэффициент пропускания составляет 0,90–0,95. Величина ультразвуковой энергии, передаваемой в оловянно-цинковые и цинково-алюминиевые припои, выше, чем в оловянно-свинцовые, что объясняется особенностями микроструктуры припоев. Ультразвуковая энергия, передаваемая расплаву припоя, резко снижается с увеличением расстояния между волноводами и почти не зависит от температуры припоя (рис. 2.55), что позволяет использовать широкие температурные интервалы для процессов ультразвуковой пайки и металлизации.

Таблица 2.14

Электрические напряжения, возбуждаемые в пьезодатчике

| Состав припоя, мас. % | Температура припоя, °С | Напряжение, регистрируемое вольтметром, В | Коэффициент пропускания, Кпр |
|-----------------------|------------------------|---|------------------------------|
| 60 Sn — 40 Pb | 250 | 16 | 0,84 |
| 96,5 Sn—3,5 Ag | 250 | 18 | 0,85 |
| 100 Sn | 250 | 19 | 0,85 |
| 91 Sn—92 Zn | 250 | 24 | 0,90 |
| 95 Zn — 5 Al | 440 | 50 | 0,95 |

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.

Таблица 2.15

| Акустические сопротивления материалов | | | |
|--|---|---|--|
| Материал | Плотность •10 ³ , кг/м ³ | Скорость звука •10 ³ , м/с | Акустическое сопротивление •10 ⁶ (кг·с/м ²) |
| 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 |

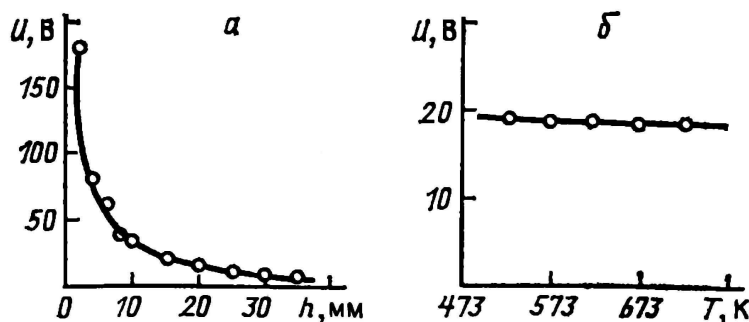


Рис. 2.55. Зависимости напряжения, регистрируемого вольтметром, от расстояния между волноводами (а) и температуры припоя (б)

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 фиксировались 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.

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 величина кавитационного давления в припое (3,0–3,2 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. 2.56)[33].

Зависимости 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. 2.57. 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 [127].

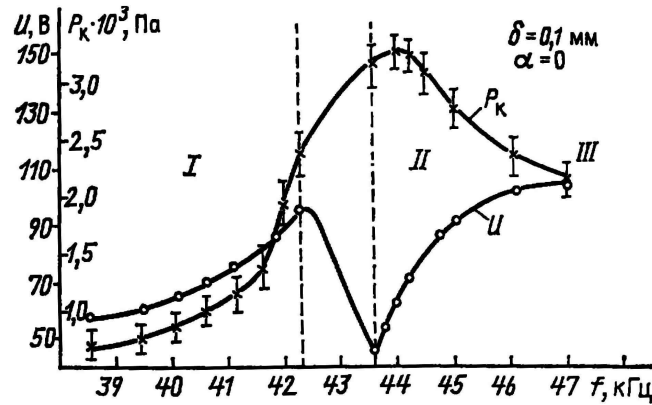


Рис. 2.56. Зависимости напряжения УЗ частоты и кавитационного давления от частоты колебаний

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 [128].

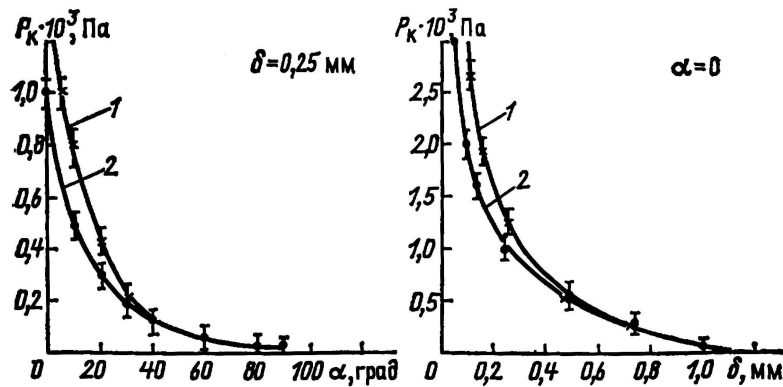


Рис. 2.57. Зависимости кавитационного давления в припоях от угла ввода колебаний и величины зазора между торцом волновода и измерительным щупом

Измерение кавитационного давления в припоях с помощью кавитометров 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.

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 изменением угла введения ультразвука в припой с 90 до 30–40° [61].

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 [129]. 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 [127]. В этом случае тонкий слой расплавленного припоя, по-видимому, приобретает такое свойство твердого тела, как упругость формы по аналогии с граничными слоями жидкости, и поэтому ультразвуковые колебания сравнительно хорошо распространяются в припой 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 таких 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 с помощью 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, и 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. 2.58), причем максимальное значение прочности сцепления припоев при продольных колебаниях соответствует кавитационным давлениям 1,5–2,5 кПа [101]. 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.

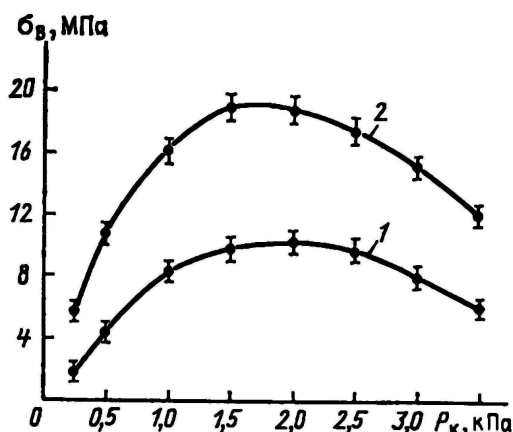


Рис. 2.58. Зависимости прочности сцепления припоев со стеклокерамикой от кавитационного давления в расплавах припоев: 1 – П200А; 2 – Pb–Sn–Zn–In

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 1,0–3,0 импульсов в секунду и без импульсов. Средний ток подмагничивания магнитострикционного преобразователя поддерживался на уровне 4,5 А, что в 1,5 раза превышало ток подмагничивания в

обычном режиме. 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.

Прочность сцепления припоя Pb–Sn–Zn–In с различными керамическими и стеклокерамическими материалами, применяемыми для изготовления конденсаторов постоянной емкости, исследовалась при амплитуде 10 мкм и частоте 44 кГц. Как видно из результатов испытаний (табл. 2.16), определяющим фактором для достижения высокой прочности сцепления является наличие стеклофазы в материале. При значительном ее содержании (70–90 мас.%) прочность сцепления изменяется незначительно, поскольку отрыв металлизированного покрытия происходит по стеклокерамическому материалу и его прочность характеризуется в основном прочностью сцепления.

Таблица 2.16

Прочность сцепления припоев, МПа, со стеклокерамикой при различной частоте импульсов

| 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 |

Исследования прочности сцепления припоев П200А и системы Pb–Sn–Zn–In в зависимости от степени шероховатости поверхности стеклокерамики показали, что наибольшие 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 I (рис. 2.59). С уменьшением шероховатости прочность их сцепления со стеклокерамикой снижается, 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 [94], поскольку для них характерен чисто адгезионный механизм образования спая с керамикой.

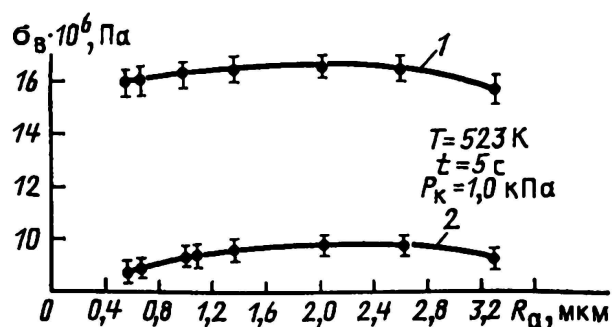


Рис. 2.59. Зависимости прочности сцепления припоев со стеклокерамикой от степени шероховатости

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 [130], зарождением локальных микротрещин во впадинах микронеровностей, являющихся хорошими концентраторами напряжений, дроблением микровыступов.

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. 2.60). Прочность сцепления этих припоев со стеклокерамикой в

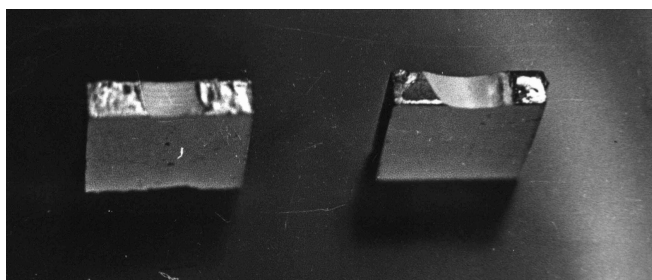


Рис. 2.60. Образцы стеклокерамики после испытания на прочность сцепления с ней различных типов припоев

3,0–3,5 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.

К технологическим режимам процесса ультразвуковой металлизации относятся температурные и временные параметры, геометрические параметры ввода ультразвуковых колебаний 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 200–320°C с тем, чтобы в расплаве присутствовали первичные кристаллы припоя, т. е. между линиями солидуса и ликвидуса данного припоя (рис. 2.61). Для легкоплавких припоев на основе олова или свинца с добавками индия, висмута, кадмия и других металлов температура процесса пайки T_{Π} должна превышать температурный порог кавитации $T_K (T_{\Pi} \geq T_K)$, поскольку при этом условии наблюдается совместное действие кавитации и первичных кристаллов, находящихся в расплаве, которое приводит к разрушению оксидной пленки и смачиванию припоем паяемой поверхности. Зависимость коэффициента растекания припоя α по сплаву АМГ-6 от температуры процесса пайки показана на рис. 2.62.

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 [41] 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 свидетельствуют о важной роли химического взаимодействия компонентов припоя со сплавом АМГ-6.

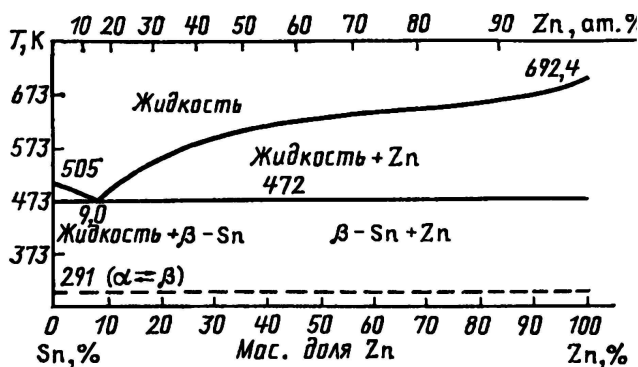


Рис. 2.61. Диаграмма состояния припоя системы Sn-Zn

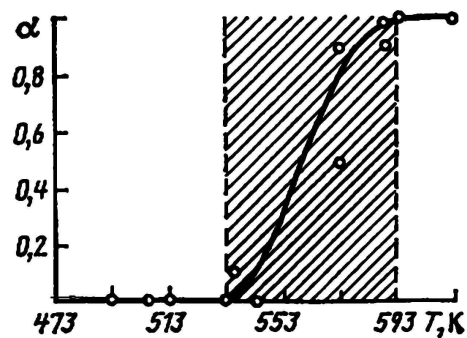


Рис. 2.62. Зависимость коэффициента растекания припоя от температуры

Минимальное время ультразвуковой пайки – 1-3 с, при этом получается достаточно прочное соединение, если выполнены необходимые требования: по температуре нагрева детали, подготовке поверхности, выбору припоя. Однако следует 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 нужно увеличивать пропорционально отношению длины соединения L_n к диаметру излучающего элемента D_B :

$$T_{II} = k \frac{L_{II}}{D_B}, \quad (2.59)$$

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 [131].

Введение порошка ферротитана в оловянно-цинковые припои в качестве абразива увеличивает коэффициент эрозии облуживаемого металла. На рис. 2.63 приведены зависимости коэффициента эрозии δ от температуры при постоянном времени лужения 10 с и от времени лужения при постоянных температуре 250°C и интенсивности ультразвука 8,5 Вт/см². Из рисунка видно, что увеличение как температурного, так и временного факторов процесса лужения алюминия повышает коэффициент эрозии. Это заставляет ограничивать время лужения и устанавливать верхний температурный предел процесса [63].

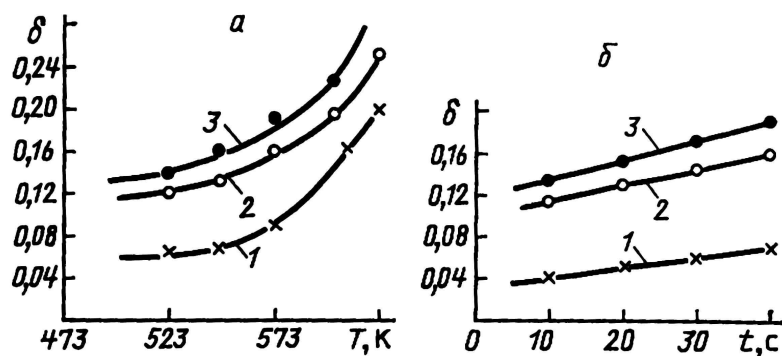


Рис. 2.63. Зависимости коэффициента эрозии алюминия от температуры (а) и времени ультразвукового лужения (б): 1- для оловянно-цинковых припоев с содержанием цинка 10% ; 2-20% ; 3-50%

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 727°C и более. Локальные тепловые микрополя, возникающие в зоне металлизации материала, интенсифицируют процессы физико-химического взаимодействия припоя и материала детали при формировании спая.

В работе [61] приведены результаты исследования ультразвуковой металлизации алюминиевого АМГ-6 и титанового ВТ5-1 сплавов оловянно-цинковых припоев П200А и определены оптимальные технологические режимы процесса: величина акустической мощности, вводимой в расплав, $P_{\text{АК}}$, зазор между инструментом и образцом δ , угол наклона инструмента к поверхности образца α , состояние поверхности металлируемого образца. О величине $P_{\text{АК}}$ судили по электрической мощности, подводимой к излучателю. Как показал анализ (рис. 2.64), при уменьшении мощности прочность спая резко снижается. Однако с увеличением мощности свыше 350 Вт происходил незначительный рост прочности спая и наблюдалось интенсивное распыление припоя, вызванное мощной кавитацией в расплаве.

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 покрытий примерно в 3 раза (рис. 2.65). Это объясняется тем, что для протекания физико-химического взаимодействия компонентов припоя с оксидом TiO_2 термодинамические условия при ультразвуковой металлизации наиболее благоприятны.

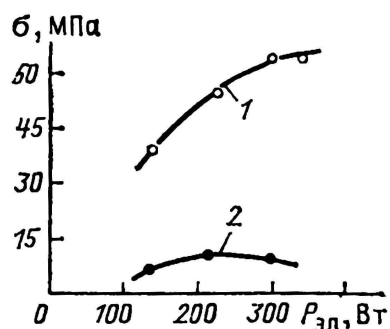


Рис. 2.64. Зависимости прочности спая от электрической мощности, подводимой к излучателю: 1 – АМГ-6; 2 – ВТ5-1

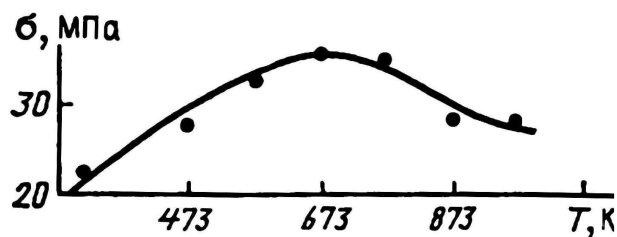


Рис. 2.65. Зависимость прочности спаев ВТ5-1 от температуры окисления

Оптимальная прочность спая наблюдается при зазоре 0,15–0,2 мм (рис. 2.66). При зазоре, меньшем 0,15 мм, возможен жесткий контакт поверхности детали и металлизующего инструмента, а с увеличением зазора свыше 0,20 мм прочность спая 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; $\alpha_{ОПТ}=30^\circ$.

Как показали исследования зависимости прочности сцепления припоев Pb–Sn–Zn–In 1 и П200А 2 от параметров ультразвуковой металлизации стеклокерамических материалов (рис. 2.67), для припоя системы Pb–Sn–Zn–In оптимальными следует считать температуру металлизации $260 \pm 10^\circ\text{C}$, время 4 ± 1 с, при которых прочность сцепления со стеклокерамикой достигает 18–19 МПа. Для припоя П200А наибольшая прочность сцепления (8–10 МПа) достигается при температуре металлизации $320 \pm 20^\circ\text{C}$ 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 сцеплению, видимому, за счет уменьшения механической прочности неметалла в результате усталостных явлений [132].

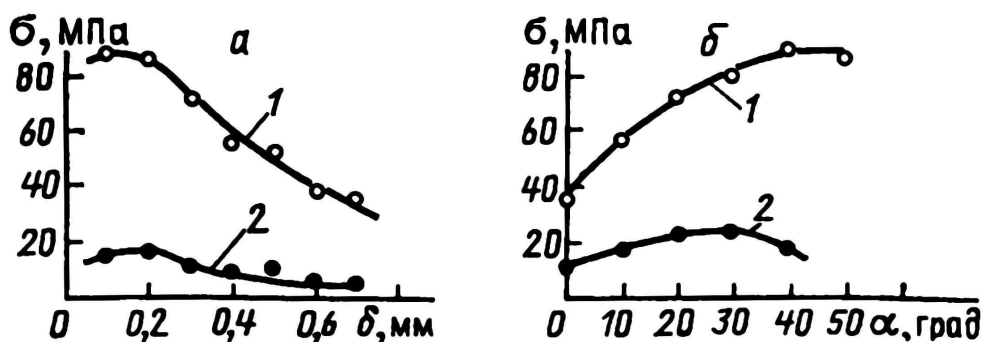


Рис. 2.66. Зависимости прочности спаев сплава ВТ5–1 от зазора между излучателем и деталью (а) и от угла наклона излучателя (б): 1 – сплав АМГ–6; 2 – сплав ВТ5–1

Режимы ультразвуковой пайки Al припоем 90% Sn - 10% Zn оптимизированы методом полного факторного эксперимента [133]. В качестве независимых факторов взяты: X1- угол наклона инструмента к подложке от 45° до 135° ; X2- скорость металлизации от $2 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-3}$ м/с; X3- зазор между торцом инструмента и подложки от 0,1 до 0,5 мм. Анализ уравнения регрессии $y=63,46 + 3,2 \cdot X1 - 4,5 \cdot X2 - 7,3 \cdot X3$ показал, что для достижения максимальной прочности необходимо уменьшать скорость металлизации и величину рабочего зазора.

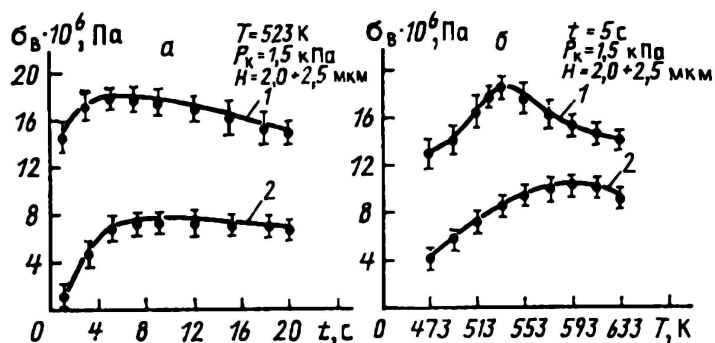


Рис. 2.67. Зависимости прочности сцепления припоев от температуры (а), времени воздействия ультразвука (б)

При ультразвуковой металлизации по схеме тонкого слоя между торцом

помещенного в расплав ультразвукового излучателя и металлируемой поверхностью реализуется зазор, толщина которого много меньше длины продольной ультразвуковой волны в расплаве: $H_n/\lambda \leq 0,01$. В такой схеме достигается максимальная эффективность преобразования энергии волнового движения в энергию акустических потоков, большие градиенты колебательной скорости и ускорения, повышенные плотности акустической энергии в рабочей зоне. По схеме тонкого слоя металлизуют расплавами Sn-Zn алюминиевые, и титановые сплавы, пьезокерамику и другие материалы (табл. 2.17.)[134,135].

Таблица 2.17.

Режимы ультразвуковой металлизации материалов

| Материал подложки | $v \cdot 10^3$, м/с | A, мкм | δ , мкм | σ , МПа |
|----------------------|-------------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| <i>Сплавы</i> | | | | |
| АМг6 | 1,5 | 5,6 | 15 | 94 |
| ВТ5-1 | 1,5 | 5,2 | 20 | 37 |
| <i>Пьезокерамика</i> | | | | |
| ТБ | 2,0 | 5,2 | 30 | 22 |
| ТБК-3 | 2,0 | 5,2 | 30 | 20 |
| МБС-1 | 1,8 | 5,2 | 25 | 14 |
| ЦТС-19 | 2,0 | 5,55 | 30 | 25 |
| ЦТС-23 | 2,0 | 5,2 | 30 | 21 |
| ЦТБС-3 | 1,8 | 5,55 | 25 | 20 |

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.

2.3.3. Контроль качества паяных соединений и металлизационных покрытий

Контроль качества предусматривает следующие способы оценки паяных соединений [134]: 1) по внешнему виду с использованием эталона паяного соединения с углом смачивания $5-10^\circ$ 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 8–56. Соединения с гладкой блестящей поверхностью без трещин и следов перегрева, с полностью заполненным зазором между паяемыми деталями (при угле смачивания $5-10^\circ$) 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 ПОС61 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. 2.68). 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.

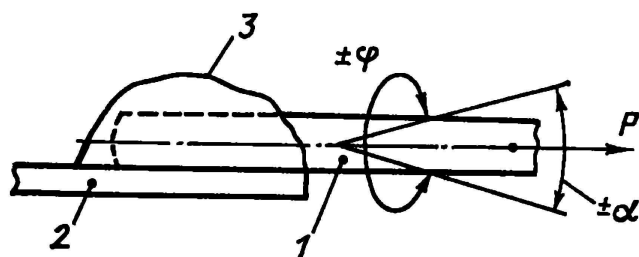


Рис. 2.68. Схема приложения знакопеременных нагрузок при испытании паяного соединения

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. Это 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 происходят 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 ПОСб1 показывают, что достаточная прочность обеспечивается при ширине диффузионной зоны 0,8–1,2 мкм (рис. 2.69) [136].

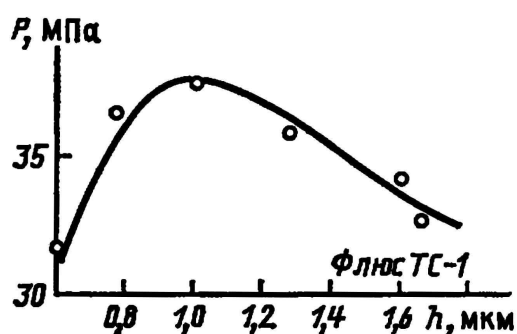


Рис. 2.69. Зависимость предела прочности паяного соединения меди припоем ПОСб1 от ширины диффузионной зоны

Переходное сопротивление паяного соединения измеряется по методу разности потенциалов между двумя точками, расположенными на расстояниях X и Y от границы

раздела соединяемых металлов (рис. 2.70). 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 составляет $(2-3) \cdot 10^{-3}$ Ом.

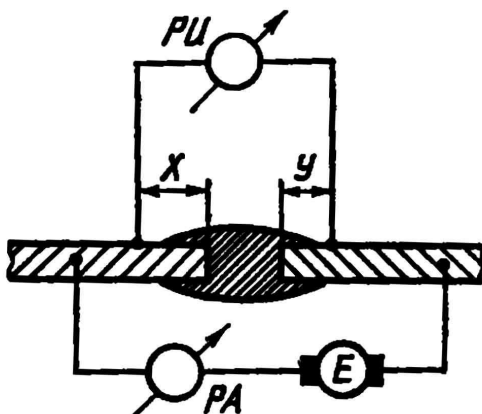


Рис. 2.70. Схема измерения переходного сопротивления паяного соединения

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. 2.71) проведения испытаний паяных соединений на надежность включает в себя термоциклирование от -60 до 80°C с длительностью цикла 1 ч 1, нормальные условия 2, нагрев до 80°C , выдержку в атмосфере тропической влажности 3, выдержку в атмосфере 98% относительной влажности при 40°C 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 ультразвуковые колебания. Универсальные ультразвуковые дефектоскопы типа УДМ-1М позволяют обнаруживать и определять раковины,

трещины, поры, расслоения и другие дефекты в паяных соединениях.

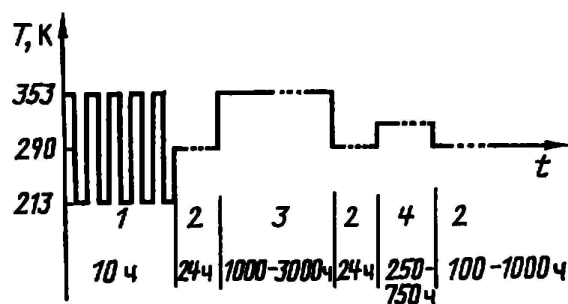


Рис. 2.71. Временной график испытаний паяных соединений на надежность

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 в себя 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 фильтра-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°C выше номинальной. В качестве датчиков используют фотоболометры и другие инфракрасные детекторы. Тепловизор ТВ-03 (СССР) имеет температурное разрешение 0,2°C в диапазоне измеряемых температур 20–200°C [137].

Повышение качества контроля паяных соединений достигается применением лазерной системы контроля дефектов (рис. 2.72) [138]. 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.

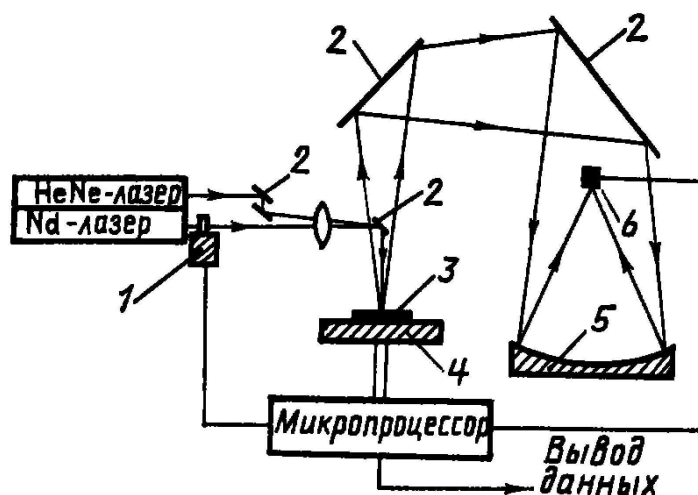


Рис. 2.72. Схема лазерной системы контроля паяных соединений

Разогревание паяного соединения с помощью неодимового лазера выходной мощностью 60 Вт происходит за 50 мс. В итоге удается контролировать в 1с около десяти паяных соединений, которые расположены на расстоянии 1,25 мм 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 лазерной ультразвуковой системы позволяет значительно увеличить производительность контроля паяных соединений печатных плат, для чего микропроцессору задается программа расположения паяных соединений на плате.

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 спая 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 внахлест (рис. 2.73).

При конструировании паяного соединения учитывают, что предел прочности паяного шва должен быть равен пределу прочности наиболее слабого элемента конструкции [139]:

$$\sigma_{пр} S_{пр} = \sigma_m S_m, \quad (2.60)$$

где $\sigma_{пр}$, σ_m – пределы прочности припоя и материала; $S_{пр}$, S_m — площади сечения припоя и материала. Отношение $\sigma_m / \sigma_{пр}$, 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 (2.60). 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:

$$\frac{D_B}{2} L_j = \beta \frac{\pi}{4} D_B^2, \quad L_j = \frac{\pi}{2} \beta D_B. \quad (2.61)$$

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 $P_2 = \sigma_m \frac{\pi}{4} D_B^2$.

Прочность сцепления покрытия с основным материалом—одна из важнейших характеристик металлического покрытия, наносимого под воздействием ультразвуковых колебаний на неметаллический материал. Оценивается она методом нормального отрыва испытательного приспособления, припаянного легкоплавким припоем к металлическому покрытию.

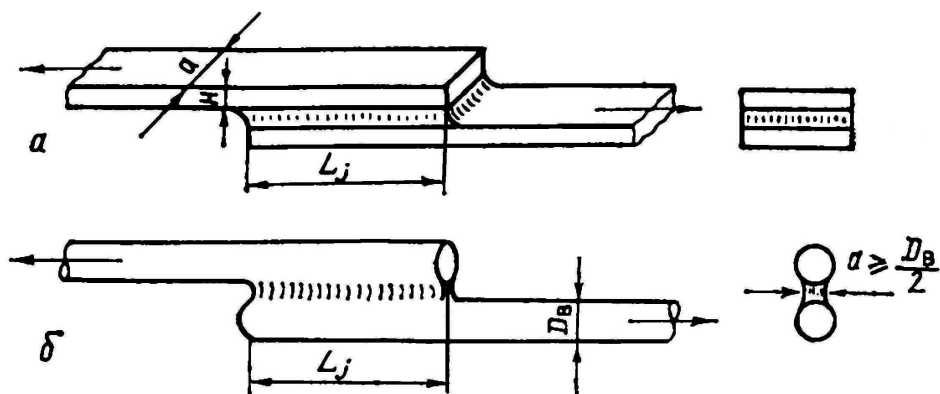


Рис. 2.73. Соединение внахлестку листового материала (а) и цилиндрического стержня (б)

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 больше, чем диаметр диска [140].

Перпендикулярность оси диска по отношению к металлическому покрытию обеспечивают 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 [141].

Для испытаний на прочность сцепления применяют 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. 2.18).

Для определения прочности сцепления паяных соединений со стеклокерамическими материалами, полученных ультразвуковой металлизацией, разработана специальная методика пайки испытательного приспособления и его отрыва [101]. 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 от температуры плавления припоя. Такая температура была определена экспериментально и согласуется с литературными данными о подогреве блоков керамических конденсаторов при электрическом монтаже до 110°C [140].

При подпайке приспособления температура жала паяльника поддерживалась на уровне $225 \pm 5^\circ\text{C}$ 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. 2.74. Таблица 2.18

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 |

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. 2.74) 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 б 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.

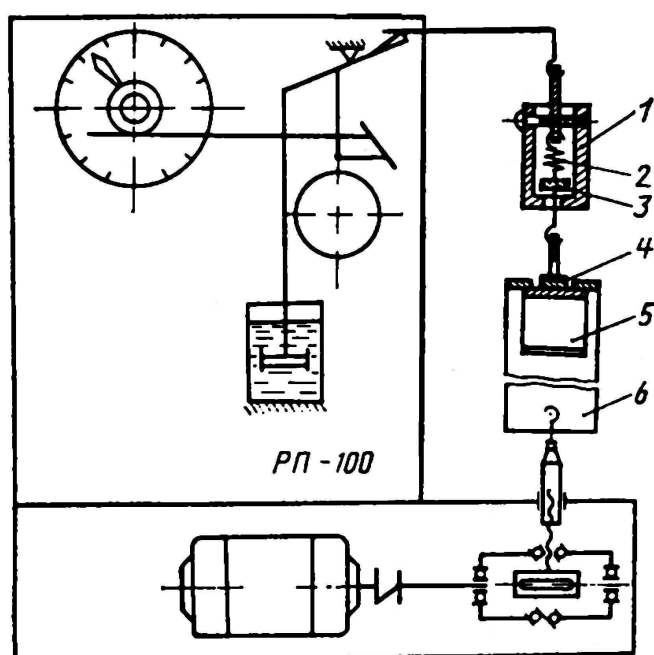


Рис. 2.74. Схема испытаний на прочность сцепления металлизации со стеклокерамическими материалами

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.

Литература

1. *Grawford A.E.* Ultrasonic Engineering. N.Y.: Academic Press, 1955 . 512 p.
2. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 726 с.
3. *Апхутин Г.И.* Пайка алюминия и его сплавов с применением ультразвука. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 18 с.
4. Способ облуживания керамических деталей. А. с. 104267 (СССР).
5. Способ лужения и пайки изделий из керамики, абразивов, ферритов и т.п. материалов: А. с. 116865 СССР.
6. *Ганрио В. В.* Ультразвуковое лужение и пайка керамики. // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. 1961. № 9. С. 1-14.
7. *Ганрио В. В.* Исследование механической прочности ультразвукового спая. // Обмен опытом в радиопромышленности. 1967. № 9. С. 1-8.
8. *Antonevich J. N.* Fundamentals of Ultrasonic Soldering. // Weld J. 1976. Vol. 55, N 7. P. 200-207.
9. *Denslow G.* Ultrasonic Soldering // Wire J. 1976. Vol. 9, N 9. P. 131 – 136.
10. Применение ультразвука в промышленности / Под ред. *А. И. Маркова*. М.: Машиностроение; София: Техника, 1976. 239 с.
11. *Кнэпп Р., Дэйли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация. М.: Мир, 1974. 686 с.
12. *Флинн Г.* Физика акустической кавитации в жидкостях. // Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1967. Т. 1. Ч. Б. С. 7 – 186.
13. *Асташкин Ю. С.* Кавитационная прочность и пороги акустической кавитации в расплавах металлов // Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний. М: Metallurgy, 1981. С. 26 – 33.
14. Ультразвуковая технология / Под ред. *Б. А. Аграната*. М.: Metallurgy, 1974. 504 с.
15. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 2. Мощные УЗ поля / Под ред. *Л. Д. Розенберга*. М.: Наука, 1968. 266 с.
16. *Алефиренко В. М., Ланин В. Л., Тявловский М. Д.* Динамика кавитационных полостей в расплавах припоев // Весті АН БССР, Сер. фіз.-тэхн.наук. 1987. № 1. С.125.
17. *Эльпинер И. Е.* Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. М.: Физматгиз, 1963. 420 с.
18. *Ланин В. Л. Тявловский М. Д.* Ультразвуковая активация дозированных объемов припоя // Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн.наук. 1988. №. С. 59 – 62.

19. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Исследование ультразвуковых микропотоков в жидкостях и расплавах // Докл. АН БССР. 1984. Т. 28. № 5. С. 427 – 429.
20. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1979. 400 с.
21. Коновалов Е. Г., Германович И. Н. Ультразвуковой капиллярный эффект // Докл. АН БССР. 1962. Т. 6. № 8. С. 492 – 493.
22. Прохоренко П. П., Дежкунов Н. В., Коновалов Г. В. Ультразвуковой капиллярный эффект. // М.: Наука и техника, 1981. 135 с.
23. Прохоренко П. П., Дежкунов Н. В. Подъем жидкости в капилляре при наличии кавитации // Повышение эффективности технологических процессов в поле акустических колебаний. М.: Metallurgy, 1981. С. 46 – 50.
24. Коновалов Е. Г., Воробьева Ж. С., Канищев А. Ф. Исследование явлений, возникающих в зоне соединения при наложении ультразвуковых колебаний // Прочность и пластичность материалов в ультразвуковом поле: Тез. докл. науч.-техн. конф. Мн., 1973. Ч. 2. С. 57 – 59.
25. Корнфельд М., Молохова Н. Вспучивание жидкости под действием ультразвукового поля Докл. АН СССР. 1995. Т. 105, № 3. С. 476.
26. Ланин В. Л., Бондарик В. М. Пайка изделий электронной техники при комбинированном воздействии концентрированных потоков энергии // Современное состояние пайки. Материалы семинара. М.: 1999. С. 64 – 67.
27. Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов и др. М.: Наука, 1986, С. 277.
28. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Контактные металлургические процессы при пайке. – М.: Metallurgy, 1977. 192 с.
29. Петрунин И. Е. Физико-химические процессы при пайке. М.: Высш. шк., 1972. 280 с.
30. Бебель В.И., Крахмальник Ф.Н., Любимов Е.М., Отмахова Н.Г. Пайка микрополосковых устройств низкотемпературными припоями без применения флюсов // –Электрон. техника. Сер. 10. 1982. Вып. 5 (341). С. 39–42.
31. Яковлев Г.А., Сальников В.М., Леонов Е.А., Чистяков Ю.Д. Бесфлюсовая пайка на воздухе труднопаяемых материалов припоями Al–Ge, Al–Si и Al–Ge–Si // – Электрон. техника. Сер. 10. 1982. Вып. 9 (345). С. 60–63.
32. Бейль В. И., Крахмальник Ф. Н., Отмахова Н. Г. Влияние НЧ-колебаний на структуру и свойства паянных соединений при низкотемпературной пайке без применения флюсов. // Электрон. техника. Сер. 10. 1982. Вып. 9 (345). С. 57–60.

33. *Клубович В. В., Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Ультразвуковая пайка в радио- и приборостроении. Мн.: Наука и техника, 1985. 263 с.
34. *Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В.* Пайка деталей электровакуумных приборов. М.: Энергия, 1967. 288 с.
35. *Долгов Е. Н.* Исследование ультразвуковой металлизации титановых и алюминиевых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1971.
36. *Френкель Я. И.* Введение в теорию металлов. Л.: Наука, 1972. 424 с.
37. *Абрамов О. В., Теумин И. И.* Кристаллизация металлов // Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. *Л. Д. Розенберга*. М.: Наука, 1970. С. 427–514.
38. *Павлова М. А., Метелкин И. И., Викман К. В.* Роль поверхностных явлений в процессе соединения керамики с металлом пайкой под давлением // Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наукова думка, 1972. С. 281–284.
39. *Дохов М.П.,Рогов В.И.,Повежев М.Х.* Температурная зависимость смачиваемости пьезокерамики оловом, свинцом и их сплавами// Физика межфазных явлений. Нальчик, 1980. С. 156–159.
40. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного слоя. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
41. *Алиева М.П., Гликман Е.Э., Горюнов Ю.В.* Влияние некоторых физико-химических факторов на смачивание алюминиевых сплавов легкоплавкими припоями при воздействии ультразвука и др. // Физика и химия обработки материалов. 1973. №1 С. 130–136.
42. *Коновалов Н.Т., Кистерев Э.В., Абрамов О.В.* Низкотемпературная ультразвуковая металлизация на воздухе трудно смачиваемых материалов // Основные направления развития ультразвуковой техники и технологии на период 1981–1990 гг. Суздаль, 1982. С. 44.
43. *Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Ультразвуковая пайка и металлизация неметаллических материалов в технологии РЭА // Перспективные направления в технологии радиоаппаратостроения. Л.: ЛДНТП, 1979. С. 36-40.
44. *Архангельский М. Е.* Воздействие акустических колебаний на процесс диффузии // Успехи физ. наук. 1967. Т. 92. №2. С. 182–205.
45. *Архангельский М. Е., Статников Ю. Г.* Диффузия в гетерогенных системах // Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. *Л. Д. Розенберга*. М.: Наука, 1970. С. 515–578.

46. Коновалов Е. Г., Воробьева Ж. С. Методика измерения вязкости расплавов припоев, облученных ультразвуком // Докл. АН БССР. 1974. Т. 28. №5. С. 408-409.
47. Абрамов О. В. Ультразвуковая обработка бинарных сплавов // Применение ультразвука в машиностроении. Мн.: Наука и техника, 1964. С. 10-14.
48. Ощепков С. А., Цапская О. З. Воздействие ультразвуковых колебаний на структуру некоторых легкоплавких сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1975. №1. С. 71–72.
49. Кардашев Г. А., Михайлов П. Е. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение, 1973. 223 с.
50. Преснов В. А., Новодворский Ю. Б., Якубеня М. П. Основы техники и физики спая. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1961. 236 с.
51. Конников С. Г., Сидоров А. Ф. Электронно-зондовые методы исследования полупроводниковых материалов и приборов. М.: Энергия, 1978. 136 с.
52. Пугачев С. И. Экспериментальное исследование пограничной области пьезокерамика-металл при ультразвуковой металлизации // Технологические применения ультразвука: Материалы к краткосрочному семинару. Л.: ЛДНТП, 1968. С. 79–84.
53. Абрамов О.В., Зверьков С.А., Оганян Я.Н. Ультразвуковая металлизация пьезокерамики оловянно-цинковыми припоями // Ультразвуковые методы воздействия на технологические процессы. М.: Metallurgy, 1961. С. 59–63.
54. Пономаренко В.Д., Роздова Р.А., Айништейн Р.Г., Горячева Г.А. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы. М.: Энергия, 1972. 160 с.
55. Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Припой для ультразвуковой металлизации стеклокерамических материалов // Электрон. техника. Сер. 6. 1979. Вып. 1 (126). С. 19–21.
56. 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.
57. Эштейн С. А. Измерение характеристик конденсаторов. М.; Л.: Энергия, 1965. 236 с.
58. Тявловский М. Д., Ланин В. Л. Процесс формирования металлических спаев со стеклокерамическими материалами при воздействии ультразвука // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1981. №1. С. 51–55.

59. 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.
60. Пугачев С. И. Металлизация пьезокерамики с применением ультразвука // Технология судостроения. 1964. № 5. С. 100-103.
61. Долгов Е. Н., Пугачев С. И., Тарат Э. Я. Ультразвуковая металлизация титановых и алюминиевых сплавов // Технология судостроения. 1971. № 4. С. 53 – 55.
62. Бесфлюсовый способ лужения металлов: А. с. 383553 СССР.
63. Вирозуб Г.Е., Панченко П.В., Савчук Г.Ф., Шабанова С.В. Исследование оптимальных режимов при ультразвуковом лужении алюминия // Прикладная акустика. 1971. Вып. 4. С. 237 – 243.
64. Трizza Ю. П. Ультразвуковая пайка плат // Новые материалы и технология пайки в машиностроении. М.: ЦП НТО Машпрома, 1971. С. 131 – 135.
65. Аньев О. Г., 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.
66. Winkler G. Unterstutrung des Weichlotprozesses dursh Ultraschall // ZIS – Mitt. 1975. Bd. 17. N4. S. 395 – 403.
67. Няньковский Л. А. Ультразвуковой преобразователь для бесфлюсового лужения радиодеталей // Новые разработки в ультразвуковой технике и их промышленное применение. Л.: ЛДНТП. 1977. С. 89 – 91.
68. Роговский В. Ф. Бесфлюсовое лужение выводов микросхем с помощью ультразвука // Техника средств связи. Сер. Технол. пр-ва и оборудования. 1977. Вып. 2 (3). С. 115 – 116.
69. Ланин В. Л., Макаревич А. И. Ультразвуковое лужение деталей и элементов РЭА // Обмен опытом в радиопром-сти. 1981. Вып. 12. С.10-12.
70. Способ гиперзвуковой микросварки и пайки: А. с. 743815 СССР.
71. Способ ультразвуковой пайки и лужения: А. с. 89426 СССР.
72. 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.
73. Fuch J. F. Ultrasonics in Electronics Soldering Applications // Electron. Packag. and Prod. 1979. Vol. 19, N11. P. 124 – 132.
74. Гудков А. В. Аппаратура для ультразвуковой металлизации // Обмен опытом в радиопром-сти, 1967. № 9. С. 26 – 29.

75. *Попилов Д. Я.* Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справ. М.: Машиностроение, 1982. 400 с.
76. Ультразвуковой паяльник: А. с. 179399 СССР.
77. Ультразвуковой паяльник: А. с. 216861 СССР.
78. Паяльник для ультразвуковой пайки: А. с. 519200 СССР.
79. Способ ультразвуковой обработки материалов и устройство для его осуществления: А. с. 766790 СССР.
80. Пат. 2542988 ФРГ.
81. Паяльник для пайки и распайки: А. с. 766775 СССР.
82. Ультразвуковой паяльник: А. с. 831447 СССР.
83. *Graff K.* Macrosonics in Industry: Ultrasonic Soldering // *Ultrasonics*. 1977. Vol. 15. N 2. P. 75–81.
84. Пат. 53 – 40179 Япония.
85. Пат. 54 – 30655 Япония.
86. *Гершгал Д.А., Фридман В.М.* Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, 1976. 320 с.
87. *Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С.* Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982. 208 с.
88. Пат. 54 – 2243 Япония.
89. Пат. 57 – 64473 Япония.
90. Пат. 4358044 США.
91. *Шапошников О.А., Торонов А.В., Рязанцев Л.Г.* Универсальная установка индукционной пайки // *Электрон. техника. Сер. 7*. 1981. Вып. 6 (109). С. 27 – 29.
92. *Трегубов С. В., Тявловский М. Д., Ланин В. Л.* Устройство для ультразвукового лужения заготовок // *Обмен производственно-техническим опытом*. 1986. Вып. 7. С. 41 – 42.
93. *Захаров К. Д.* Ультразвуковая пайка стекла, керамики и ферритов // *Применение ультразвука в технологии машиностроения*. М.: ЦИНТИ. 1960. С. 142 – 145.
94. *Ощепков С. А., Цапская О. З.* Некоторые вопросы исследования ультразвуковой металлизации керамики // *Электрон. техника. Сер. 7*. 1974. Вып. 1 (59). С. 28 – 29.
95. *Дроздов В. Н., Волгуга В. В., Артюхов А. М., Сыров Н. В.* Металлизация радиотехнической керамики под действием ультразвука // *Вопросы схемотехники, конструирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры*. Мн.: Полымя, 1975. С. 114 – 115.

96. Гудков А. В. Аппаратура для ультразвуковой металлизации // Обмен опытом в радиопром-сти. 1967. № 1. С. 26 – 29.
97. Пугачев С. И. Металлизация пьезокерамики с применением ультразвука // Технология судостроения. 1964. № 5. С. 100 – 103.
98. Ультразвуковая металлизация и пайка для технологии приборостроения / Под ред. А. В. Гудкова. – Обзор по материалам отечеств. и зарубеж. печати за 1966 – 1974 гг. М.: ЦНТИ "Поиск", 1975. 58 с.
99. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами // Весці АН БССР. Сер. фіз.–тэхн. навук. 1983. № 4. С. 69–73.
100. Припой для лужения и пайки керамики и стеклокерамики: А. с. 612767 СССР.
101. Гусева Е.В., Долгов Е.Н., Пугачев С.И. Ультразвуковая металлизация сополимеров стирола // Технология судостроения. 1971. № 6. С. 50 – 52.
102. Деленковский Н. В. Ультразвуковая металлизация плотных модификаций нитрида бора // Основные направления развития ультразвуковой техники и технологии на период 1981 – 1990 гг. Суздаль, 1982. С. 43.
103. Способ металлизации керамики: А. с. 833884 СССР.
104. Прохоренко П. П., Стойчева И. В., Деленковский Н. В. Ультразвуковая пропитка графита легкоплавкими припоями // Весці АН БССР. Сер. фіз.–энерг. навук. 1977. № 4. С. 121 – 123.
105. Абрамов О.В., Добаткин В.И., Казанцев В.Ф. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. 277 с.
106. Основы материаловедения / Под ред. И. И. Сидорина. М.: Машиностроение, 1976. 436 с.
107. Гржимальский Л. Л., Ильевский И. И. Технология и оборудование пайки. М.: Машиностроение, 1979. 240 с.
108. Benkowsky G. Grundlagen der Induktionserwärmung .-Elektro // Plaktiker. 1974. Bd. 28. N 8. S. 265 – 268.
109. Коган М. Г. Расчет индукторов для нагрева тел вращения. М.: ВНИИЭМ, 1966. 59 с.
110. Ланин В. Л. Активация процессов пайки корпусов микрoeлектронных изделий электромагнитными высокочастотными колебаниями // Радиотехника и электроника. Мн.: Вышэйш. шк., 1983. Вып. 12. С. 174 – 178.
111. Способ пайки деталей: А. с. 554118 СССР.

112. *Мартынюк С. П., Моторненко А. П.* О возможности плазменной пайки электрических монтажных соединений при производстве радиоаппаратуры // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технол. пр-ва и оборудования. 1976. Вып. 3. С. 79 – 83.
113. *Котельников Д. И.* Технологические возможности и проблемы пайки в плазме тлеющего разряда изделий единичного и массового производства // Новые достижения в области пайки. Киев: ИЭС им Е. О. Патона, 1981. С. 103 – 107.
114. *Зворыкин Д. Б., Прохоров Ю. И.* Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. М.: Энергия, 1980. 176 с.
115. *Смирнов Г.Н.* Прогрессивный способы пайки алюминия. М.: Машиностроение, 1977. 328с.
116. *Поливанов Ю.В., Эльманович Н.Н., Браславский Е.Ц.* Исследование способа пайки электрорадиоэлементов на печатные платы лазером непрерывного излучения // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технол. пр-ва и оборудования. 1980. Вып. 1. С. 47 – 50.
117. *Хорбенко И. Г.* Ультразвук в машиностроении. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
118. *Тявловский М. Д., Фастовец Е. П., Алефиренко В. М.* Ультразвуковая очистка РЭА и приборов. Мн.: Наука и техника, 1984. 239 с.
119. *Хряпин В.Е.* Справочник паяльщика. М.: Машиностроение, 1981. 384 с.
120. *Петрунин И. Е., Маркова И. Ю., Екатова А. С.* Металловедение пайки. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
121. *Harding W. B.* Solderability Testing // Plating, 1965. N 10. P. 970 – 981.
122. *Rothschild B. F.* Electroplating of Solderable Coating // Metal Progr. 1981. Vol. 119, N7, P. 25–29.
123. *Зайдман Н. С.* Паяемость выводов радиоэлементов // Обмен опытом в радиопром-сти. 1976. Вып. 5. С. 16.
124. *Коваленко Д.Г., Крамер Б.М., Захаров С.А.* Паяемость серебряного покрытия // Обмен опытом в радиопром-сти. 1978. Вып. 11. С. 27 – 29.
125. *Давыдова А. М.* Паяемость оловянно-цинковых и оловянно-висмутовых гальванических покрытий // Обмен опытом в радиопром-сти. 1972. Вып. 7. С. 28 – 30.
126. *Lystrup F.* Measurement of the Ultrasonics Effect in an Ultrasonic Solder Bath // Weld J., 1976. Vol. 55. N 10. P. 309-313.

127. Ланин В. Л., Тявловский М. Д. Влияние вида ультразвуковых колебаний на прочность спаев со стеклокерамическими материалами // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1983. № 4, С. 69 – 73.
128. Ланин В. Л., Макаревич А. И. Ультразвуковое лужение деталей и элементов РЭА // Обмен опытом в радиопром-сти. 1981. Вып. 12. С. 10 – 12.
129. Пат. 49 – 42781 Япония.
130. Северденко В. П., Скрипниченко А. Л., Тявловский М. Д. Ультразвук и прочность. Мн.: Наука и техника, 1979. 248 с.
131. Бондарик В.М., Ланин В.Л. Прочностные свойства соединений, выполненных ультразвуковой пайкой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1998. N 3. С. 21-22.
132. Свергунов В. Ф., Ланин В. Л., Чернышев И. Н. Локальные ультразвуковые излучения выводов радиоэлементов // Электронная промышленность, 1994. №6. С. 43-44.
133. Lanin V. L. Ultrasonic soldering in electronics // Ultrasonics Sonochemistry, 2001. №8. P. 379–385.
134. Прохоренко А. А., Пугачев С. Н., Семенова Н. Г. Ультразвуковая металлизация материалов. Мн.: Наука и техника, 1987. 270 с.
135. Абрамов О. В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука, 2000. 312 с.
136. Мартынов Г. К. Надежность электрических соединений, выполненных пайкой легкоплавкими припоями. М.: Изд-во стандартов, 1968. 52 с.
137. Бережной В. П., Дубицкий Л. Г. Выявление причин отказов РЭА. М.: Радио и связь, 1983. 232 с.
138. Laserstrahlen helfen in der Lottechnik // Electron Produk. und Pruftechnik. 1982. №4. S. 189.
139. Manko H.H. *Solders and Soldering, Materials, Design, Production and Analysis for Reliable Bonding*. N.Y. 1979. 350 p.
140. 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.
141. Атанасяц А. М., Пашикина Л. А. Методика определения прочности сцепления металлического покрытия с диэлектриком // Обмен опытом в радиопромышленности. 1978. Вып. 11, С. 34 – 35.