

# Опыт практического применения оборудования F&S Bondtec в производстве прецизионных электронных приборов

**В статье приводится опыт АО «Морион», ведущего российского разработчика и производителя пьезоэлектронных приборов стабилизации и селекции частоты — кварцевых генераторов, фильтров и резонаторов, а также рассказывается об организации технологического процесса по разварке кристаллов с последующей герметизацией и установкой изделий поверхностного монтажа на базе оборудования F&S Bondtec.**

**Максим Ваулин**

vaulin@morion.com.ru

**Сергей Федоров**

fedorovs@morion.com.ru

## Введение

Несколько лет назад перед предприятием встала задача освоить и запустить в серийное производство принципиально новый тип изделия — миниатюрный прецизионный кварцевый термокомпенсированный генератор для поверхностного монтажа. Было решено изготавливать изделие по смешанной технологии: разварка кристалла управляющей микросхемы на плату-основание с последующей его герметизацией и установкой изделий поверхностного монтажа.

Техническое задание на проектируемый генератор было сформулировано следующим образом:

- габаритные размеры серийных изделий 7×5 или 5×3 мм;
- покрытие контактных площадок подложки — иммерсионное золото 3–5 мкм;
- контактные площадки кристалла 80×80 мкм;
- шаг сварки ~150 мкм;
- высота петли 100–150 мкм;
- максимальная длина проволочного соединения 300 мкм;
- корпуса генераторов располагаются на мультиплицированной заготовке габаритом 70×80 мм;
- объем выпуска серийных изделий 6000 шт./мес.

При разработке изделия стало очевидно, что одной из основных критических технологических опера-

ций, отвечающей за корректное функционирование изделия, является разварка кристалла на контактные площадки подложки. С технологией этого процесса сотрудникам АО «Морион» прежде сталкиваться не приходилось. Предполагалось также выпускать несколько основных типов серийных изделий и параллельно проводить разработку и изготовление лабораторных и экспериментальных образцов. Все эти задачи требуют наличия полуавтоматической системы разварки с возможностью не только производить серийные изделия, но и достаточно гибко корректировать параметры процесса изготовления опытных образцов.

Исходя из поставленных задач было решено изучить технологию термовзвучковой микросварки «шарик-клин» золотой проволокой, которую используют более 90% производств при формировании проволочных соединений для изделий микроэлектроники. Такая технология представляет собой комбинацию ультразвукового и термокомпенсированного методов сварки и сочетает все преимущества обеих технологий. Применение золотой проволоки и контактных поверхностей с покрытием иммерсионным золотом обеспечивает наиболее надежное соединение при сварке, такие соединения не подвержены коррозии, не образуют межметаллического слоя и не создают других условий для деградации.

Кратко достоинства и недостатки технологии типа «шарик-клин» приведены в таблице 1 [1].

**Таблица 1.** Плюсы и минусы ТЗС технологии «шарик-клин»

Плюсы	Минусы
Средняя температура процесса (~150 °С)	Восприимчивость к загрязнениям контактных поверхностей
Низкий уровень УЗ-энергии	Вероятность возникновения коверн при сварке
Возможность формирования петли в любом направлении (прямом и обратном)	Контроль только четырех основных параметров установки сварки
Полный цикл формирования петли не более 20 мс	Большой размер контактных площадок (~50 мкм) и большой шаг сварки (~100 мкм)
Высокая надежность соединения Au-Au	Относительно большой расход сварной проволоки

## Подбор оборудования

После детального ознакомления с технологией была проведена большая подготовительная работа по поиску оборудования, отвечающего одновременно всем потребностям среднесерийного и опытного производства. С одной стороны, требовался стабильный, отлаженный техпроцесс для серийно выпускаемых изделий, с другой — стояла задача гибко менять параметры сварки и выполнять оценку качества получаемых соединений. С этой целью были изучены



Рис. 1. Автоматический тестер 5610 C на базовой платформе серии 56xx с быстросъемной тестовой головкой 5600 C

Таблица 2. Выбранная комплектация оборудования

Наименование узла	Основные параметры
Полуавтоматическая базовая платформа серии 56xx	Рабочая зона и точность перемещения по осям X, Y, Z: 100×100×60 мм; шаг 0,25 мкм; повторяемость 2 мкм. Скорость перемещения по осям: программируемая от 0,2 до 16 мм/с. Скорость разварки: до 30 петель/мин
Нагреватель подложки	Программируемая температура в диапазоне до +300 °C
Сварочная головка 5610	Тип проволоки: 17–50 мкм (0,7–2 мил), Au. Инструмент: стандартный капилляр 16 мм. Усилия сварки: 0–300 сН с шагом 1 сН. Режимы сварки: стандартная сварка «шарик-клин», Bump (Bumping), Wire with Safebump или Snitch on Bump
Тестовая головка 5600C	Разрушающий и неразрушающий контроль механической прочности соединения
Картридж pull-head (тест на отрыв) PH100 для тестовой головки 5600C	Диапазон тестового усилия: до 100 сН, шаг 0,006 сН
Картридж shear-head (тест на сдвиг) SH500 для тестовой головки 5600C	Диапазон тестового усилия: до 500 сН, шаг 0,01 сН

представленные на рынке установки сварки и тестеры сварных соединений различных производителей, в большинстве случаев они представляли собой две отдельно стоящие единицы оборудования, стоимость которых примерно соответствовала друг другу. Однако современное высокотехнологичное оборудование должно отвечать концепции «микрофабрики», или «настоющей фабрики», позволяющей объединить в одном устройстве сразу несколько функциональных возможностей.

Наши иностранные партнеры рекомендовали нам обратить внимание на оборудование компании F&S Bondtec, чьи машины оснащены быстросъемными сварочными головками и позволяют производить разварку микропроволокой, осуществлять проверку крепления кристалла на сдвиг и оценивать прочность сварных соединений. После всех консультаций и согласований с производителем оборудования нашу «микрофабрику» было решено сформировать на платформе серии 56xx. Для базовой комплектации выбрана съемная сварочная головка 5610, позволяющая проводить сварку золотой проволокой диаметром 17–50 мкм (0,7–2 мил) стандартным методом «шарик-клин». Сварочная головка успешно поддерживает такие режимы сварки, как bump или bumping (создание шариковых выводов), wire with safebump (сварка с закрепляющим шариком) и snitch on bump (стандартная сварка, при которой вторая точка петли приваривается на заранее установленный шарик, другими словами, сварка «шарик-шарик»). В то же время, если возникнет потребность в использовании других методов сварки, например «клин-клин» или сварка в «глубоком колодце», плоской лентой или толстой проволокой, необходимо будет лишь докупить одну из поставляемых отдельно сварочных голов, без замены всей установки.

Для тестирования полученных соединений и качества крепления кристалла был дополнительно приобретен автоматический тестер сварных соединений, легко монтирующийся на посадочное место основной сварочной головы (рис. 1). На нем при необходимости можно применять один из съемных тестовых картриджей, выполняющих три основных (разрушающих или неразрушающих) теста — pull-test (тест на отрыв крючком), shear-test (тест на сдвиг вывода или кристалла) и tweezer-test (тест на отрыв пинцетом).

Таким образом, итоговая комплектация выглядела следующим образом (табл. 2).

### Подготовка к сварке

Для гарантии соответствия сварных соединений заданным характеристикам требуются обширные исследования. Фактически можно выделить три взаимосвязанных между собой направления:

1. Анализ области применения оборудования (технические характеристики устройства, сварочной проволоки, рабочего инструмента).
2. Анализ параметров оборудования (скорость перемещения, активация зажима проволоки, расстояние перемещения, форма петли).
3. Анализ параметров технологического процесса (прижимное усилие, продолжительность процесса сварки, ультразвуковая энергия).

Сварочная головка 5610 работает со стандартным 16-мм керамическим капилляром, что позволяет подобрать рабочий инструмент практически для любой задачи.

При стандартной сварке «шарик-клин» у нас всего две точки сварки — ball bond, или «шарик», и stitch bond, или «клин». Рассмотрим каждую точку в привязке к рабочему инструменту, начиная с формирования сварочного соединения типа «шарик»:

1. Размер отверстия H (Hole Size) подбирается на основании диаметра используемой проволоки WD (Wire Diameter). Как правило, H равен 1,2–1,5x от WD [2] (рис. 2).
2. Угол фаски CA (Chamfer Angle) обеспечивает размер площади сварки при формировании «разваренного шарика» MBD (Mashed Ball Diameter) на контактной площадке. Значение CA также влияет на размер «свободного шарика» FAB (Free Air Ball), получаемого при прохождении искры EFO (Electric Flame-Off) — первого этапа формирования соединения «шарик-клин». Стандартное значение CA = 90°. Как показывает практика, повышение CA до 120° позволяет расширить площадь сварки (MBD) в 1,5 раза и, соответственно, увеличить прочность сварного соединения, если позволяют размеры контактной площадки [3] (рис. 3).

Важно контролировать формирование симметричных «свободного шарика» FAB и «разваренного шарика» MBD, от этого будет зависеть повторяемость и надежность проводимой сварки. При возникновении деформированных «шариков» следует увеличить длину «хвоста» для формирования «свободного шарика», уменьшить зазор между электродом искрообразователя (EFO) и сформированным «хвостом», исключить движение машины или капилляра в процессе создания сварного соединения [8].

Таким образом, правильно подобранный инструмент (капилляр) — это оптимальная комбинация внутреннего диаметра капилляра, диаметра проволоки, угла фаски, требуемых диаметра и высоты разваренного шарика.

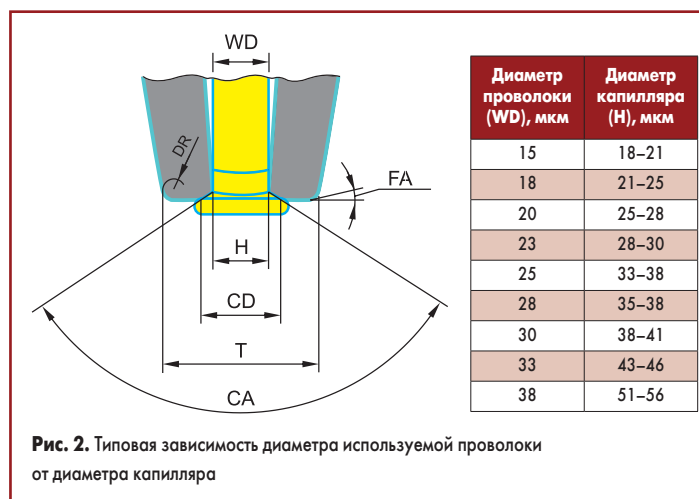


Рис. 2. Типовая зависимость диаметра используемой проволоки от диаметра капилляра

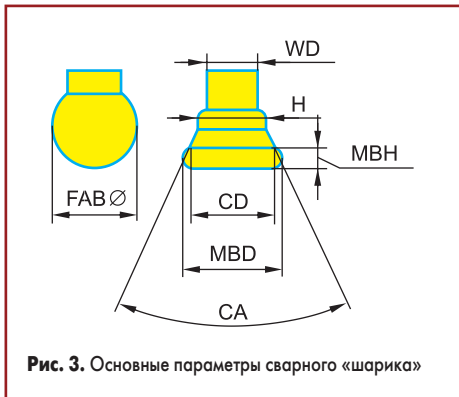


Рис. 3. Основные параметры сварного «шарика»

Многие считают, что основным недостатком метода сварки «шарик-клин» является вторая точка сварного соединения — «клин» [1, 3, 4]. Однако есть основные параметры процесса формирования «клина», учет которых позволит весьма успешно компенсировать этот недостаток:

1. Диаметр наконечника рабочего инструмента T (Tip Diameter) определяет величину длины «клина» SL (Stitch Length или Stitch Bond). Размер «клина» для незащищенных кристаллов в пределах контактной площадки должен превышать 3/4 площади контактной площадки и в то же время занимать более 3/4 площади «отпечатка» инструмента [5].
2. Значение лицевого угла инструмента FA (Face Angle) обеспечивает необходимую толщину сварного соединения, а взаимно-связанное с ним значение внешнего радиуса OR (Outer Radius) позволит подобрать необходимую плавность сварного соединения. Чем больше значение FA, тем меньше значение OR, и наоборот. Как правило, значение FA составляет 8° для мелкого шага и 11° для очень мелкого [2].
3. После формирования сварного соединения внутренняя фаска рабочего инструмента IC (Inner Chamfer) обеспечит необходимую длину «хвоста» проволоки для формирования следующего «свободного шарика» (FAB). Стабильные параметры формирования «хвоста» — важный фактор качества и повторяемости процесса сварки [7] (рис. 4).

В этом случае правильно подобранный инструмент (капилляр) — это корректное сочетание значений внешнего радиуса капилляра и его общего диаметра при заданном значении лицевого угла инструмента.

Подготовка машины к работе представляет собой написание программы и последующую отработку технологического процесса. Можно выделить четыре параметра, напрямую влияющих на качество и прочность соединения «шарик-клин»: мощность ультразвуковой энергии, время приложения ультразвука, сила прижима при подаче ультразвуковой энергии и температура подложки.

Рассматриваемая установка позволяет использовать четыре основных программируемых режима сварки (рис. 5):

- Режим сварки Wire — стандартный метод сварки методом «шарик-клин». Как упоминалось выше, вторая точка этого соединения уже долгие годы не дает покоя технологам, особенно при разработке и производстве изделий с повышенными требованиями к на-

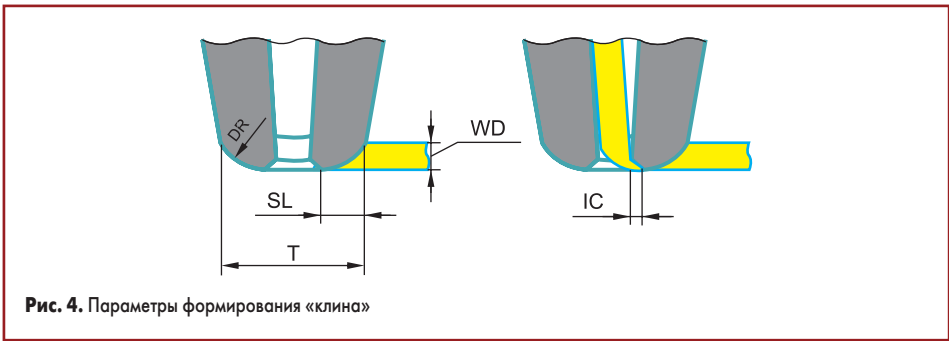


Рис. 4. Параметры формирования «клина»

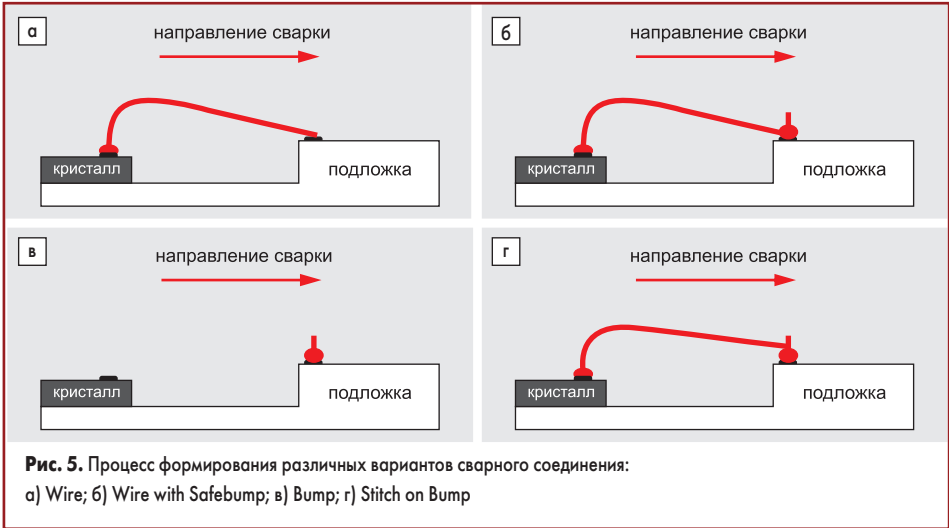


Рис. 5. Процесс формирования различных вариантов сварного соединения: а) Wire; б) Wire with Safebump; в) Bump; г) Stitch on Bump

дежности. Однако существует несколько предусмотренных производителем методов, эффективно повышающих прочность стандартного соединения «шарик-клин», о них мы поговорим ниже.

- Режим сварки Wire with Safebump, или Security Bump, разбит на два этапа. При формировании сварного соединения на полученный «клин» приваривается дополнительный «шарик безопасности». Прочность соединения повышается, однако мы не получаем в итоге полностью однородное сварочное соединение, и потенциальные проблемы могут возникнуть на границе контакта шарик-клин-подложка (рис. 6) [6].
- Режим сварки Bump — стандартный метод формирования отдельного «шарика».
- Режим сварки Stitch on Bump (также в литературе встречающийся под наименованиями Ball Stitch On Ball (BSOB), Stand-Off Stitch (SOS), или обратный метод сварки Reserve Bonding), разбивает процесс на два этапа: в первую очередь формируется ряд отдельных «шариков», затем машина проводит стандартную сварку, приваривая вторую точку проволочного соединения

типа «клин» на уже сформированный ранее «шарик». Данный метод, в отличие от Wire with Safebump, дает лучшие результаты при формировании однородного соединения [6]. Для оптимизации такого режима необходимо подобрать рабочий инструмент (капилляр) с параметром лицевого угла FA = 8°, это обеспечит лучший контакт с «шариком» при формировании «клина» на нем [2] (рис. 7).

Такой режим призван решать следующие задачи [2, 6]:

- Сформировать низкопрофильное проволочное соединение высотой менее 50 мкм.
- Сформировать соединение с деликатным кристаллом, который можно повредить, используя соединение типа «клин».
- Улучшить контакт провода на материалах или контактных площадках с плохой паяемостью. Во-первых, площадь контакта шарика с проблемной контактной площадкой будет гораздо больше, а во-вторых, можно скорректировать параметры сварки для «шарика», добившись лучшей адгезии. Закрепить «клин» на сформированном ранее «шарике» не составит труда.



Рис. 6. Схематичное изображение соединения типа Security Bump. Красным показана зона возникновения потенциальных проблем



Рис. 7. Схематичное изображение соединения типа Stitch on Bump

– Сформировать соединение на относительно небольшой контактной площадке или контактной площадке вблизи физического препятствия.

Нестандартный, но не менее эффективный метод Safe Wire, или Security Wire, подходит для достаточно крупных контактных площадок. При использовании данного метода на сформированное соединение приваривается дополнительная петля меньшего размера, обеспечивающая большую надежность (рис. 8) [9].

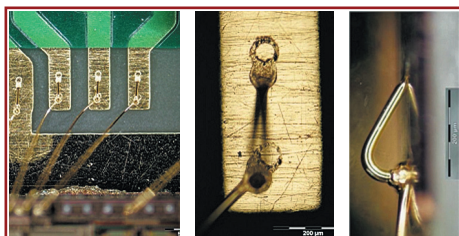


Рис. 8. Разварка методом Safe Wire

### Процесс сварки

После подготовки новой рабочей программы, подбора необходимых материалов и инструментов технологу очень важно успешно освоить процесс сварки. Так как оборудование позволяет проводить настройку большого количества параметров, очень полезным инструментом выступает режим Monitoring Mode. Данная опция переводит установку в пошаговый режим, позволяя визуально контролировать процесс сварки. Проведя несколько серий тестовых сварок, можно достаточно быстро отработать техпроцесс, точно локализовать допущенные ошибки в программе и оперативно их скорректировать.

Если говорить о процессе сварки в автоматическом режиме, оператор здесь также не выступает в виде «биоробота», нажимающего на нужные кнопки в нужное время. Программное обеспечение F&S Bondtec имеет специальный модуль DLC (Deformation Limit Control — контроль пределов деформации), выводящий наглядную визуальную информацию о процессе сварки на основное рабочее окно программы сварки. Оператор без специального дополнительного обучения в режиме реального времени контролирует степень деформации каждого сварного соединения, тем самым выполняя оценку качества сварного соединения и контролируя корректное функционирование оборудования (рис. 9).

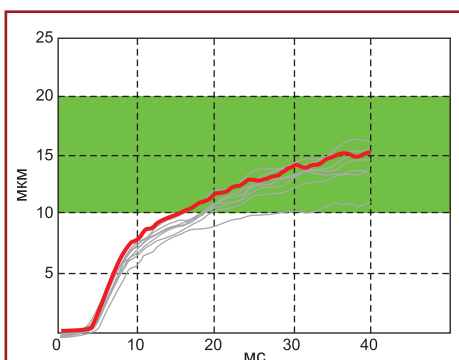


Рис. 9. Окно DLC-модуля

Основные функции DLC-модуля:

- Контроль деформации проволочных выводов для начального и конечного соединения провода.
- Возможность задавать пределы технологического окна.
- Автоматическая остановка оборудования в случае выхода параметров из технологического допуска.
- Визуальный контроль процесса оператором.
- Мониторинг всей серии разваренных выводов (на рис. 9 красной линией показана деформация текущего вывода).
- Контроль состояния проволоки (потеря, обрыв и пр.).

Модуль DLC Analysis позволяет сохранять и просматривать данные по деформации и параметрам сварки. При необходимости можно работать с этой информацией в офлайн-режиме, а также хранить данные для подтверждения качества процесса сварки.

### Переналадка

В процессе работы с лабораторными или мелкосерийными изделиями переналадка — явление нередкое. Основные операции описаны ниже и не потребуют особой квалификации от рабочего персонала:

1. Смена катушки с проволокой. Основная сложность операции — необходимость продеть проволоку микропинцетом через направляющие, зажим и рабочий инструмент. Для облегчения этой задачи служит функция Feed-in Air, активизирующая подачу очищенного сжатого воздуха в канал направляющей проволоки.
2. Смена или замена рабочего инструмента (капилляра). Фиксация рабочего инструмента на волноводе обеспечивается при помощи медного винта, с применением идущей в комплекте динамометрической отвертки и пинцета.

Одной из самых неприятных проблем, связанной с частыми переналадками и выпуском большой номенклатуры мелких партий изделий, является быстрое загрязнение рабочего инструмента (капилляра). Пока оптимальные параметры еще не определены и идет процесс оптимизации, неизбежна ситуация, когда после формирования «свободного шарика» (FAB) и проведения тестовой сварки «шарик» закупоривает отверстие капилляра.

Сначала несколько раз мы пробовали рекомендованный производителем метод очистки засора при помощи «царской водки». Для этого приходилось останавливать работу установки, снимать закупоренный инструмент, договариваться с химлабораторией нашего предприятия и проводить химическую очистку. Учитывая тот факт, что мы используем инструменты с внутренним диаметром не более 33 мкм, данный метод оказался малоэффективен.

Позже был найден более удобный способ борьбы с данной проблемой — инструмент для прочистки капилляров (Capillary Unplugging Tool). CUT представляет собой прочную нить, диаметр которой соответствует диаметру используемой проволоки

или рассчитывается по формуле зависимости диаметров рабочей проволоки и инструмента. В этом случае нет необходимости снимать рабочий инструмент со сварочной головы — достаточно освободить канал от проволоки пинцетом, а затем, используя CUT как шомпол, удалить из капилляра остатки проволоки, загрязнений или закупоривший канал «шарик».

### Контрольные операции

После формирования сварных соединений их качество можно оценить визуальными или механическими методами. Автоматический тестер 5600C, благодаря стандартному оптическому микроскопу и подвижному рабочему столу, позволит провести оптический контроль и ряд механических испытаний, не сходя с рабочего места.

Стационарные тестеры прочности сварных соединений при сопоставимой цене со сварочным оборудованием простаивают в среднем более 90–95% рабочего времени. Универсальное оборудование F&S Bondtec позволяет выполнить преобразование сварочной машины в автоматический тестер сварных соединений всего за 1–2 мин. Базовая платформа серии 5bxx имеет универсальное крепление для сменных голов, которые можно заменить без применения специальных инструментов.

На корпус установки можно установить стандартные крепления для временного хранения основной/дополнительной сварочной или тестовой головы (рис. 1). Во избежание случайного повреждения голов или их составляющих настоятельно рекомендуется использовать данные крепления только для временного хранения, например при переналадке между сварочной и тестовой установками. Для основного хранения лучше подходят «шок-кейсы» с антистатическим уплотнителем.

Тестовая голова также является универсальной платформой для крепления необходимых тестовых картриджей, фиксируемых кольцом с внутренней резьбой. При установке картриджа оборудование автоматически определит его тип и предложит провести ряд калибровочных работ (рис. 10).

Тестер позволяет действовать в трех основных режимах — ручном, полуавтоматическом и полностью автоматическом. При работе в ручном режиме у оператора остается возможность повлиять на результаты измерений, например переместить точку приложения крюка к петле, тем самым изменив прилагаемое к соединению усилие. Программное обеспечение позволяет транслировать рабочую программу сварки, содержащую координаты сварных точек, форму и высоту петлю, а также реперные точки в среду для подготовки тестовых программ. Точка приложения крюка, как и траектория движения тестового инструмента, будет рассчитана автоматически. Все, что необходимо сделать технологу, — сформулировать параметры и выбрать тип нужного теста. Другими словами, проведя серию тестовых сварок, вы сразу получаете полуфабрикат для написания тестовой программы, что существенно экономит время.

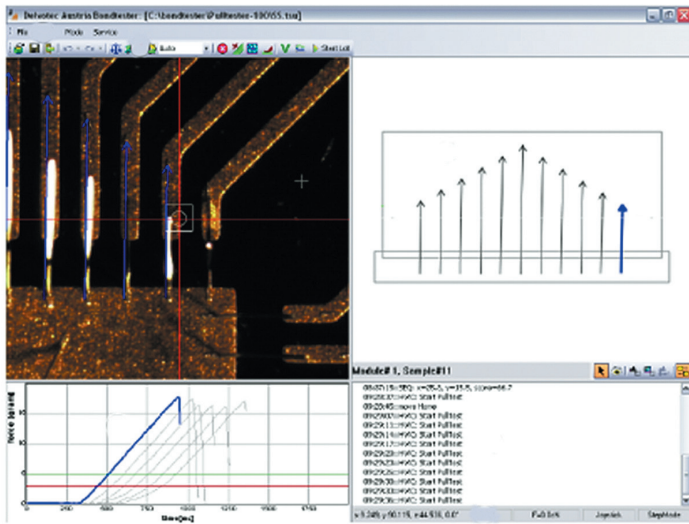


Рис. 10. Окно программы автоматического тестера

На нашем предприятии испытания проводятся согласно методам, описанным в MIL-STD-833. Здесь важно выдержать ряд условий: во-первых, тестирование следует проводить в автоматическом режиме, что позволит выполнить корректное приложение сил при испытании; во-вторых, нужно подобрать корректный инструмент для используемого типа проволоки и откалибровать его.

Наиболее важным фактором будет место отрыва проволоки при проведении теста: оптимальные точки для разрыва — «шея» (2) или «пятка» (4) соединения (рис. 11), в этом случае можно говорить о правильно подобранном инструменте, материалах и технологическом процессе.

В случае отрыва в точке «1» рекомендуется обратить внимание на настройки установки сварки — мощность и силу прижима. Также стоит обратить внимание на чистоту и качество контактных площадок — возможно, потребуется дополнительная технологическая операция очистки или активации поверхности.

При отрыве в точке «3» рекомендуется провести анализ и подбор тестового инструмента — крюка.

В случае отрыва в точке «5» рекомендуется обратить внимание на такие параметры рабочего инструмента, как диаметр (Т) и лицевой угол (FA). Если необходимого инструмента под рукой нет, следует использовать режимы сварки Wire with Safelum или Safe Wire.

Хрупкость провода в области отрыва «2» связана с процессом формирования «свободного шарика» (FAB) при прохождении электрической искры EFO. Данная зона формируется из-за термического воздействия HAZ (Heat Affected Zone), во время которого происходит рост размера зерен в материале, снижая его прочность более чем на 20% относительно остальной проволоки. HAZ — самая слабая часть разваренной петли, даже при правильно подобранном технологическом процессе сварки эта область максимально подвержена разрыву [1].

Для компенсации последствий данной проблемы рекомендуется уменьшить время воздействия модуля искрообразователя (EFO)

в процессе формирования «воздушного шарика» (FAB).

Для того чтобы упрочнить соединение в точке «4», необходимо изменить стандартный метод сварки на Stitch on Bump или обратный метод Reserve Bonding. Исходя из опыта работы с оборудованием это единственно верный способ.

Автоматический тестер позволяет также проводить 100%-ный неразрушающий контроль разваренных соединений перед операцией герметизации. Однако нужно помнить, что тест на сдвиг (shear-test) не наносит вреда соединению, в то время как тест на отрыв (pull-test) деформирует петли, а остаточная прочность соединения составляет 60–70% от первоначальной [4].

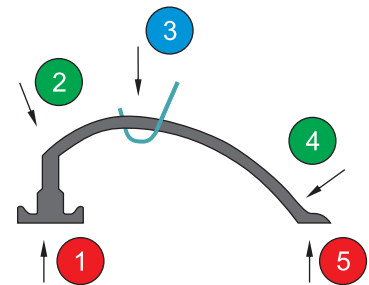
**Закключение**

Оборудование F&S Bondtec является универсальной платформой для формирования технологического процесса, соответствующего поставленному производственному заданию, и позволяет использовать очень широкий диапазон стандартных технологических инструментов и материалов для решения задач любой сложности. Действительно быстрая переналдка и превращение сварочной машины в тестовую за несколько минут помогает оперативно отработать технологический процесс изделия.

Специалистам АО «Морион» удалось в кратчайшие сроки освоить оборудование F&S Bondtec и наладить серийный выпуск нового типа изделия с диапазоном рабочих частот 5–52 МГц и температурной стабильностью до  $0,1 \times 10^{-6}$ . Изделие прошло сертификацию и соответствует требованиям STRATUM III, КОСПАС/Sarsat (рис. 12).

**Литература**

1. Harman G. Wire Bonding in microelectronics. Third edition. McGraw-Hill, 2010.
2. Bonding Capillaries. Bonding Evolution. SPT processing guide, 2013.



Режим разрушения	
1	Отрыв приваренного шарика
2	Разрыв «шеи» соединения/ Neck break first bond
3	Разрыв провода/Wire break
4	Разрыв «пятки» соединения/ Heel break second bond
5	Отрыв приваренного клина

Рис. 11. Точки отрыва проволоки при pull-test по MIL-STD-833

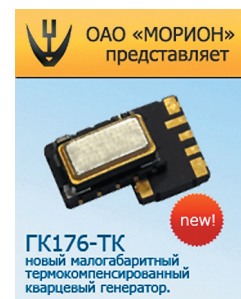


Рис. 12. Миниатюрный прецизионный кварцевый термокомпенсированный генератор, производимый АО «Морион» с применением оборудования F&S Bondtec

3. Шмаков М., Паршин В., Теплякова Е. Технология термовзвучковой микросварки методом «шарик-клин-шарик» и контроль микросварных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7.
4. Зейдл З., Зедльмаер Й., Валев С. Автоматическая головка для тестирования прочности сварных соединений от F&K Delvotec: шаг на пути к бездефектному производству // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 1.
5. ОСТ 11073.013-83 «Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Часть 4. Методы визуального контроля».
6. Rasmussen D. J., Thompson R. Improved Bond reliability through the use of Auxiliary Wires (Security Bumps and Stand-Off Stitch). 2010. [www.circuitnet.com/news/uploads/1/ImprovedWireBondReliability\\_PalomarTechnologies.pdf](http://www.circuitnet.com/news/uploads/1/ImprovedWireBondReliability_PalomarTechnologies.pdf)
7. Lee J. Process Quality Improvement in Thermosonic Wire Bonding. University of Waterloo. Canada, 2008.
8. Gomes J., Mayer M., Lin B. Development of a Fast Method for Optimization of Au Ball Bond Process. University of Waterloo. Canada, 2014.
9. Illyefalvi-Vitéz Z. Application of Safety Bonding Methods to Gold Wire Bonding to Improve Yield and Reliability. Budapest University of Technology and Economics Electronics Technology Department, 2012.