

# Ультразвуковая сварка силовых приборов

## плоской алюминиевой лентой (HARB): эффективность, производительность и некоторые проблемы

Сергей Валев

valev@ivtec.ru

### Предпосылки и история возникновения HARB

Ультразвуковая сварка толстой проволокой — традиционный процесс, используемый в производстве силовой электроники уже многие годы. В качестве «стандартного» материала на рынке имеется проволока диаметром до 500 мкм, при этом в силу большей технологичности в производстве используется проволока среднего диаметра — 200–375 мкм. Такое построение процесса позволяет проводить сварку с поворотом (получать так называемые S-образные петли), получать непрерывные швы (петли с несколькими сварными точками) для лучшего теплоотвода.

Однако с увеличением мощности силовых приборов, уменьшением габаритов их корпусов и усложнением схемотехники, с середины 1980-х годов производители силовых модулей стали широко применять соединения параллельными петлями и швами (рис. 1). Безусловно, это ухищрение позволило повысить надежность и мощность силовых приборов. Обратной стороной медали явилось катастрофическое снижение производительности установок ультразвуковой сварки, так как теперь приходилось варить вместо одной петли несколько параллельных. Стоимость операции ультразвуковой сварки в производстве заметно повысилась. Целью производителей оборудования стало создание установки, которая могла бы проводить сварку плоской лентой, имеющей существенно большую площадь сечения, чем круглая проволока. Плоская лента уже давно применяется в некоторых классах электронных изделий, в основном — в СВЧ-

технике, где толщина ленты варьируется в пределах десятков микрон, а материалом является золото.

Эксперименты с толстой алюминиевой лентой начались с выходом на рынок гибридных автомобилей. Мощность электрических силовых установок в них достигает десятков киловатт, и применение стандартного процесса сварки проволокой потребовало бы нескольких часов работы сварочной установки для производства каждой единицы изделия.

Разумеется, производители стандартных силовых модулей с энтузиазмом восприняли новинку и в кооперации с поставщиками проволоки и установок сварки начали разрабатывать стандарты для процесса сварки лентой. Сегодня более-менее установившимся является стандарт размера ленты: ширина 2000 мкм и толщина 200 мкм. Площадь сечения такой ленты — 0,4 мм<sup>2</sup>, что эквивалентно двум петлям из проволоки диаметром 500 мкм, (площадь сечения которой составляет 0,196 мм<sup>2</sup>). Второй типоразмер ленты той же ширины толщиной 300 мкм заменит три такие петли. Технология УЗ-сварки плоской алюминиевой лентой для силовых приборов получила наименование HARB (Heavy Aluminum Ribbon Bonding).

Проиллюстрировать потенциальный выигрыш от использования ленты при УЗ-сварке можно следующим образом: кристалл разваривается тремя петлями проволоки толщиной 400 мкм, которые занимают на кристалле площадку шириной минимум 2,5 мм. Лента шириной 2000 мкм при меньшей занимаемой площади имеет большую площадь сечения. Время сварки лентой приблизительно равно времени сварки проволокой, таким образом, использование лен-

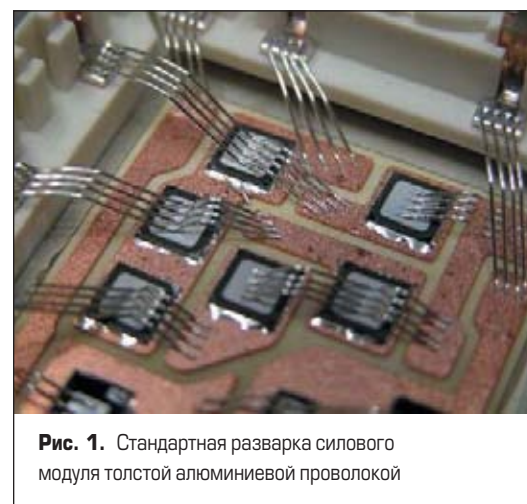
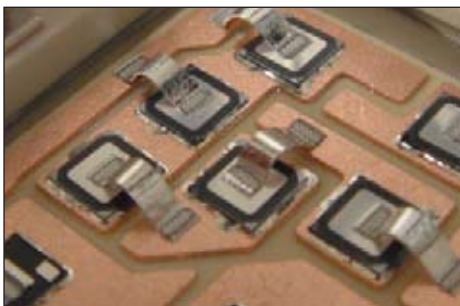


Рис. 1. Стандартная разварка силового модуля толстой алюминиевой проволокой



**Рис. 2.** Тот же модуль, что и на рис. 1, разваренный по HARB-процессу. Производительность увеличена в среднем в 3 раза

ты обещает быть втрое более эффективным (рис. 2).

Помимо большей производительности и площади сечения, использование плоской ленты имеет еще несколько технологических преимуществ:

- большая площадь контакта с контактной площадкой, меньшая площадь боковых наплывов алюминия («ушей»);
- возможность получать петли сверхмалой высоты (рис. 3);



**Рис. 3.** Петли сверхмалой высоты

- меньшее структурное повреждение в месте изгиба петли (наиболее слабое место петли — это ее изгиб непосредственно за сварной точкой, поскольку в месте сварной точки происходит термическая модификация материала проволоки, а в месте изгиба этот модифицированный в процессе сварки алюминий встречается со старой немодифицированной структурой проволоки, «сгоняя» в изгиб все примеси и структурные дефекты. В довершение всего, сварочная головка при формировании петли изгибает проволоку, добавляя механические напряжения в структурно поврежденный участок);
- возможность получения лучших «шовных» соединений, чем при использовании проволоки.

Из перечисленных преимуществ, пожалуй, самым важным является меньшее структурное повреждение места изгиба. Особенно это важно при наличии петель с большим реверсным движением головки (например, в случае, когда имеется большой перепад высот между первой и второй точками сварки). Это позволяет получать практически вертикальные и очень короткие петли (рис. 4) и использовать корпуса силовых приборов нового поколения. Получение петель сверхмалой высоты, в свою очередь, также уменьшает структурное повреждение алюминия.



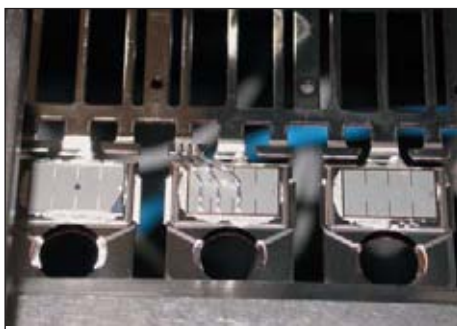
**Рис. 4.** Возможность получения сверхплоских петель с большим перепадом высот контактных площадок

Физические исследования HARB-процесса установили еще одну интересную особенность плоской ленты: из-за большого соотношения ее ширины и толщины (коэффициент 10 для ленты 2000/200), резонансные частоты получаемых петель при вертикальных и горизонтальных колебаниях изделия очень далеки друг от друга. Силовой прибор получает практически полный иммунитет против вибраций, что расширяет сферу применения силовых модулей в специальной технике.

Но так ли уж все хорошо?

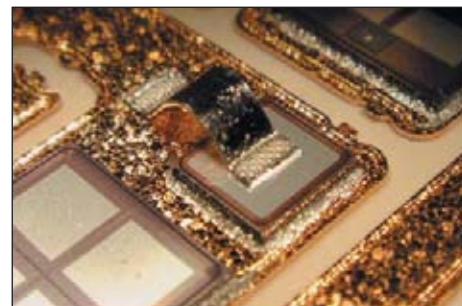
На самом деле, HARB имеет и существенные ограничения в применении, и представлять этот процесс как светлое будущее всей силовой электроники, как это делают некоторые производители, было бы некорректным. Физическая природа плоской ленты, большая ширина сварного соединения и особенности технологии монтажа кристаллов силовых приборов накладывают четкие ограничения на HARB-процесс.

1. HARB позволяет получать только строго ориентированные петли, в которых первый сварочный шов строго параллелен второму. Таким образом, невозможным становится получение так называемых S-образных петель, которые уже давно стали стандартом в дискретных транзисторах и силовых модулях (рис. 5)



**Рис. 5.** S-образные петли возможно получить только при сварке проволокой

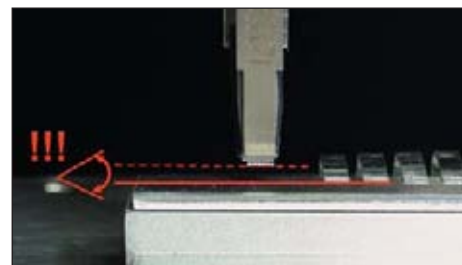
2. При выполнении сварки лентой требуется гораздо большее сварочное усилие. Очевидно, что площадь сварного соединения при HARB-процессе существенно превышает площадь контакта с подложкой стандартной алюминиевой проволоки. Поскольку при УЗ-сварке разогрев материала происходит в результате трения проволоки о подложку, для адекватного нагрева большой площади алюминиевой ленты требуется гораздо большее



**Рис. 6.** Давление на кристалл силового диода при HARB-процессе — 3,5–5 кг. Риск повреждения тонких слоев металлизации очень велик

усилие рабочего инструмента (при неизменных мощности и длительности процесса). На рис. 6 представлен пример изделия со сравнительно небольшими кремниевыми кристаллами, давление при HARB-процессе на которые составило 3,5 кг! Очевидно, что в хрупких кристаллах или при применении тонких слоев металлизации контактных площадок HARB-процесс не может быть использован. Риск повреждения кристаллов перевешивает преимущества в производительности и другие достоинства процесса.

3. HARB-процесс предъявляет гораздо более высокие требования к качеству монтажа кристаллов. В связи с большим давлением рабочего инструмента на ленту от производителя требуется обеспечить идеальный параллелизм поверхности кристалла относительно торца рабочего инструмента (рис. 7). Но много ли у нас производителей, имеющих современные вакуумные печи производства PINK Vacuumtechnik GmbH, которые единственные на рынке обеспечивают «плавный» вакуум и прецизионную дегазацию в процессе пайки кристаллов силовых приборов?



**Рис. 7.** Поверхность кристалла должна быть параллельна торцу инструмента

4. До сих пор поставщиками сварочной ленты выступают только зарубежные производители (Heraeus, Tanaka и пр.). Отечественный «Аметист-Стан» пока справляется только с производством сварочной проволоки. Испытания, проведенные в нашем сервисном центре, показали, что автоматические установки «переваривают» удачные партии отечественной проволоки без проблем, но задача производства плоской ленты для HARB-процесса решалась очень долго даже за рубежом.

Таким образом, внедрение HARB у отечественных производителей может быть слишком рискованно, поскольку сопряжено с пересмотром всего сборочного процесса: это и другие требования к DBC-подложкам, и эксперимен-

ты с различными составами припойной пасты, и отладка самого процесса сварки для достижения «щадящего» режима по отношению к хрупким кристаллам.

### Рабочий инструмент для HARB-процесса

Физические основы HARB и традиционной сварки толстой алюминиевой проволокой настолько близки, что для выполнения сварки лентой подойдет обычная установка УЗ-сварки, лишь немного модифицированная под HARB-процесс (установка должна обеспечивать больший диапазон сварочного усилия и мощности ультразвукового генератора).

То же справедливо и для рабочего инструмента HARB-процесса, который, как и традиционный инструмент клинового типа, включает в себя собственно инструмент, направляющую, стопор и нож.

Рабочий инструмент для выполнения HARB-процесса не имеет V-образной выемки, торцевая (рабочая) поверхность инструмента представляет собой длинную площадку, на которой выполнена «вафельная» сетка из прямоугольных выступов, расположенных под углом 45° или 90° к оси рабочей поверхности. Высота и ширина этих выступов также является предметом подбора и оптимизации. В частности, сейчас до конца не решено, должны ли быть стенки выступов строго перпендикулярными поверхности ленты или наклонными. Под каким углом? Какова идеальная глубина структуры с выступами по отношению к толщине ленты?

В отличие от клинового рабочего инструмента инструмента для сварки лентой не требуется особой формы направляющая щель для подачи ленты (как это обычно делается в инструменте для работы в глубоком колодце с вертикальной подачей проволоки). Удерживать ленту под рабочей поверхностью инструмента помогает пластиковая направляющая клипса, аналогичная таковой для клинового инструмента для сварки толстой проволокой (рис. 8).



**Рис. 8.** Рабочий инструмент для сварки лентой: нож, инструмент, пластиковая направляющая (F&K Delvotec G5)

Стопор для предотвращения обратного хода ленты может располагаться либо на пластиковой направляющей (как в случае с инструментом для толстой проволоки), либо где-либо еще в тракте сварочной головки. Функция стопора — фиксация положения ленты, в особенности это важно в момент движения обрыва после подрезки ножом. Интересно, что

в силу большего трения ленты в тракте сварочной головки по сравнению с проволокой роль стопора достаточно низка, как в случае с проволокой для формирования равномерных петель.

Рабочий инструмент одной ширины в принципе может быть использован для сварки ленты нескольких типоразмеров (различной ширины и даже толщины). Единственным ограничением универсальности рабочего инструмента является вопрос оптимальной «вафельной» структуры его рабочей поверхности (см. выше), которая может отличаться для лент разной толщины. В результате производители пришли к соглашению минимизировать ассортимент сварочной ленты и использовать определенный инструмент для каждого типоразмера ленты.

Нож для обрезки ленты должен выполнять более прецизионную работу, чем при обрезке проволоки: поскольку в сечении лента больше проволоки, от ножа требуется большее усилие и, как следствие, более прочный материал ножа. Разумеется, при установке ножа от операторов и наладчиков требуется большая аккуратность.

При HARB-процессе интегральная энергия, прилагаемая к точке сварки, может сильно превышать значение, имеющее место для сварки проволокой. Как следствие, зажим изделия на рабочем столе должен быть более прочным. Простые вакуумные адаптеры, хорошо зарекомендовавшие себя для сварки силовых приборов, оказываются недостаточно надежными для HARB-сварки и уступают место более дорогим механическим зажимам.

### Особенности применения HARB-процесса

Практически все особенности процесса сварки лентой определяются ее большей, чем у проволоки, площадью сечения и, соответственно, большей силой, требующейся для деформации ленты.

В технологическом плане критичной является аккуратность при установке ножа рабочего инструмента. Особенно важна точность обрезки ленты, если эта операция проводится на поверхности кристалла. Как известно, хорошее оборудование для УЗ-сварки позволяет программировать глубину резки. При формировании конца петли нож прорезает до 90–95% толщины ленты, во избежание повреждения кристалла или подложки, а обрыв остаточного слоя алюминия происходит движением головки вдоль петли и вверх.

Теоретически, при использовании ленты шириной 2–3 мм, даже если поверхность кристалла идеально параллельна режущей поверхности ножа, а сам нож идеально отлажен, разброс толщины припойного слоя по толщине (не ширине!) площадки рабочего инструмента может внести большие затруднения в чистый обрыв проволоки после резки. Однако практика показала, что процесс обрезки ленты даже более прост, чем в случае с проволокой. Объясняется это тем, что в ленте сила противодействия проницающему движению ножа нарастает линейно, препятствуя избыточному движению ножа, которое может привести к сквозному прорезанию ленты. При обрезке проволоки, круглой в сечении, сила противодействия сначала воз-

растает, а затем (с переходом линии диаметра) уменьшается, что заставляет установку сварки «тормозить» осью Z почти наугад, так как деформация каждого соединения происходит по-разному. В итоге случайных сквозных прорезов проволоки происходит гораздо больше, чем ленты.

Существенным ограничением в применении HARB-процесса, как было сказано выше, является его прямолинейность, то есть невозможность сварки S-образных петель. Наибольшей неприятностью этот недостаток является для силовых транзисторов, поскольку существующая конструкция выводной рамки с T-образными контактными площадками не позволяет проводить сварку иначе, как с поворотом «за угол». Возможно, в будущем будут разработаны новые конструкции выводных рамок силовых транзисторов, которые с применением HARB-процесса могут стать тоньше (из-за малой высоты петель) и дешевле (из-за сокращения времени сварки и уменьшения количества заливочного компаунда).

Говоря о надежности HARB-процесса по сравнению с традиционной сваркой проволокой, необходимо помнить о следующем: при сварке проволокой мощных кристаллов конструкторы, как правило, закладывают две-три «запасные» петли, которые обеспечивают работу прибора даже при обрыве двух-трех основных петель в ходе эксплуатации. В случае применения ленты вопрос ставится так: «все или ничего», поскольку на кристалле просто не остается места для запасной петли из ленты.

### Потенциальные риски HARB-процесса: больше вопросов, чем ответов

В настоящий момент ситуация с HARB-процессом такова: всем очень интересно, но никто не проводил практической работы и полноценных фундаментальных исследований его надежности. Помимо обычных трудностей с введением нового техпроцесса существует еще малоизученный вопрос долговременного поведения сварных соединений, надежности и ресурсной стойкости. Наиболее уязвима в ресурсном смысле металлизация на кристалле.

При сварке лентой мощность УЗ-воздействия на кристалл гораздо выше, чем при сварке проволокой. Растет площадь сечения сварного соединения. В то же время, толщина самого кристалла силового прибора в последние годы уменьшается с целью обеспечения лучшего теплоотвода. Производители еще не проводили оптимизации front-end процессов производства кристаллов под HARB-процесс и не особо стремятся это делать. Рынок пока не требует большого количества таких кристаллов, а то количество изделий, которое выпускается по HARB-технологии, не может быть репрезентативным — единичные случаи отказа таких изделий не могут дать ответ о системном или случайном своем характере. Напротив, риск в случае возникновения проблем с надежностью таких изделий огромен, так как производители кристаллов могут потерять средства, вложенные в разработку, и повредить своей репутации. В меньшей мере то же относится и к производителям корпусов, выводных

рамок и прочих компонентов, являющихся контактными площадками для сварки.

Интегральная энергия сварки находится в зависимости от площади сечения проводника, а также от ширины сварного шва. В еще большей зависимости энергия находится от длины шва, поскольку она определяет площадь диффузии алюминия в контактную площадку. С точки зрения целесообразности применения, смысл имеют ленты шириной от 2 мм и толщиной порядка 300 мкм. Такая лента потребует приблизительно тройной интегральной энергии, приложенной к точке сварки, по сравнению с проволокой толщиной 500 мкм. Однако в настоящее время неизвестно, как определить точный эквивалент энергий, приложенных к проволоке и плоской ленте, поскольку физика этого воздействия в двух случаях различна.

Еще одним фактором, определяющим долговременную стабильность соединения, является то, что лента по определению закрывает большую площадь контактной площадки кристалла, чем проволока. Известно, что алюминий имеет гораздо больший КТР, чем кремний, — 24 ppm/K. Для сравнения, КТР монокристалла кремния, из которого чаще всего изготовлен кристалл силового прибора, составляет 2,5 ppm/K. Эта гигантская разница КТР в худшем случае может привести к образованию трещин вдоль поверхности раздела двух материалов, в особенности при термоциклировании, устойчивость к которому является обязательным требованием к автомобильной электронике и спецтехнике. Но при сварке несколькими параллельными петлями проволоки на контактной площадке кристалла образуются несколько «островков» вместо одного пятна. Видимо, это как-то компенсирует разницу в КТР и заглушает эффект образования трещин. С другой стороны, кристалл, припаянный к подложке с приваренной лентой, оказывается как бы в сэндвиче из материалов с большим КТР, что снижает риск его отказа. Вопрос о том, что является более щадящим для кристалла — одно соединение, выполненное лентой (при сильном давлении и повышенной мощности УЗ-воздействия), или несколько сварных соединений проволокой, также пока открыт. А в какой мере то, что форма сварного пятна в случае использования проволоки овальна (рис. 9), а в случае ленты — прямоугольна, компенсирует негативный эффект термического расширения? В настоящий момент все эти вопросы являются предметом исследований ведущих фирм-производителей силовой электроники и оборудования УЗ-сварки.

### Куда дует ветер?

Технология HARB открывает настолько хорошие перспективы, что практически каждый производитель или потребитель силовой электроники в настоящий момент проводит эксперименты в этой области. В Европе и США, помимо обозначенных выше фундаментальных исследований, сейчас наибольшее внимание уделяется технике измерений и тестирования, в особенности — тестам на механическую прочность. Практической задачей является определение стандартов и критериев приемки при



Рис. 9. Овальная форма пятна контакта при сварке проволокой

проведении пулл-теста (теста на обрыв) и теста на сдвиг. Все требует стандартизации: высота и угол воздействия, направление воздействия (вдоль или поперек ленты), а также критерии оценки полученных результатов.

HARB-процесс находится на грани выработки единых стандартов на саму сварочную ленту. Сейчас лишь самые крупные производители проволоки предлагают ленту как таковую, но и у них те малые количества, что потребляет рынок, производятся пока по обходной технологии. В качестве иллюстрации этого можно сказать, что лента сейчас производится из проволоки с соответствующей площадью поперечного сечения путем холодной прокатки. Такой процесс зачастую требует дополнительной термообработки ленты после прокатки. А более правильным с металлургической точки зрения было бы резать ленту из листового алюминия калиброванной толщины. В настоящий момент лента намного дороже эквивалентного количества проволоки, но вполне возможно, что с ростом рынка для HARB-процесса стоимость ленты снизится до приемлемого уровня. Без этого условия преимущества в производительности автоматов сварки будут сведены на нет большей себестоимостью материалов.

Пока совсем немного массовых изделий производится по технологии HARB. Каждый производитель нарабатывает собственный опыт, преодолевая неизбежные технологические трудности. Отечественным производителям силовой электроники можно порекомендовать начать с применения HARB в простом драйвере силового прибора, где лентой соединяются контактные площадки печатной платы (как на рис. 10) и закладные токовыводы гибридного корпуса. В этой конструкции нет сварки на кристалл, и, соответственно, большая часть рисков отказа отсутствует. В каком-то смысле HARB без сварки на кристалл может послужить площадкой для отработки технологии и практического опыта.

Важно также и то, что последние модели хороших установок сварки могут быть легко перенастроены со сварки лентой на сварку обычной проволокой и обратно. В качестве примера можно привести универсальную полуавтоматическую модель 5600 от F&K Delvotec или их же автомат модели G5 (рис. 11). Обе установки могут применяться для сварки проволокой диаметром от 17 до 600 мкм двух диапазонов («тонкой» — алюминиевой, медной или золотой и «толстой» алюминиевой) и лентой («тонкой» — золотой и «толстой» — HARB). Перенастройка с одного типа сварки на другой занимает несколько минут. Упомянутые модели установок сварки разрабатывались для приме-



Рис. 10. Пример «безопасного» применения HARB-процесса

нения в силовой и оптоэлектронике, производстве MEMS и спецтехники, всего того, что называется «электроника высокой надежности» (HiRel). Это наложило отпечаток на их конструкцию и исполнение: надежность в работе, гибкость, работа с материалами непредсказуемого качества — все это учтено при разработке немецких установок F&K Delvotec.



Рис. 11. Универсальные установки сварки: а) автомат F&K Delvotec G5, б) полуавтомат F&K Delvotec 5600

Применение в производстве универсальной установки сварки проволокой и лентой — оптимальный вариант для отработки процесса при отсутствии риска «застрять» со сложным оборудованием при возникновении проблем с процессом. Это вложение, которое трудно переоценить.

Авторы статьи постараются держать читателей «Силовой электроники» в курсе последних разработок в области микроэлектронной сборки и, в частности, самого наукоемкого ее процесса — ультразвуковой сварки. Надеемся, специалистов предприятий-производителей силовой электроники заинтересует информация, полученная из первоисточников и от конкурентов за рубежом, поскольку своей задачей многие из них сейчас ставят выход на уровень качества и надежности, характерный для лидеров отрасли.