

# Сварить или склепать?

## Что на самом деле происходит при ультразвуковой сварке

Каждый год в мире производится более 4 трлн проволочных соединений, выполненных ультразвуковым методом в полупроводниковых приборах. Несмотря на свою долгую 60-летнюю историю, этот нелепый «бондинг» по-прежнему используется в 50 млрд ежегодно выпускаемых интегральных схем и бесчисленных дискретных приборах. Каждые десять лет появляется очередная технология — «убийца УЗ-сварки». После оваций, статей и вручения премий за инновации (и банальной раскрутки промышленных гигантов на финансирование НИОКР) подобное новое изобретение благополучно дополняет имеющийся арсенал, а сотни тысяч установок продолжают мирно вышивать узоры из драгоценных нитей. Понимание основ процесса по-прежнему актуально для специалистов отрасли и останется таковым еще долгие годы, наряду с C4, FC, TAB, TSV и другими методами интеграции полупроводниковых компонентов в современном корпусировании.

Сергей Валев

valev@ivtec.ru

Илья Корочкин

ik@global-smt.ru

В отличие от механических процессов («отсюда взять — туда положить») и чистой физики («нагреть — припаять») присоединение выводов ультразвуком всегда считалось непонятной и сложной операцией, в ней всегда было немного магии. Почему необходимо понимать, как протекает процесс соединения проволоки и контактной площадки? Каким образом при минимальной деформации обеспечить максимальную надежность контакта? Есть ли четкие критерии выбора частоты УЗ-колебаний для работы с тем или иным материалом? Многие предприятия пробуют перевести свой процесс сварки с традиционных 60 на 100 или 140 кГц, экспериментируют с новыми материалами и режимами, но часто сталкиваются с неоднозначными результатами. Поэтому понимание физических основ процесса по-прежнему важно. В преддверии выхода на российский рынок нового (шестого) поколения автоматов ультразвуковой сварки своим опытом готовы поделиться эксперты F&K Delvotec Bondtechnik GmbH — производителя первой

в мире автоматической установки УЗ-присоединения проволочных выводов.

**Краткое описание процесса.  
Как можно перемешать металлы  
без плавления и где взять лишнее время,  
если не успел этого сделать**

Вероятно, нелишне напомнить, какие стадии процесса существуют при формировании сварного соединения, и представить его современную физическую модель. На рис. 1–3 схематично показаны три стадии формирования соединения методом «клин-клин». При этом рассмотренные далее базовые принципы справедливы и для более громоздкого в описании метода «шарик-клин».

В момент соприкосновения проволоки с поверхностью контактной площадки (подложки) начинается передача колебаний пьезопреобразователя в точку контакта инструмент-проволока-подложка с амплитудой порядка нескольких микрон (1–2 мкм для тонкой и 3–5 мкм для толстой проволоки). Важно отметить, что пара проволока-инструмент на этой стадии колеблется синхронно, как единая система. Таким образом, физическое перемещение (притирка) происходит только по границе проволока — контактная площадка. Для стабильной передачи колебаний в этой системе крайне необходимо отсутствие случайных проскальзываний проволоки в инструменте, то есть трение в паре инструмент-проволока должно быть намного выше, чем в паре проволока-подложка. Для этого нижняя поверхность инструмента должна слегка деформировать проволоку, «впечатываясь» в нее. В регулируемых настройках оборудования любого производителя найдется «сила прижима» (Bond Force). Как будет показано ниже, это самый важный

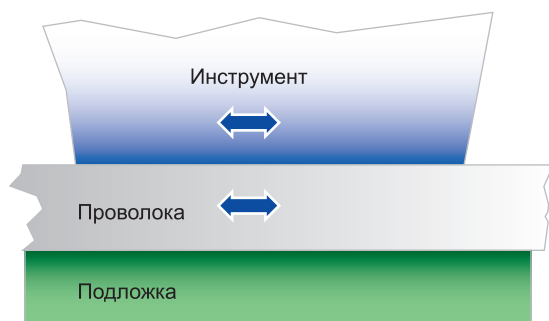


Рис. 1. Первая стадия формирования сварочного соединения

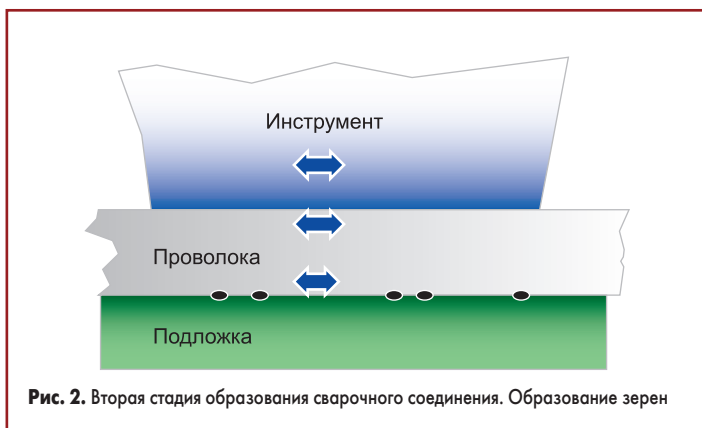


Рис. 2. Вторая стадия образования сварочного соединения. Образование зерен

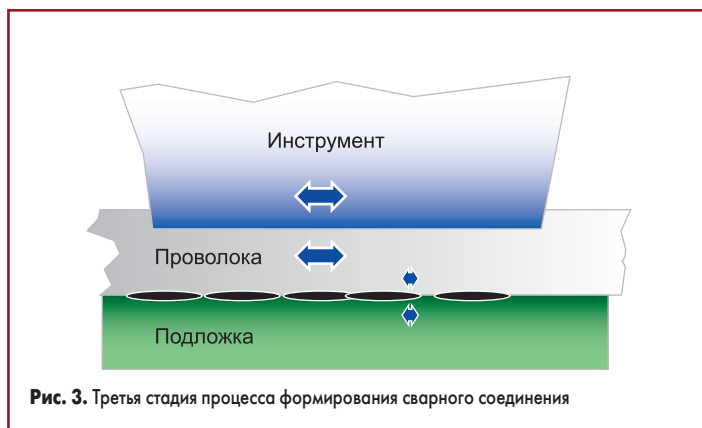


Рис. 3. Третья стадия процесса формирования сварного соединения

параметр при формировании соединения, который подбирают для конкретного типа проволоки, ее диаметра и характера подложки.

Следует подчеркнуть, что эта первая фаза процесса уже создает предпосылки для получения того или иного результата:

- Насколько точно оборудованием определен момент контакта с подложкой? Поскольку от момента касания начинается отсчет заданной длительности УЗ-колебаний, в случае определения «ложного касания» колебания в системе могут прекратиться раньше, чем будет получено качественное соединение.
- Правильно ли выбран инструмент? Все металлы, используемые для получения соединений, имеют свои особенности, и это отражается на материале, из которого сделан инструмент, и форме контактирующей с проволокой поверхности. Например, для сварки золотой проволокой она часто выполняется с рельефом в форме поперечной борозды или перекрестия. Для проволоки разных диаметров и жесткости подбирают индивидуальные радиусы входа и выхода проволоки, шероховатость поверхности инструмента и т. д. Любой инструмент для ультразвукового присоединения проволочных выводов имеет свыше 40 индивидуальных контролируемых параметров, измеряемых в сотых и тысячных долях миллиметра, что в конечном итоге объясняет его высокую цену. И конечно, усугубляет боль ошибок при его выборе.

Итак, в течение первых миллисекунд происходит трение проволоки вдоль поверхности контактной площадки, приводящее к очистке трущихся поверхностей от загрязнений и оксидов. В случае сварки алюминиевой проволокой процессу очистки помогает тот факт, что чистый алюминий всегда покрыт твердой, но хрупкой оксидной пленкой ( $Al_2O_3$  — основной керамический материал). При УЗ-воздействии, сочетающем давление и колебания, этот тонкий слой мгновенно разрушается, и его твердые частицы быстро обнажают кристаллическую решетку чистого металла, однако не повреждают ее в силу малого размера абразивных частиц оксида алюминия. Эффект «нанотерки» объясняет, почему для качественной сварки алюминиевой проволокой достаточно комнатной температуры. В ходе сварки золотой проволокой, где такого

абразива не возникает, для быстрой активации поверхностей требуется нагрев, как правило, до  $+(110...130)^\circ C$ .

После того как кристаллические решетки касающихся друг друга металлов пришли в тесное соприкосновение, начинается взаимодействие металлов на межатомном уровне (рис. 2). Металлы проволоки и подложки перемешиваются и образуют общие островки интерметаллических зерен вдоль границы раздела.

Появление зерен меняет характер движения проволоки, поскольку она теперь не представляет собой единую жесткую структуру, в которой верхняя и нижняя поверхности движутся в унисон механическим колебаниям инструмента. Нижняя поверхность проволоки все больше связывается и замедляется, в то время как верхняя продолжает колебаться: происходит деформация проволоки (сопутствующие процессы перекристаллизации и появление дислокаций атомной решетки в данной статье не рассматриваются). Нужно заметить, что в отличие от пластической, эластическая составляющая деформации в проволоке крайне мала в такой момент, поскольку разница в амплитудах перемещения верхней и нижней поверхностей проволоки составляет порядка 1 мкм при толщине 20–30 мкм, а это на порядок превышает предел эластической деформации металла.

Стрелками на рис. 1–3 схематично показана результирующая амплитуда колебаний в системе. По мере образования и роста зерен разница в амплитудах колебаний верхней и нижней поверхностей проволоки по сравнению с начальной фазой процесса становится все больше. Начинается уменьшение амплитуды колебаний всей системы, включая и колебания конца инструмента, в силу демпфирующего воздействия на него формирующегося сварного соединения. Поскольку УЗ-воздействие на точку контакта продолжается, зерна разрастаются и в идеальном случае постепенно занимают всю площадь контакта. В какой-то момент движение нижней поверхности проволоки по подложке прекращается. Фактически теперь начинает колебаться не проволока, а пара нижняя поверхность проволоки — подложка, хотя и с гораздо меньшей амплитудой, чем исходная пара проволока-подложка (обозначено парой маленьких стрелок на рис. 3).



Рис. 4. Настольные универсальные установки F&S Bondtec: а) серия 58XX; б) серия 56XX

В процессе увеличения площади зерен сварного соединения инструмент, давящий на проволоку, деформирует ее, при этом толщина области под инструментом уменьшается, а ширина получающегося соединения — увеличивается. Деформация соединения может отслеживаться как функция смещения по оси Z в реальном времени, что дает надежный инструмент для контроля качества соединения с введением таких понятий, как «величина деформации по истечении заданного времени сварки» и «скорость нарастания деформации». Наличие подобных систем характерно для оборудования высокого уровня, предназначенного для производства изделий специального назначения. В своем базовом варианте система контроля деформации (DLC) доступна уже на полуавтоматических настольных установках F&S Bondtec серии 56XX и 58XX (рис. 4).

В процессе работы система ведет постоянный мониторинг деформации и сравнивает результаты с полем допустимых значений. В случае отклонения параметров процесса от допустимых установка может либо отметить это отклонение в журнале работы, либо остановить свою работу до вмешательства оператора.

Интеллектуальная система ВРС, предлагаемая на установках серии G5, идет несколько дальше констатации фактов и сбора статистики. Поскольку при крупносерийном производстве нереально звать на помощь оператора в каждом случае отклонения от эталона, система ВРС не только наблюдает, но и активно управляет процессом. В установках F&K Delvotec G5 (рис. 5) данные о деформации, получаемые в реальном времени, составляют управляющую часть системы с обратной связью и служат для повышения или снижения мощности и длительности УЗ-сварки при отклонении реального характера деформации от заданного пользователем.

Таким образом, система ВРС помогает в тонкой настройке процесса сварки каждого соединения «на лету» и предотвращает недостаток или избыток энергии, переданной в ходе процесса в точку сварки. Если вспомнить о важности определения момента касания, то в некоторой степени ВРС компенсирует неизбежные на этом микроуровне погрешности, в режиме реального времени «загоняя» процесс каждой сварки в отведенные ему рамки. Без этой системы, особенно при работе с гибридными схемами и модулями, погрешности в определении точки касания приводят к большому разбросу параметров прочности (то есть снижению ресурса изделия до момента отказа слабейшего из них), а в худшем случае — к слабым или, наоборот, «пережаренным» соединениям и отказам уже в ходе приемочных испытаний.

В особенности важна функция управления длительностью процесса. Дело в том, что этот параметр по умолчанию устанавливают «с запасом», чтобы дать возможность соединению полностью сформироваться. Избыточное УЗ-воздействие обычно связано с металлургическим отпуском и рекристаллизацией соединения, при которых не происходит дальнейшей

деформации проволоки. Вернемся к схеме третьей фазы соединения (рис. 3), где колебания охватывают всю систему, с большей амплитудой у инструмента и меньшей — у подложки. Фактически вместо одной системы появляются две пары, колеблющиеся с разной амплитудой. Градиент амплитуды колебаний в проволоке (вверху больше, внизу меньше) вызывает в материале проволоки холодную пластическую деформацию, называемую нагартовкой (наклепом). Нагартовка помогает «полезным» дислокациям кристаллической решетки, которые возникли как зерна вдоль поверхности раздела металлов, распространиться глубже в структуры составных металлических слоев, сильнее привязывая проволоку к подложке. В теории это должно увеличить ресурс соединения. Примером использования такого процесса в «большой» металлургии является холодная прокатка, галтовка и т. п. Важно, что нагартовка происходит при температурах ниже температуры рекристаллизации (начиная от комнатной и до 1/2 температуры плавления) и выражается в образовании округлых зерен металла на месте вытянутых и деформированных.

Грань, за которой избыточная нагартовка приводит к образованию микротрещин, разрывов кристаллической решетки и повышенной хрупкости соединения, очень тонка. Округлая форма новообразованных металлических зерен в соединении немного увеличивает содержание пор и снижает общую плотность, и избыточная длительность УЗ-воздействия может привести к отказам уже после начала эксплуатации прибора. Оценить степень структурных изменений в каждом индивидуальном соединении, конечно, невозможно и оперировать приходится только косвенными методами оценки и воздействия на этот микропроцесс. Алгоритм работы системы ВРС в F&K Delvotec G5 предусматривает возможность управления длительностью сварки и мощностью УЗ-воздействия, что определяет интегральную энергию всех импульсов колебаний, приложенную к каждой конкретной точке. Графически данная энергия может быть представлена как площадь фигуры под кривой деформации (рис. 6).

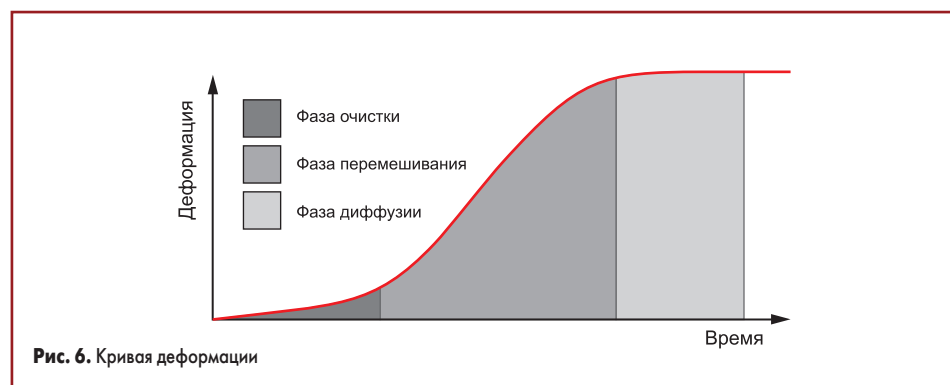
То, что мы имеем возможность с помощью системы ВРС и (главное!) без участия оператора поднимать-опускать (мощность) и удлинять-укорачивать фигуру, изменяя ее площадь, объясняет эффект значительного улучшения «критических для качества» ха-



**Рис. 5.** Универсальный автомат пятого поколения F&K Delvotec G5

рактеристик процесса (таких как Crk), что и предопределило широкую популярность оборудования F&K Delvotec у производителей автомобильной электроники, специальной техники и авионики.

Заметим, что до сих пор, говоря о процессе, который в русском языке называется «сварка», ни разу не было упомянуто ни плавление, ни даже повышение температуры в зоне соприкосновения металлов как результат трения проволоки о подложку. Действительно, несмотря на огромные усилия, затраченные исследователями, нагрев и его влияние на результат сварки до сих пор не удается измерить и оценить достоверно. Попытки увидеть микроскопические зоны расплавленного металла в микрошлифах соединений также пока не привели к успеху. Довод о том, что «видимо, эти зоны есть, просто они очень малы», опровергается любопытным опытом по успешному проведению ультразвуковой сварки при температурах порядка  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (состояние жидкого азота). Если бы образование соединения было связано с плавлением металлов, понижение температуры окружающей среды на  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  наверняка сильно повлияло бы на принципиальную возможность получения такого соединения. Во внешнем мире, кстати, этот процесс называют не сваркой, а обозначают термином «бондинг» (bonding), то есть «присоединение, прикрепление, спайка». Возможно, с развитием несырьевых секторов отечественной промышленности термин «бондинг» приживется и у нас.



**Рис. 6.** Кривая деформации

Описанная модель соединения кристаллических решеток металлов без нагрева и плавления сначала вызывает сомнения, особенно концепция «жесткой сцепки» проволоки с рабочим инструментом в ходе всего процесса. Гораздо проще представить себе, что на последних стадиях процесса (как только проволока «прилипает» к подложке) инструмент начинает скользить по проволоке, а не изменяет волшебным образом ее внутреннюю структуру. Другими словами, мы утверждаем, что инструмент, ухватив проволоку «за спину», перемещивает с ее помощью структуру кристаллической решетки в области контакта с подложкой без ее плавления (фазового перехода в жидкое состояние и обратно). Однако есть еще как минимум три довода в пользу такой модели:

1. Путем уменьшения силы прижима инструмента (одного из главных параметров, см. выше) мы можем специально ослабить контакт между ним и проволокой уже после начала образования соединения. При этом инструмент начинает именно «скользить» вдоль проволоки в то время, как уже образовавшиеся зерна соединения удерживают ее на подложке. Такое проскальзывание инструмента приводит к появлению обожженных участков на проволоке вследствие перегрева трением об инструмент. При увеличе-

нии прижима до нормального значения этот эффект полностью исчезает, следовательно, при образовании соединения инструмент не скользит по проволоке даже после того, как она прочно соединяется с подложкой.

2. Весьма часто проявляется эффект отслоения («вырывания») металлизации контактной площадки в силу слабой адгезии или дефекта самой подложки. При этом отслоившаяся металлизация и проволока остаются связанными прочным соединением. Если в паре проволока-подложка не происходит колебаний малой амплитуды после образования прочного соединения (сама проволока и подложка находились бы после образования соединения в покое, а колеблется только инструмент, скользя по верхней поверхности проволоки), что тогда вызывает отрыв металлизации?
3. Модель формирования соединения подтверждается экспериментом и наблюдением. С развитием технологий микровидеоосъемки стало возможным провести детальный анализ процесса ультразвукового соединения металлов. В частности, когда в институте IZM (общество Фраунгофера) в Берлине группы Ланга и Шнейдера-Рамелю провели исследования замедленной съемки процесса при высоком увеличении, была зафиксирована вся последовательность стадий обра-

зования соединения, описанная выше, начиная с синхронного движения инструмента и проволоки по подложке и заканчивая эффектом уменьшения амплитуды колебаний от инструмента к подложке при сохранении ее колебаний меньшей амплитуды уже после образования соединения на стадии нагартовки. Еще одним подтверждением стали и результаты, полученные на лазерном измерителе вибрации, с помощью которого удалось проанализировать амплитуду и частоту колебаний на конце инструмента, проволоке и контактной площадке от начала и до конца процесса.

Во второй части статьи мы поговорим о том, почему при выборе оптимальной частоты ультразвука необходимо учитывать тип материалов, с которыми предполагается работать.

*Продолжение следует*

#### Литература

1. Sedlmair J., Schlicht F., Farassat F. Which Frequency is Best for Wire Bonding? [www.fkdelvotec.com/fileadmin/media\\_fuk/dokumente/160809E\\_TN\\_15\\_01\\_Frequency.pdf](http://www.fkdelvotec.com/fileadmin/media_fuk/dokumente/160809E_TN_15_01_Frequency.pdf)