

# Ультразвуковая конструкционная сварка в технологии электроники

**Владимир Ланин**

**Выонг Хиену**

Ультразвуковая сварка является эффективным и экологически чистым процессом соединения пластичных металлов и пластмасс без значительного нагрева и деформации. Экспериментальными исследованиями установлены оптимальные технологические режимы сварки медных, алюминиевых и пластмассовых деталей.

## **Введение**

Ультразвуковая сварка (УЗС) является одним из перспективных методов соединения металлов и пластмасс. Благодаря целому ряду весьма ценных технологических свойств, например, возможности соединения разнородных и разнотолщинных металлов без снятия оксидных пленок, пластмассовых деталей она нашла свое применение в технологии электроники. УЗС термопластичных полимеров широко используется в промышленности. Без ультразвука невозможно дальнейшее совершенствование технологии сварки таких широко распространенных полимеров, как полистирол, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталатные пленки, а также осуществление новых, перспективных технологических процессов соединения материалов. УЗС позволяет соединять самые разнообразные металлы и полупроводники без их значительного нагрева или деформации, а также образования хрупких интерметаллических фаз. С помощью ультразвука свариваются алюминий и его сплавы, медь и её сплавы, никель, стали, золото, полупроводниковые материалы.

УЗС пластмасс и металлов основана на использовании энергии механических колебаний сварочного наконечника. Колебания совершаются с ультразвуковой частотой 20–44 кГц и амплитудой колебаний 5–50 мкм. Энергия в зону сварки вводится посредством сварочного усилия, которое находится в пределах  $(0,1-1,0)$  предела прочности свариваемого материала [1].

Процесс образования сварного соединения характеризуется сложным взаимодействием многочисленных и разнородных факторов. Это комплекс явлений, связанный с интенсивными процессами внешнего трения, повышения температуры в свариваемых материалах, растрескиванием твердых и выгоранием жировых пленок, повышением пластичности, сминанием микро- и макронеровностей, сближением контактирующих поверхностей на расстояния, близкие к межатомному, а также способами введения УЗ в зону сварки.

УЗС металлов обладает уникальными технологическими свойствами: возможность соединения без предварительной подготовки поверхности свариваемых деталей, незначительное оказываемое температурное воздействие на них, соединение термочувствительных элементов, сварка деталей разной толщины, а также разно-

родных металлов (медь-алюминий, алюминий-никель и др.). При УЗ конструкционной сварке достигается высокая прочность соединений. Процесс УЗС отличается высокой скоростью, экологической чистотой и экономичностью [2].

УЗ сварка используется при соединении медных многожильных проводов электропроводки, алюминиевой, медной и никелевой фольг в производстве литий-ионных аккумуляторов, медных проводников с контактами на керамической подложке в электронных модулях [3].

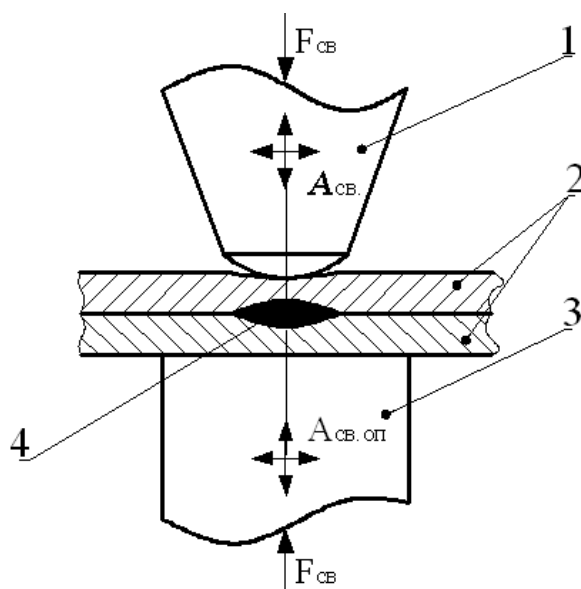
### **Физико-технологические основы УЗС**

В зоне контактирования сварочного наконечника со свариваемой деталью при УЗС происходят интенсивные процессы внешнего трения. Поверхности сварочных наконечников изготавливаются из материалов, обладающих минимальными адгезионными свойствами. Они должны обладать комплексом свойств, обеспечивающих упругое контактирование с поверхностью свариваемых материалов. В результате внешнего трения микронеровности сварочного наконечника упругопластически деформируются. При активации его поверхностного слоя часть энергии расходуется на преодоление сил молекулярно-адгезионного сцепления и на разрушение зон схватывания. При интенсивном макро- и микродеформировании поверхностей контактирования возникают потери на внутреннее трение. Физическая модель зоны сварки приведена на рис. 1 [1].

При УЗС процесс микродеформирования контактных зон свариваемого материала разрастается в макродеформирование, величина которого может достигать 0,5 и больше от толщины свариваемого материала и составлять величину в сотни микрометров. Объемное микродеформирование наружной поверхности детали ведет к чрезвычайному уплотнению смежных слоев материала, резкому возрастанию напряжений в металлах и внутренним потерям.

Реальной возможности образования сварного соединения только за счет энергии внутренних потерь микро- и макродеформирования нет. Внешнее трение может играть важную роль, обеспечивая относительное перемещение свариваемых поверхностей, дробление оксидных пленок, сминание макроповерхностей, контактирование свежечищенных участков, повышение температуры в зоне сварки, передачу энергии ультразвука в смежную зону и т.п.

Внешнее трение между контактирующими материалами в процессе УЗС по мере образования узлов схватывания и разрастания площади сварного соединения уменьшается. В зависимости от соотношения колебательных величин (смещений и напряжений), определяющих УЗ поле, меняются кинетические и структурные закономерности процесса.



**Рис. 1.** Физическая модель зоны сварки: 1 – волновод, передающий энергию в зону сварки, 2 – свариваемые детали, 3 – акустическая опора, 4 – зона сварки

Энергия, введенная в зону деформирования материалов в результате весьма сложного, многофакторного процесса превращается в теплоту. Пластичность металлов, а тем более полимеров с увеличением температуры резко повышается. При воздействии ультразвука это происходит значительно быстрее, при меньших контактных давлениях и температурах. Определяющими факторами при этом являются амплитуда колебаний и контактное давление как параметры, определяющие энергетические характеристики мощного ультразвука. Это положение иллюстрируется нарастанием температуры в зоне сварки и изменением глубины наружной деформации свариваемого материала. Глубокое пластическое деформирование по всей площади, превышающее высоту микронеровностей, которые в большинстве случаев составляют 0,5–25 мкм, может быть осуществлено только при установлении полного фактического контактирования по всей площади.

Основными технологическими параметрами режима сварки пластмасс и металлов являются амплитуда колебаний сварочного наконечника  $A_{св}$ , сварочное усилие  $F_{св}$  и время сварки. Мощность сварки с учетом эквивалентного сопротивления нагрузки, определится следующим образом [1]:

$$P_{св} = 0,5 \cdot 2\pi f A_{св}^2 R_{экр} k_1, \quad (1)$$

где  $R_{экр}$  – усредненное эквивалентное сопротивление нагрузки,

$f$  – частота колебаний,

$k_1$  – обобщенный коэффициент связи системы с нагрузкой.

Сопротивление нагрузки является следствием взаимодействия разнородных факторов: изменения свойств свариваемых материалов и поверхностных пленок, поверхности волнового фронта, характера контактирования сварочного наконечника с

детальями и деталей между собой и опорой и т.п. и зависит от контактного давления сварочного наконечника на свариваемые материалы.

Эквивалентное сопротивление нагрузки может быть связана со сварочным усилием посредством обобщенного безразмерного коэффициента  $k_2$

$$R_{\text{экв}} = k_2 F_{\text{св}}, \quad (2)$$

где  $k_2$  – коэффициент, учитывающий особенности колебательной системы, ее потери, характер сопротивления нагрузки.

Используя уравнения (1) и (2), получим выражения, связывающие мощность сварки с усилием сварки, частотой и амплитудой колебаний:

$$P_{\text{св}} = 2(\pi f A_{\text{св}})^2 k_1 k_2 F_{\text{св}}. \quad (3)$$

При заданной мощности с увеличением амплитуды колебаний контактное усилие, которое можно приложить к сварочному наконечнику, снижается. Расчет параметров механической колебательной системы и режимов сварки связан с анализом физико-механических свойств свариваемых материалов, которые определяют сопротивление нагрузки в зоне сварки и требуемую мощность генератора.

### Оборудование ультразвуковой сварки

Для УЗС применяют сварочные установки, которые работают совместно с УЗ генераторами. УЗ установка Branson 2000Xc (рис. 2,а) обеспечивает программное управление технологическим процессом сварки, а качество сварного шва удовлетворяет потребностям современных изделий электроники. Компьютер позволяет защитить систему с иерархическим паролем, а также подключить к интернету [4].



Рис. 2. УЗ сварочные установки Branson 2000Xc (а) и TELSOSPLITE (б)

УЗ сварочная установка TELSOSPLICE компании TELSONIC AG (Швейцария) (рис. 2,б) используется для сварки медных и алюминиевых многожильных проводов сечением 0,2–45 мм<sup>2</sup>. Установка имеет программное управление посредством сенсорного экрана, контроль всех параметров сварки, возможность подключения в общую сеть предприятия. Компоненты УЗ сварочной системы: УЗ генератор, контроллер, промышленный компьютер, сенсорный дисплей и сварочный модуль [5].

Характеристики установок УЗ сварки приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики УЗ установок сварки

Характеристики	Branson 2000Xc	TELSOSPLICE
Давление сжатого воздуха, бар	6–7	7 - 10
Частота, кГц	20, 30, 40	20
Выходная мощность, кВт	0,75, 0,8, 1,25, 2,5, 4,0	3,0
Максимальное усилие, кН	0,578–1,96	
Пользовательский интерфейс	Сенсорный экран, LCD	Сенсорный экран
Питаемое напряжение, В	200–240	380

Система УЗ торсионной сварки пластмасс SONIQTWIST компании TELSONIC AG сочетает в себе технологии вибрационной и УЗ сварки и позволяет решить производственные задачи, не решаемые традиционной УЗ сваркой. Сварочные машины TSP предназначены для УЗ торсионной сварки как пластика, так и металла по заранее сформированному контуру. Отличительная особенность машин (рис. 3,а) – это 5 режимов УЗ сварки (время, энергия, относительное и абсолютное перемещение, выходная мощность); модульная структура; программируемый интерфейс и высокая жесткость конструкции.

УЗ сварочная машина Electrical Motion компании Rinco Ultrasonics с частотой 20 кГц и максимальным усилием 3,0 кН (рис. 3,б) подходит для technically сложных операций сварки термопластичных изделий, а также для операций сварки и резки синтетических текстильных материалов. Машина позволяет точно регулировать параметры сварочного усилия, скорости и амплитуды колебаний, запоминать 8 режимов сварки и отображать их на 12" сенсорном ЖК-экране [6].

Образцы сварки пластмассовых деталей представлены на рис. 4.



а



б

**Рис. 3.** УЗ сварочный пресс TSP 3000 (а) и сварочная машина Electrical Motion (б)



**Рис. 4.** Сварка пластмассовых деталей

### **Исследования процесса УЗ конструкционной сварки**

Установка для УЗ конструкционной сварки деталей включает УЗ генератор УЗГ 3-0,4, УЗ пистолет УЗСП2-0,2-С, частотомер ЧЗ-67А и индикатор вибраций ИВК-3 (рис. 5). Индикатор вибраций предназначен для измерения амплитуды колебаний УЗ инструмента и настройки в резонансные режимы УЗ технологических систем. Методика УЗ конструкционной сварки деталей включает следующие этапы:

- выбор УЗ концентратора сварочного инструмента и расчет коэффициента усиления амплитуды колебаний,
- настройка УЗ генератора на резонансную частоту колебаний инструмента в диапазоне 40–45 кГц при выходном напряжении генератора 110–120 В и токе подмагничивания преобразователя 2–4 А,
- создание УЗ пистолетом контактного усилия на свариваемые детали величиной 50–100 Н в зависимости от толщины деталей,
- УЗ сварка деталей в течение 5–10 с,
- контроль прочности сварных соединений методом нормального отрыва.



**Рис. 5.** Устройство УЗ сварки

Результаты расчета полуволновой длины и коэффициентов усиления различных концентраторов на частоте 40 кГц для материала концентратора – сталь 45 ( $c = 5169$  м/с) приведены в табл. 2.

При настройке сварочного пистолета на резонансную частоту, необходимо, вращая ручку ЧАСТОТА генератора, получить на индикаторе вибраций максимальное значение амплитуды колебаний. Амплитуда колебаний оценивается с помощью пьезоэлектрического датчика, закрепленного на волноводе сварочного пистолета в пучности колебаний.

**Таблица 2.** Параметров концентраторов для УЗ пистолета

Тип концентратор	Длина, мм	Коэффициент усиления
Конический	65	3,6
Экспоненциальный	65	10
Катеноидальный	65	20

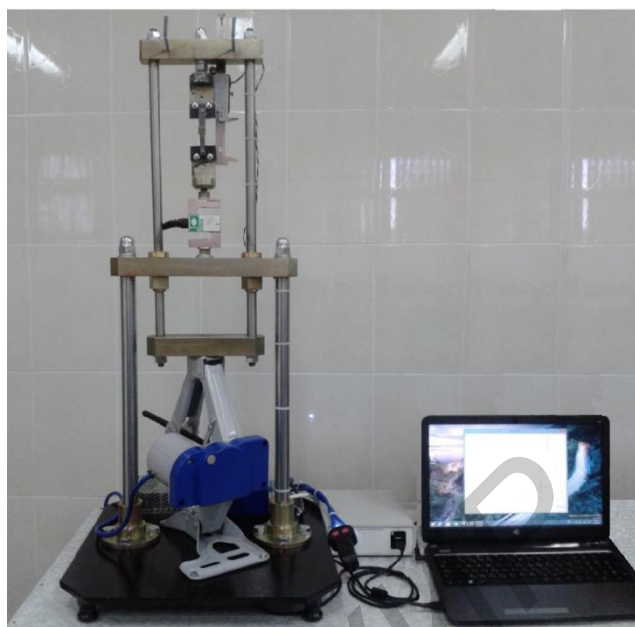
Прочность сварных соединений в диапазоне 0,5–25 Н оценивалась с помощью адгезиометра (рис. 6,а), а в диапазоне 100–1000 Н – на разрывной машине НТЦ 13.04.05 (рис. 6,б) при скорости движения нижнего захвата  $10 \pm 0,1$  мм/мин. Запись кривой растяжения и определение усилия разрыва соединений осуществлялось с помощью компьютера.

На рис. 7 показаны зависимости амплитуды вибрации от частоты колебаний сварочного пистолета и выходного напряжения УЗ генератора. В диапазоне частот колебаний 41 – 43 кГц амплитуда вибрации достигает максимального значения (16 – 23 мкм). Это диапазон является оптимальным для проведения процесса УЗ сварки деталей.



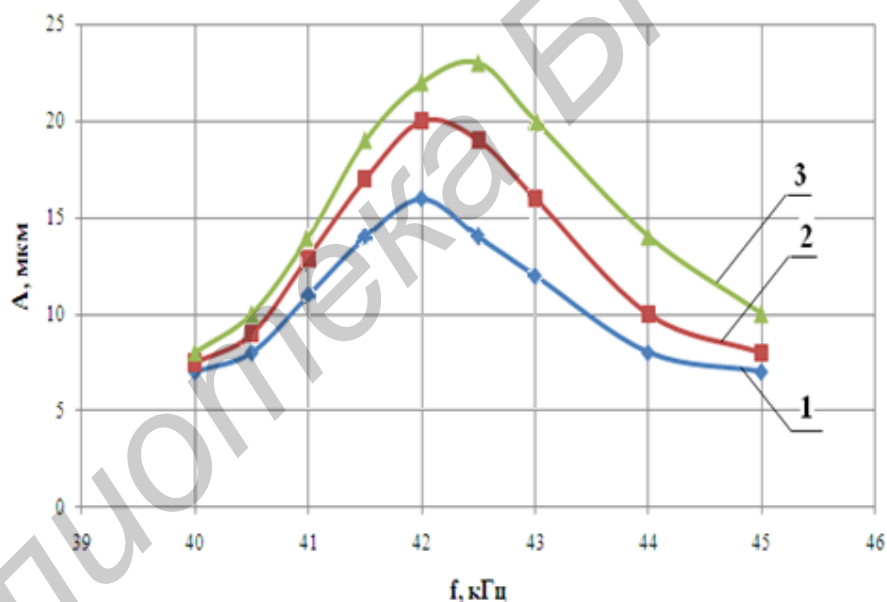


а



б

**Рис. 6.** Адгезиометр (а) и машина разрывная УЗ 13.04.05 (б)

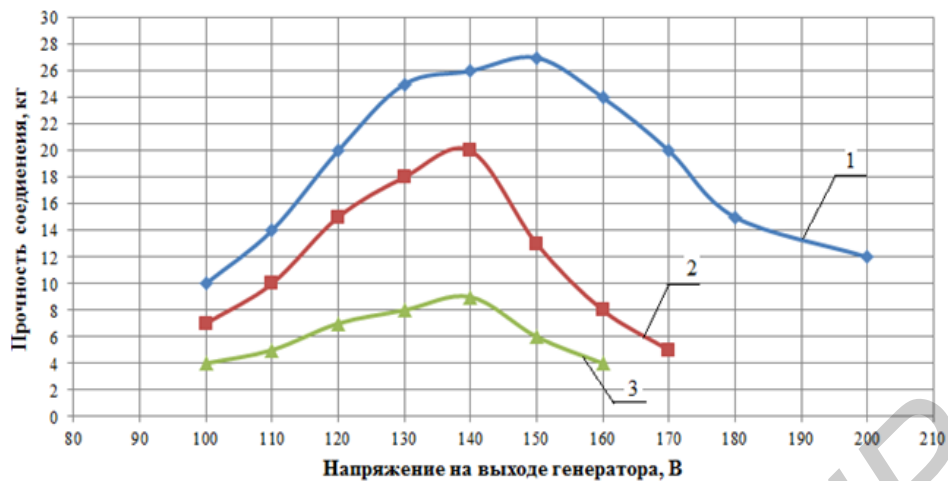


**Рис. 7.** Зависимости амплитуды вибрации от частоты при напряжении выхода генератора: 1– 100 В, 2– 120 В, 3– 150 В

На рис. 8 приведены зависимости прочности соединения от напряжения на выходе генератора при УЗ сварке деталей толщиной 100 мкм и времени сварки – 5с. Оптимальная прочность соединений получена при напряжении на выходе генератора, равном 130–150 В.

С увеличением выходного напряжения свыше 150 В прочность соединений уменьшается, что объясняется тем, что в свариваемых деталях создаются внутренние напряжения. При одном и том же напряжении на выходе генератора прочность соединения у меди, как более пластичного металла, больше чем у алюминия.





**Рис. 8.** Зависимости прочности соединения от напряжения на выходе генератора: 1 – медь; 2 – алюминий; 3 – стеклотекстолит толщиной 1 мм

### Заключение

УЗ конструкционная сварка перспективна для соединения разнородных и разнотолщинных металлов и пластмасс без снятия оксидных пленок в технологии электроники. Это позволяет исключить расходные материалы (клеи, растворители и др.), повысить производительность труда и обеспечить экологическую чистоту технологического процесса. В настоящее время для УЗ сварки производится значительное количество сварочного оборудования с возможностями точечной и шовной сварки, программным управлением процессом. В серийном производстве экономически оправдано использование автоматизированных сварочных машин с точной регулировкой технологических параметров. В мелкосерийном и опытном производстве будут востребованы полуавтоматические и ручные установки сварки, где требуется ручная настройка режимов сварки.

### Литература

1. Холопов Ю. В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л.: Машиностроение, 1988.
2. Петушко И.В. Оборудование для ультразвуковой сварки. Санкт-Петербург: ОАО «Андреевский издательский дом», 2007.
3. Сафонов В. Применение ультразвуковой сварки в электронике и электротехнике // Технология в электронной промышленности. 2013. № 8 .
4. Branson. <http://www.emersonicindustrial.com>.
5. Telsonic Ultrasonics. <http://www.telsonic.com>.
6. Rinco Ultrasonics. <http://www.rinco-usa.com>.