

## АКТИВАЦИЯ РАСПЛАВОВ ЭНЕРГИЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ПОЛЕЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)*

### Введение

Для металлизации различных деталей из керамики, пьезо-, стекло- и сегнетокерамики, ферритов и других неметаллических материалов на минеральной основе широко применяют пасты на основе благородных металлов, например серебра, платины, палладия и др. Ограниченные природные ресурсы благородных металлов и растущий промышленный спрос на них определяют актуальность и практическую ценность исследований, направленных на разработку таких способов металлизации, которые бы полностью исключили применение этих остродефицитных металлов. Одним из таких способов, позволяющих экономить драгоценные металлы, повысить производительность процесса металлизации и увеличить прочность спая с неметаллическими материалами, является ультразвуковая металлизация расплавами припоев [1].

Ультразвуковая (УЗ) металлизация – одно из перспективных направлений в технологии электронных устройств, поскольку механические упругие колебания частотой 18–70 кГц и интенсивностью 0,1–1,0 МВт/м<sup>2</sup> резко интенсифицируют большинство физико-химических процессов: смачивание, растекание, капиллярное течение припоя, диффузию припоя в паяемые материалы [2]. Для УЗ металлизации керамики на основе оксидов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> применяют бессвинцовые припои на основе Sn с добавками активных компонентов Ti и Ce [3].

Для УЗ активации возможно использование различных видов механических колебаний, вводимых с помощью излучателей в жидкую фазу и являющихся по своей природе упругими волнами: продольных, сдвиговых, крутильных, комбинированных. В продольных волнах колебания частиц среды происходят в направлении распространения волны, а в сдвиговых их движение перпендикулярно направлению движения волны. Поскольку жидкости и газы не обладают упругостью формы, в них возможно распространение лишь продольных волн. Однако в расплавах с большей вязкостью возможно также образование вязких сдвиговых волн, затухающих на малом расстоянии от излучателя.

При введении в расплав припоя продольных колебаний, интенсивность которых нелинейно убывает при увеличении расстояния от излучателя, необходимо поддерживать постоянной величину зазора в пределах 0,2–2,0 мм для исключения появления макро- и микротрещин в поверхностных слоях хрупких неметаллических материалов за счет ударного воздействия на них УЗ волны, направленной нормально к поверхности. Снижение динамического воздействия на паяемый материал достигают изменением угла введения колебаний в припой с 90 до 30–40° [4].

Однако процесс пайки, или металлизации, при малых зазорах между торцом УЗ излучателя и поверхностью изделия (порядка 0,1 мм) весьма сложен, поскольку требуется строгое поддержание величины зазора и малейшие погрешности могут привести к жесткому контакту излучателя с поверхностью керамики или стеклокерамики с появлением микро- и макротрещин за счет микроударов излучателя о поверхность, а в отдельных случаях при наличии внутренних дефектов – разрушению изделия.

Нагрев ИК излучением расплавов в зоне металлизации имеет ряд технологических преимуществ, однако их реализация зависит от правильно сконструированной установки ИК нагрева. В настоящее время широкое применение в технологических процессах пайки получили два вида ИК нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. В зависимости от конкретных условий используют различные по геометрии рефлекторы, формирующие тепловое поле в зоне нагрева. Для ИК нагрева в большей степени используется узкий диапазон длин (волн от 1 до 5 мкм), который делится на коротковолновый (от 1 до 2,5 мкм) и средневолновый от 2,5 до 5 мкм [5]. Коротковолновый диапазон ИК излучения позволяет более быстро нагревать объекты, поскольку согласно закону смещения Вина максимальная величина спектральной интенсивности излучения с повышением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Нагрев ИК излучением высокопроизводителен, инвариантен к типу паяемого изделия, экологически чист (не загрязняет окружающую среду), дает возможность программировать режимы нагрева в любой контролируемой атмосфере, например нейтральной или защитной, газовой.

### Методика эксперимента

Возбуждение различных видов УЗ колебаний осуществляли с помощью магнестрикционных преобразователей, создающих поперечные колебания частотой 41 кГц (рис. 1,а), продольные частотой 44 кГц (рис. 1,б) и крутильные частотой 22 кГц (рис. 1,в). 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. Возбуждение импульсных продольных колебаний достигалось подачей импульса тока подмагничивания, 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  $A_0$ . Импульсные колебания со скважностью 2–6 вводились в преобразователь от специального генератора. Для увеличения постоянной составляющей тока подмагничивания применен источник постоянного тока типа ВСА-10 (рис. 2).

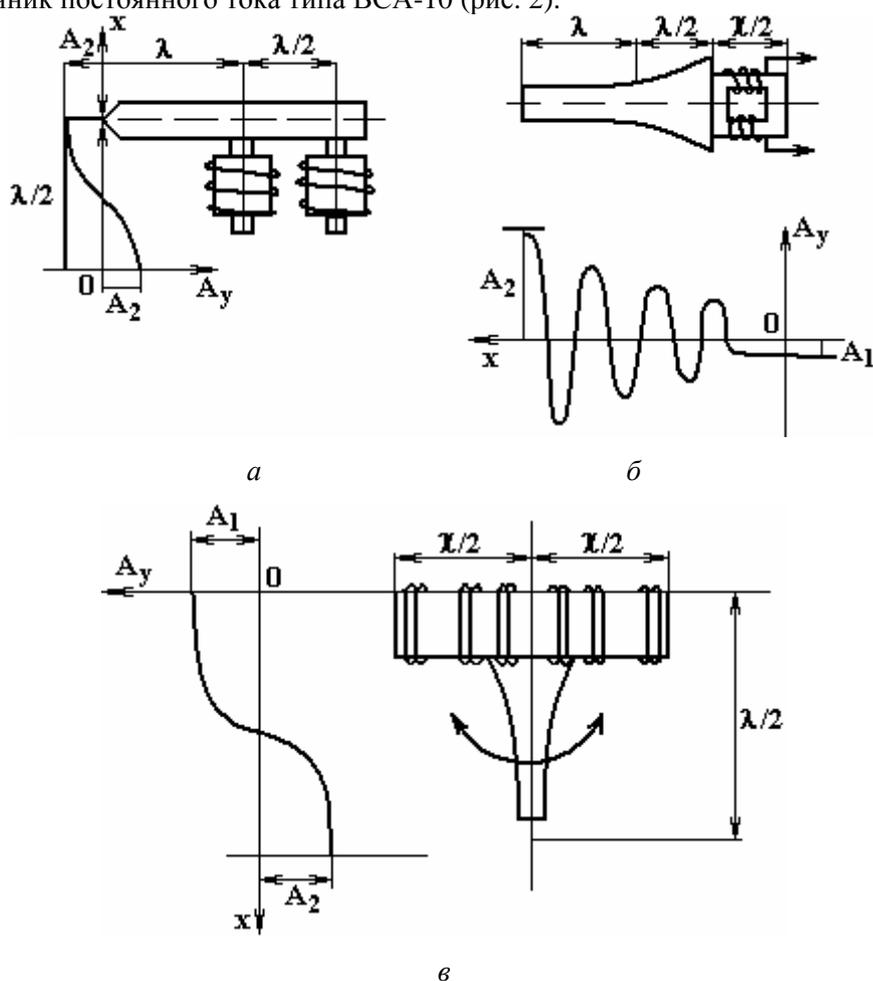


Рис. 1. Схемы возбуждения УЗ колебаний различными типами волн

При возбуждении сдвиговых волн конечной амплитуды в тонком слое расплава при условии, что его толщина много меньше длины УЗ волны, в нем возникают вязкие волны, волновой вектор которых направлен перпендикулярно боковой поверхности излучателя. Такие волны быстро поглощаются в направлении от колеблющейся поверхности и проникают на глубину

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta}{\pi f}}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – вязкость расплава,  $f$  – частота колебаний.

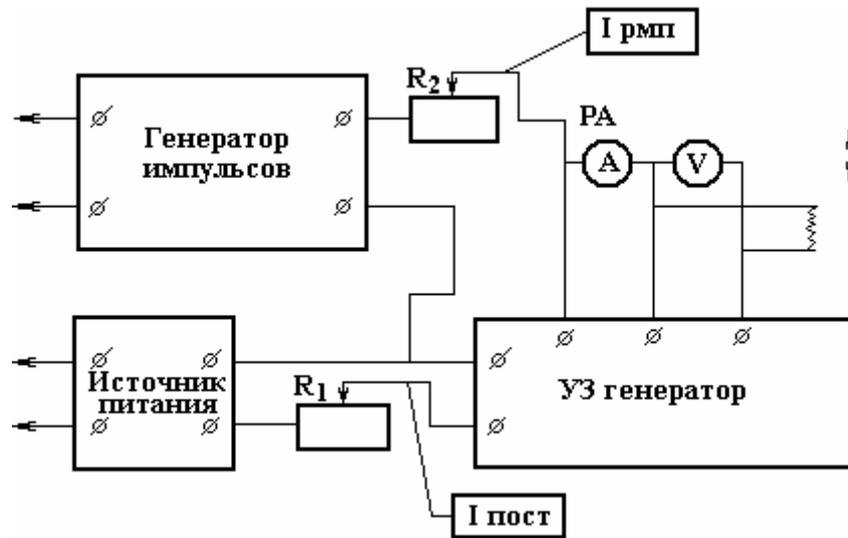


Рис. 2. Схема возбуждения импульсных продольных колебаний

Расчетные глубины проникновения сдвиговой волны в расплавах припоев на частотах 44 кГц составляют 170–210 мкм, поэтому их влияние на расплав при величине зазора более 0,2 мм несущественно.

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

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

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

Учитывая, что коэффициенты отражения  $K_{отр}$  и прохождения  $K_{пр}$  по давлению определяются как [6]:

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

что  $Z_1 = \rho_1 c_1; Z_2 = \rho_2 c_2$  и при  $x=0$  справедливо выражение

$$\begin{aligned} P_1 + P_3 &= P_2, \\ \frac{(P_1 - P_3)}{Z_1} &= \frac{P_2}{Z_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из (3) и (4) получим

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

Анализ выражения (5) показывает, что коэффициенты прохождения и отражения существенно зависят от акустических свойств сред. При  $Z_1 = Z_2$  коэффициент отражения равен нулю и граница раздела акустически прозрачна. Поскольку  $Z_1 \gg Z_2$  (то есть когда удельные волновые сопротивления излучателей ультразвука выше удельных волновых сопротивлений расплавов), то через границу излучатель-припой в случае колебаний, параллельных поверхности, проникает до 54% энергии, которая активизирует процессы кавитации, микро- и макропотоки. При колебаниях излучателя, направленных нормально к поверхности, прошедшая в расплав УЗ волна испытывает затухание, распространяясь в пределах зазора  $\delta$ , и в значительной мере проходит в поверхность, так как  $K_{пр} > 1$ . Таким образом, только 20–25% УЗ энергии участвует в активации расплава.

Расчетные значения  $K_{отр}$  и  $K_{пр}$  для различных материалов излучателей и обрабатываемых деталей на границах излучатель–расплав ( $X=0$ ) и расплав–обрабатываемая деталь ( $X=\delta$ ) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты прохождения и отражения УЗ волн по давлению

Материалы сред	$X=0$		$X=\delta$	
	$K_{пр}, \%$	$K_{отр}, \%$	$K_{пр}, \%$	$K_{отр}, \%$
Сталь-расплав	63	37		
Титан-расплав	79	21		
Алюминий-расплав	105	5		
Расплав-керамика			90	-17
Расплав-алюминий			95	-5
Расплав-титан			121	21
Расплав-сталь			137	37

При излучении УЗ колебаний в жидкие среды энергетически выгодно использовать материалы с меньшей плотностью (алюминий, титан и др.). При продольных колебаниях излучателя УЗ волна в расплаве испытывает затухание, распространяясь в пределах зазора  $\delta$ , и в значительной мере проходит в поверхность обрабатываемой детали при  $K_{пр} > 1$ .

Измерения УЗ эффекта в паяльной ванне показали, что коэффициент пропускания в значительной мере зависит от длины излучающего волновода, химического состава припоя и расстояния между излучающим и принимающим волноводом, но не зависит от температуры расплава [7].

УЗ металлизацию стеклокерамических материалов на основе керамики марок Т-80, Т-150, Т-260 и стекла проводили легкоплавкими оловянно-цинковым припоем ПОЦ 10 и экспериментально разработанным припоем состава Pb-Sn-Zn-In на основе свинца и олова с добавками цинка и индия в камере экспериментальной установки (рис. 3), где создавалось остаточное разряжение 1–10 Па. УЗ колебания амплитудой 10–15 мкм и частотой 22 кГц вводили в расплав с помощью излучателя в виде концентратора типа Фурье. Нагрев расплава осуществляли ИК излучением от двух галогенных ламп мощностью 1 кВт, расположенных в параболических отражателях. Напряжение на ИК лампы поступало от стабилизированного источника питания СИП, управляемого блоком управления БУ. Скорость ИК нагрева составляла 10–15°C/с. Температура расплава измерялась в рабочей зоне с помощью термопары типа ХК прибором В7-40.

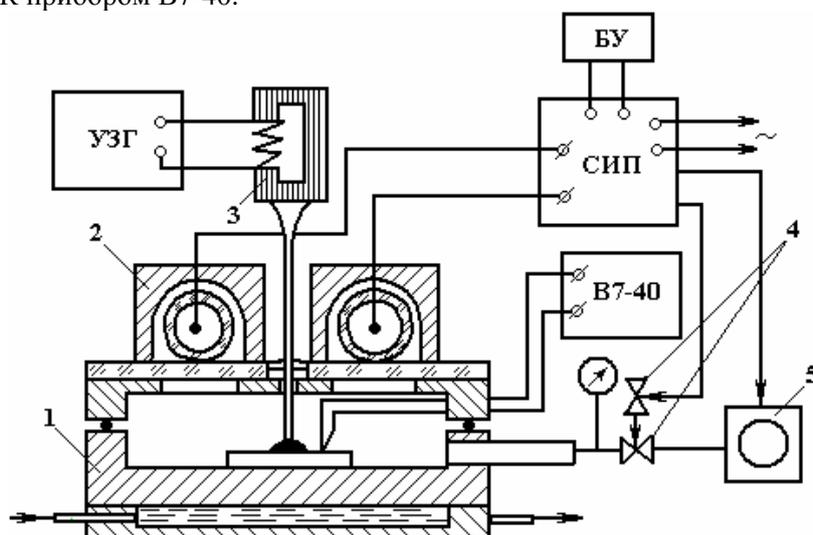


Рис. 3. Схема активации расплава энергией УЗ и ИК полей: 1 – камера, 2 – ИК нагреватель, 3 – УЗ преобразователь, 4 – краны, 5 – компрессор

Кавитационное давление в расплавах припоев оценивали с помощью кавитометра по величине спектральной плотности кавитационного шума в полосе частот 100–250 кГц [8]. Давление в кавитационной области воспринималось измерительным шупом с рабочей площадью 1,0 см<sup>2</sup>, соединенным с пьезоэлектрическим преобразователем упругим волноводом. Датчик снабжен нагревателем,

позволяющим поддерживать необходимую температуру воспринимающей поверхности измерительного щупа. Прочность соединений припоев с поверхностью стеклокерамики оценивали по напряжению отрыва с кратностью повторения опытов 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.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследовано влияние вида УЗ колебаний на величину кавитационного давления в расплавах припоев и на прочность соединений со стеклокерамическими материалами. Величины кавитационного давления в расплаве припоя при различных видах колебаний, вводимых в тонкий слой припоя размером 0,1 мм между излучателем и измерительным щупом, приведены в табл. 2.

Как показал 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.

Анализ зависимости величины кавитационного давления в расплаве припоя Pb–Sn–Zn–In от частоты (рис. 4) при УЗ активации показывает, что когда возбуждающая частота колебаний близка к резонансной частоте УЗ преобразователя, равной 43,5 кГц, то выходное напряжение УЗ 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 (3,0–3,5 кПа) отмечена на частотах, превышающих резонансную на 0,2–0,5 кГц. Это связано с тем, что в акустической системе преобразователь–согласующий элемент–излучатель возникает ряд гармоник и субгармоник основной частоты, которые способствуют развитию кавитационных процессов в расплаве.

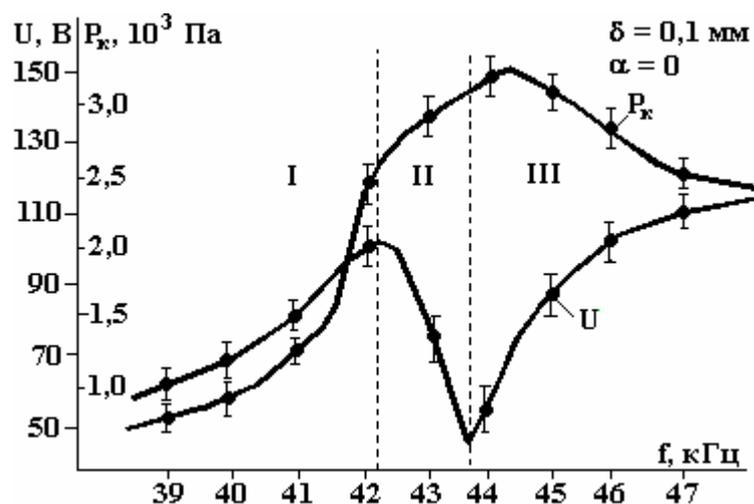


Рис. 4. Частотные зависимости УЗ напряжения на преобразователе и кавитационного давления в расплавах

Таблица 2. Кавитационное давление в расплаве для различных видов колебаний

Вид колебаний	Частота, кГц	Амплитуда колебаний, мкм	Кавитационное давление, кПа
Продольные	44	8–10	2,5–3,0
Поперечные	41	8–10	3,5–3,8
Крутильные	22	10–15	до 0,5
Продольные импульсные	44	10–15	3,5–3,7

Частотная зависимость кавитационного давления в расплаве припоя имеет три условно выделенные области: I – докавитационную, II – развитой кавитации, III – закавитационную, которая суще-

ственного значения в процессе пайки не имеет. Зависимости величины кавитационного давления в расплавах припоев 0,68Pb–0,1Sn–0,1Zn–0,1In–0,02 Sb (1) и ПОЦ 10 (2) от угла ввода излучателя в припой  $\alpha$  и зазора между торцом излучателя и измерительным щупом  $\delta$  приведены на рис. 5. Для полученных зависимостей характерно нелинейное падение кавитационного давления вследствие рассеивания и поглощения части УЗ 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. В ванне лужения величина кавитационного давления 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.

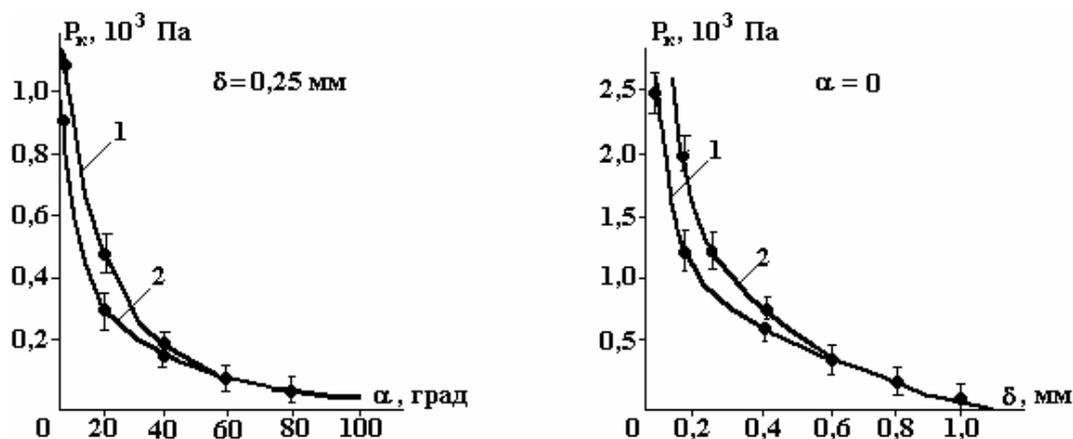


Рис. 5. Зависимости кавитационного давления в расплавах от угла ввода колебаний и величины зазора между торцом волновода и поверхностью

Кавитационное давление в припое увеличено путем применения импульсных колебаний с амплитудой в 1,5–2,5 раза, направленных нормально к поверхности детали и подаваемых в жидкий припой в сочетании с непрерывными колебаниями. После подачи УЗ импульса следовала 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 расплавах от скважности импульсных продольных колебаний и величины тока подмагничивания показало, что оптимальными условиями работы являются скважность 1,5–5 и ток подмагничивания 1,0–1,5 А. При большей величине тока подмагничивания магнотриксционный преобразователь входит в режим насыщения и амплитуда колебаний вследствие перегрева преобразователя не увеличивается.

Прочность соединений со стеклокерамикой припоев ПОЦ 10 и экспериментального Pb–Sn–Zn–In зависит от кавитационного давления в расплаве (рис. 6), причем максимальное значение прочности соединений при продольных колебаниях соответствует кавитационным давлениям 1,5–2,5 кПа. При больших или меньших уровнях кавитационного давления прочность соединений 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 УЗ колебаниях разрушение металлизированной поверхности близко по своему физическому смыслу к кавитационной эрозии паяемого металла. Во втором случае при малых уровнях кавитационного давления развитие кавитационных процессов не достигает порога смачивания, характерного для расплавов припоев.

Введение колебаний в припой параллельно паяемой поверхности стеклокерамического материала позволило увеличить прочность соединений припоя Pb–Sn–Zn–In с поверхностью не менее чем в 1,5 раза. Следовательно, возбуждение в припое таких колебаний в процессах УЗ пайки и металлизации предпочтительнее.

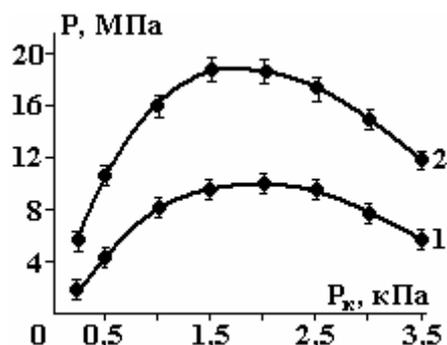


Рис. 6. Зависимости прочности соединений припоев со стеклокерамикой от кавитационного давления в расплавах припоев: 1 – ПОЦ 10; 2 – Pb–Sn–Zn–In

Влияние импульсных колебаний, направленных нормально к поверхности, на прочность соединений со стеклокерамикой исследовалось для припоев ПОЦ 10 и системы Pb–Sn–Zn–In, в расплавы которых вводили импульсы УЗ колебаний с амплитудой, в 1,5–3,5 раза превышающей амплитуду непрерывных колебаний. УЗ металлизацию стеклокерамических материалов вели с частотой импульсов 0–2,5 Гц. Средняя величина тока подмагничивания магнитострикционного преобразователя с резонансной частотой 44 кГц поддерживалась на уровне 4,5 А, что в 1,5 раза превышало ток подмагничивания в обычном режиме. При оптимальной частоте импульсов 1,5–2,5 Гц и амплитуде колебаний 10 мкм прочность соединений увеличилась в 1,7–1,8 раза. Дальнейшее увеличение частоты импульсов приводит к снижению прочности ввиду инерционности зарождения и развития кавитационных процессов в расплаве (табл. 3).

Прочность сцепления металлизации расплавами припоев с различными керамическими и стеклокерамическими материалами, применяемыми для изготовления конденсаторов постоянной емкости, зависит от содержания стеклофазы в материале. При значительном ее содержании (70–90 мас.%) прочность изменяется несущественно, поскольку отрыв металлизированного покрытия происходит по стеклокерамическому материалу.

Таблица 3. Прочность металлизации в МПа при различной частоте импульсов

Припой	Частота импульсов, Гц				
	0	1,0	1,5	2,0	2,5
Sn–10Zn	10,0	16,9	17,6	18,6	17,0
Pb – Sn– Zn–In–Sb	16,0	17,9	18,8	20,7	18,9

Как показали испытания металлизированных припоями ПОЦ 10 и Pb–Sn–Zn–In–Sb образцов на отрыв участка металлизации, разрушение происходит главным образом по телу стеклокерамики (рис. 7). Прочность соединений этих припоев со стеклокерамикой в 3–3,5 раза превышает прочность сцепления покрытий, нанесенных вжиганием серебряной пасты. Оловянно-свинцовые припои ПОС61 не обеспечивают достаточной прочности соединений, и при отрыве наблюдался адгезионный характер разрушения. При исследовании физико-механических свойств соединений, полученных УЗ металлизацией, установлено, что прочность со стеклокерамикой больше зависит от величины кавитационного давления в припое, чем от степени шероховатости поверхности [9].

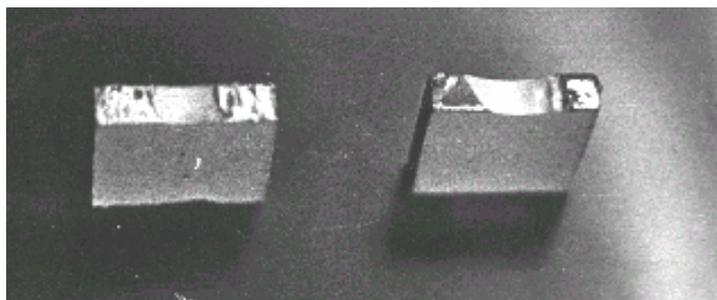


Рис. 7. Образцы стеклокерамики после испытания металлизации на отрыв

При исследовании зависимости прочности соединений от амплитуды УЗ колебаний установлено, что максимального значения (20 МПа) она достигала при амплитуде колебаний 10–12 мкм и времени обработки 15–20 с. При меньших амплитудах колебаний развитие кавитационных процессов не переходит порога смачивания, характерного для расплавов припоев, разрушение окисных пленок происходит не полностью. Амплитуда УЗ колебаний, равная  $3 \pm 0,5$  мкм, является пороговой для кавитационных процессов в расплаве оловянно-свинцового припоя. При амплитуде УЗ колебаний больше 15 мкм возникающие динамические импульсы вызывают деградацию приповерхностных слоев, расплав припоя «пылит» и интенсивно окисляется.

Электрофизические исследования паяных соединений, сформированных при воздействии на расплав УЗ колебаний показали, что переходное электрическое сопротивление снижается на 10–25% в зависимости от мощности и длительности их воздействия [10]. Это обусловлено ускорением диффузионных процессов между компонентами припоя и паяемым материалом и увеличением ширины переходной зоны с 1,5–2 до 5–7 мкм.

#### **Выводы**

Установлены закономерности и режимы металлизации керамических и стеклокерамических материалов при воздействии на расплавы припоев УЗ колебаниями: частота, амплитуда и вид колебаний, интенсивность кавитационного давления в расплаве, температурные и временные параметры процесса, составы припоев, обеспечивающие получение прочных и надежных соединений.

При локальном вводе УЗ колебаний в расплав в сочетании с ИК нагревом возможно сконцентрировать УЗ энергию в небольшом объеме и снизить окисление расплава. УЗ колебания, параллельные обрабатываемой поверхности, предпочтительны для повышения прочности паяных соединений, обеспечения стабильности процессов металлизации и уменьшения механического воздействия на обрабатываемые поверхности. Применение УЗ колебаний, параллельных паяемой поверхности, увеличило кавитационное давление в локальном объеме расплава в среднем в 1,4 раза, что способствовало формированию более прочных соединений.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Abramov O.V.* High-intensity Ultrasonics: Theory and Industrial. Amsterdam: OPA. 1998. 692 p.
2. *Faridi H. R., Devletian J.H., Le H.P.* New Look at Flux-Free Ultrasonic Soldering // *Welding Journal*. 2000. № 9. P. 41–45.
3. *Kolenak R., Zubor P.* Soldering of Ceramic Materials using Ultrasonic Energy // *Welding in World*. 2005. V. 49. № 9. P. 546–553.
4. *Lanin V.L.* Ultrasonic soldering in electronics // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2001. № 8. P. 379–385.
5. *Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И.* Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. М.: Энергия, 1980. 176 с.
6. *Шутилов В.А.* Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1980. 280 с.
7. *Lystrup A.* Measurement of the Ultrasonic Effects in an Ultrasonic Solder Bath // *Welding Journal*. 1976. V.55. № 10. P.309–313.
8. *Lanin V.L.* Cavitations Intensity Investigation at Ultrasonic Soldering // *Proc. Conf. Ultrasonics International*. 2003. 30 June–3 July 2003. Granada, Spain. 2003. P. 154–156.
9. *Ланин В.Л.* Ультразвуковая пайка и лужение в электронике // *Технологии в электронной промышленности*. 2009. №7. С. 24–29.
10. *Lanin V.L., Bondarik V.M.* Electrical resistance of soldering joints at effect of ultrasonic oscillations // *Proc. of the 20th Int. Conf. on Electrical Contacts*. 19–23 June 2000. Stockholm, Sweden. 2000. P. 205–208.

*Поступила 19.05.10*

#### **Summary**

Local input of the ultrasonic fluctuations parallel to processable surface, in melts in a combination with IR heating allows to concentrate activation energy in small volume, to reduce mechanical influence by processable surfaces, to lower melt oxidation and increase durability of soldering connections.