

УДК 621.791

<https://www.doi.org/10.47813/dnit-II.2023.7.395-403>

EDN [MSHLPА](#)



Исследование процесса формирования соединений при микросварке методом «шарик-клин»

Н.Н. Антонычев, М.Б. Архипов*, И.К. Козлов, А.А. Подувальцев, Р.И. Ямгулин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул.Минина, 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

*E-mail: m.b.arhipov@mail.ru

Аннотация. В работе исследован процесс формирования сварных межсоединений кристалл-корпус микросхемы золотой проволокой методом «шарик-клин». Соединение формируется в твердой фазе за счет интенсивной пластической деформации в зоне контакта. Комплекс исследований включает в себя моделирование процесса деформации сварочной проволоки и шарика, рентгенофазовый анализ, моделирование на физических моделях. Показано, что формирование стабильного качества сварных соединений невозможно обеспечить только за счет энергии ультразвука, требуется дополнительная активация зоны сварки, посредством нагрева, динамического приложения усилия нагружения или модулированием энергии ультразвука. Интенсивность пластической деформации в зоне контакта существенно повышается в случае неравномерности сопротивления металла деформированию, с меньшим значением вблизи зоны сварки. Это обеспечит концентрацию пластической деформации и касательных напряжений в зоне контакта и обеспечит получение качественных сварных соединений. Проведенные исследования были учтены при разработке установок термозвуковой сварки методом «шарик-клин».

Ключевые слова: микроэлектроника, микросварка, шарик-клин, золото, микросхема.

The Formation process of the micro-welding compound by the ball-wedge method research

N.N. Antonychev, M.B. Arhipov*, I.K. Kozlov, A.A. Poduvaltsev, R.I. Yamgulin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Mininstreet., 24, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

*E-mail: m.b.arhipov@mail.ru

Abstract. In this study, we researched the process of formation of welded crystal-circuit interconnections of microchips with the use of gold wire using the "ball-wedge" method. The connection is formed in the solid phase due to severe plastic deformation in the contact zone. The complex of studies includes the modelling of the deformation process of the welding wire and the ball, X-ray phase analysis, modeling on physical samples. It is shown that the formation of a stable quality of welded joints cannot be ensured only by energy of ultrasound; it requires the additional activation of the welding zone, by means of heating or dynamic application of the loading force or modulation of the ultrasound energy. The intensity of plastic deformation in the contact zone increases significantly in case of uneven resistance of the metal to deformation, with a lower value near the welding zone. This will ensure the concentration of plastic deformation and shear stresses in the contact zone and ensure the production of high-quality welded joints. The studies carried out were taken into account in the development of thermal-sound welding installations using the "ball-wedge" method.

Keywords: thermosonic welding, micro-welding, ball-wedge, gold, microchip.

1. Введение

Электронная промышленность в значительной мере определяет уровень развития ИТ, промышленности, медицины и т.д. Без возможности проектировать и производить современную элементную базу микроэлектроники, Россия может потерять свои позиции в научно-техническом прогрессе.

Стремительно совершенствуются микроэлектронные технологии - в первую очередь, в направлении снижения топологических размеров чипов, энергетических показателей, новых структур кристаллов и контактных площадок корпусов микросхем.

2. Постановка задачи

Термозвуковая сварка методом «шарик-клин» (ультразвук + сопутствующий подогрев) является одним из наиболее эффективных способов присоединения проволочных выводов и контактных площадок интегральных микросхем [1].

Формирование сварного соединения происходит в твёрдой фазе за счёт интенсивной пластической деформации в зоне контакта золотого шарика с кристаллом и проволоки с подложкой. Акустическая энергия ультразвуковых колебаний и усилие нагружения обеспечивают интенсивную пластическую деформацию и за счет этого активацию поверхностных атомов и формирования межатомных связей.

Исследование характера пластической деформации с целью интенсификации процесса формирования сварного соединения, повышения стабильности и качества, разработки новых подходов к созданию технологии и оборудования, является актуальным.

2.1. Сущность процесса

Материалом для выводов служит золотая проволока Зл 999,9 или алюминиевая (алюминий - кремниевая). Золото имеет более высокую проводимость и теплопроводность, отсутствие окисной пленки обеспечивает чистоту и надёжность контакта, совместимость практически со всеми материалами контактных площадок.

Недостатками золотой проволоки являются высокая стоимость и удельная плотность, опасность образования хрупких соединений типа $AlnAu_m$, однако замена золота на алюминий или медь не всегда возможна.

Сущность процесса заключается в том, что в первой точке перемены — к контактной площадке кристалла присоединяется шарик, образованный путем оплавления проволоки; при этом рабочий инструмент сварочной машины — капилляр — подводит шарик к месту контакта вертикально. Ко второй точке — контактной площадке подложки — капилляр ведет петлю по пологой наклонной траектории, и проволока ложится на площадку горизонтально.



Рисунок 1. Принципиальная схема термовзвучковой микросварки методом шарик-клин.

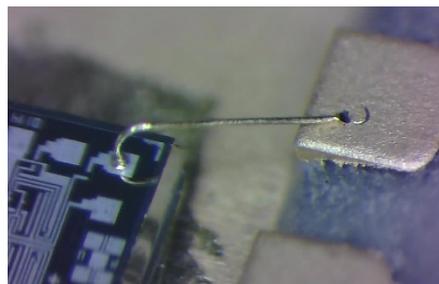


Рисунок 2. Сварное соединение.

3. Методы и материалы исследования

Комплекс исследований включает в себя: моделирование процесса пластической деформации с применением пакета «Deform-3D», исследование прочностных характеристик сварных соединений, моделирование процесса осадки на пластилиновых моделях.

При моделировании - тип объекта: шар диаметром 30 мм (масштаб 500:1), «пластичный», поперечное сечение разбивается на матрицу из 30000 элементов. При расчете значения сопротивления золотой проволоки деформированию σ_s (МПа) от значений степени деформации φ и ΔT – приращения температуры относительно 20 °С принята зависимость.

$$\sigma_s = (103 + 63\varphi^{0.35})\exp(-0.007\Delta T) \quad (1)$$

Указанная зависимость получена на основе данных работы [2] и имеющихся экспериментальных данных и предназначена для ориентировочных расчетов.

В настройках задачи выбраны режимы «Теплопередача» и «Деформирование». Общее количество шагов 100 с величиной шага 0,1 мм.

Исследования также проводились на пластилиновых моделях. Для получения неоднородного температурного поля дно макета нагревалось до температуры 60°C . Контроль температуры осуществлялся по началу плавления сплава Вуда небольшой кусок которого располагался рядом с моделью. Диаметр шарика при сварке составляет 2 - 3 диаметра проволоки (60-90 мкм). Диаметр модели принят 15 мм (75 мкм), масштаб 200:1. За основу 3D модели сварочного инструмента принят капилляр КУЗ [3] в указанном масштабе (Рисунок 5).

Моделирование дало возможность отработать конструкцию инструмента, оценить характер деформации в зависимости от характера распределения прочностных характеристик по слоям.



Рисунок 3. Модель шарика.

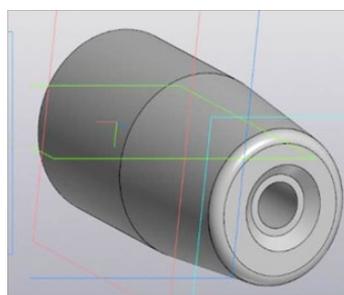


Рисунок 4. Модель инструмента.



Рисунок 5. Модель установки.



Рисунок 6. Деформация без нагрева.



Рисунок 7. Деформация с нагревом.

4. Полученные результаты

Золото имеет более высокое значение энергии преодоления энергетического барьера 4.3 эВ, по сравнению с алюминием 3,0 эВ. Энергия дефектов упаковки для алюминия практически в три раза выше, чем для золота, соответственно для алюминия более интенсивно поперечное скольжение, дислокации легче обходят различные барьеры [4].

Результаты проведенного рентгенофазового анализа по Бреггу-Бретано показывают, что в процессе деформации золотого проводника имеет место упрочнение,

существенно превышающее упрочнение алюминия. Так область когерентного рассеяния золота уменьшается с 1400 \AA до 400 \AA , т.е. имеет место упрочнение. Для алюминия уменьшение незначительно.

Повышенная энергоемкость золота по сравнению с алюминием требует дополнительную активацию атомов и дислокаций, заторможенных у барьеров.

Сопутствующий подогрев приводит к освобождению заторможенных дислокационных скоплений, дополнительно разупрочняет металл, снижает сопротивление металла деформированию.

4.1 Моделирование процесса осадки

При моделировании процесса осадки с применением ПО «Деформ» рассматривались, в том числе, два варианта:

- Модель равномерно нагрета до температуры $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Верхняя консоль модели нагрета до температуры $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, нижняя до $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

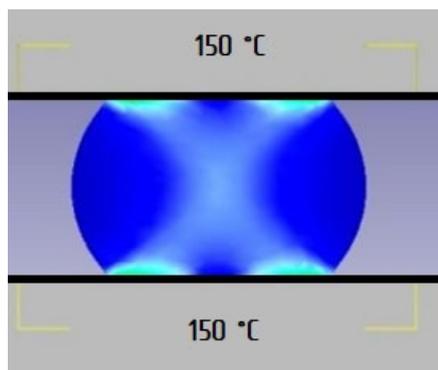


Рисунок 6. Однородное поле.

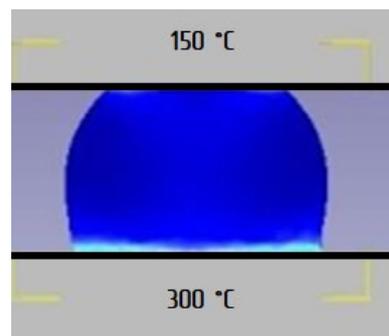


Рисунок 7. Температура подложки выше ($300 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

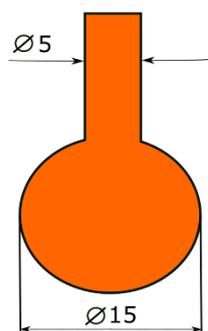


Рисунок 8. Модель проволоки с оплавленным шариком.

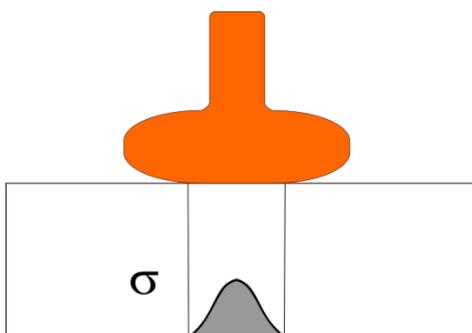


Рисунок 9. Схема деформации без нагрева.

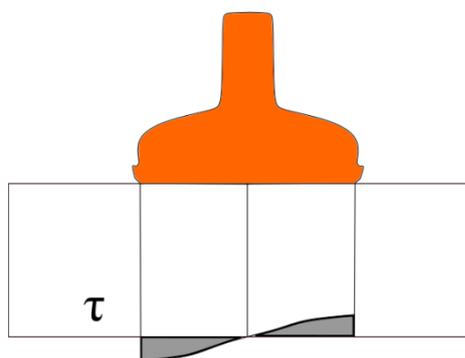


Рисунок 10. Схема деформации с неравномерным нагревом.

Как видно из рисунков 6,7, в случае неоднородности температурного поля (температура выше и соответственно ниже сопротивление металла деформированию в зоне, примыкающей к подложке) имеет место интенсивная пластическая деформация модели по схеме с интенсивной пластической деформацией в зоне контакта, что способствует формированию качественного сварного соединения.

Соответственно, эффективным с точки зрения интенсификации процесса сварки золота является подогрев монтажного столика до температуры 150-200 °С. Результаты моделирования и экспериментов показывают, что подогрев инструмента до температур до 60 °С не оказывает заметного влияния на характер пластической деформации в зоне контакта и формирование сварного соединения. Однако при этом стабилизируется акустический контакт инструмент-проволока, что повышает устойчивость процесса. При одинаковом значении сопротивления металла деформированию по поперечному сечению шарика (например при равномерном нагреве) зона контакта шарика с подложкой притормаживается и осадка происходит по схеме переход боковой поверхности на контактную (боковая поверхность разворачивается и ложится на подложку), при этом интенсивность касательных напряжений в зоне контакта невелика, и качественное твёрдофазное сварное соединение не формируется. Этому также способствует увеличение объема металла, разупрочнённого до значения сопротивления металла деформированию, равным или ниже удельного усилия нагружения.

Ряд приборов не допускают активацию процесса за счет сопутствующего подогрева (полиимидная основа, транзисторы СВЧ и др.). Активация процесса за счет повышения мощности УЗ не эффективна, а в случае сварки приборов с пониженной жесткостью опоры практически невозможна. Проведенные исследования [5] показали эффективность динамического характера процесса, речь идет о программируемом

характере приложения усилия нагружения [5] и мощности ультразвука. Механизм активации за счет динамического нагружения сходен с термическим каналом активации.

Проведенные исследования были учтены при разработке установки термозвуковой сварки методом «шарик-клин» УМС-2ШК [6]. Ультразвуковой генератор УГЕН-20А установки обеспечивает автоматическую адаптацию к резонансу УЗП в частотном диапазоне от 58 до 140 кГц. Встроенная система фазового автоматического управления поддерживает резонансную частоту во всех режимах работы. Интерфейс управления УГЕН-20А имеет выход по каналу RS-232 и генерирует на выходе типы программируемых профилей мощности ультразвука (Рисунок 11).

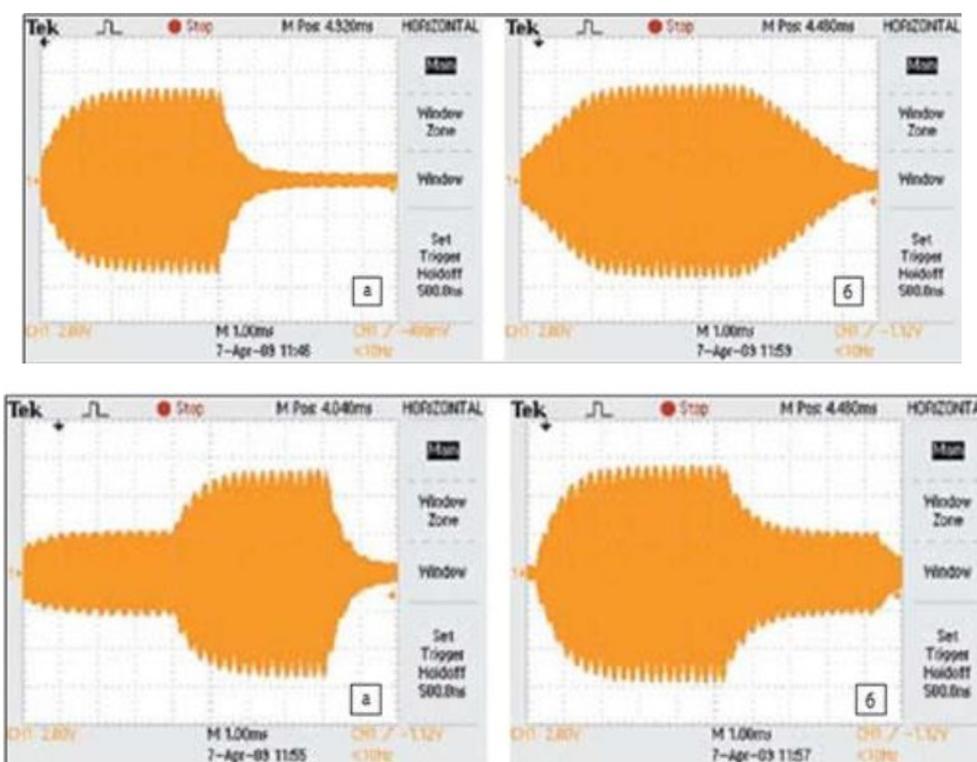


Рисунок 11. Типы программируемых профилей мощности ультразвука.



Рисунок 12. Установка УМС-2ШК с УГЕН-20А.

Таблица 1. Технические характеристики установки УМС-2ШК с УЗ генератором УГЕН-20А.

Проволока, Au, мкм	15-50
Проволока, Al, мкм	27-80
Время сварки, мс	1-1000
Выходная мощность УЗГ, Вт	до 2
Температура рабочего стола, 0С	20-250
Габаритные размеры, мм	685x450x570
Масса не более, кг	35

5. Выводы

Интенсивность пластической деформации в зоне контакта существенно повышается в случае неравномерности сопротивления металла деформированию, с меньшим значением вблизи зоны сварки. Это обеспечит концентрацию пластической деформации а также касательных напряжений в зоне контакта и обеспечит получение качественных сварных соединений.

Показано, что формирование стабильного качества сварных соединений невозможно обеспечить только за счет энергии ультразвука, требуется дополнительная активации зоны сварки, посредством нагрева или динамического приложения усилия нагружения или модулированием энергии ультразвука.

Проведенные исследования были учтены при разработке установок термозвуковой сварки методом «шарик-клин».

Список литературы

1. Свиридов, Е. Разварка золотым шариком и клиновья ультразвуковая микросварка: сравнение / Е. Свиридов // Технологии в электронной промышленности. – 2016. – № 6. – С. 62-63.

2. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд. пер. с нем. / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
3. Готра, З.Ю. Технология микрoeлектронных устройств: Справочник / З.Ю. Готра. – Москва: Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов. Учебник для ВУЗОВ. – 2-е изд. / В.С. Золоторевский. – М: Машиностроение, 1983. – 352 с.
5. Подувальцев, А.В. Основные направления разработки технологического оборудования и его внедрения для сборки и монтажа изделий электронной техники. А.В. Подувальцев, И.К. Козлов и др. Радиолокация. Результаты теоретических и экспериментальных исследований. Кн1. / Под ред. В.Д. Ястребова. – М. Радиотехника, 2018. – 264 с. – с. 199-203.
6. micro-bond.com: сайт. – 2021. – URL: <https://micro-bond.com/ums-2shk-2/> (дата обращения: 01.02.2023).