

# Изучение влияния атмосферного окисления на продолжительность хранения паяльных шаров BGA

Михаил Кужелев

kuzhelev@gsnanotech.com

Егор Соломин

solomin@gsnanotech.com

Вячеслав Чупров

chuprov@gsnanotech.com

## Введение

Одним из этапов производства пластикового корпуса BGA является нанесение массива шариковых выводов. Благодаря этому становится возможным осуществить поверхностный монтаж готового изделия на печатную плату. Несмотря на наличие других видов корпусов микросхем, во многих случаях, особенно при большом количестве контактов на микросхеме, корпус BGA наиболее удобный с точки зрения последующей пайки. Нанесение паяльных шаров при корпусировании интегральных микросхем — одна из важных операций, поэтому полуфабрикат проходит три этапа контроля: визуальную инспекцию, тест на сдвиг, а также рентген-контроль.

На данном этапе при производстве использует несколько материалов — флюс, шарики припоя и сама подложка с контактными площадками. Речь в нашей статье пойдет о припое. К числу вредных факторов, оказывающих губительное влияние на его качество, относится атмосферное окисление, с чем и связаны особые условия хранения открытой упаковки. Изготовители рекомендуют хранить припой в прохладном, сухом, защищенном от света месте, отдельно от несовместимых материалов. Контейнер необходимо держать закрытым. Также отмечается, что материал не требует специальной упаковки.

Проблема получения качественного паяного соединения не нова, и изучают ее многие: производители

ли флюсов, шаров [1], печатных плат для корпусирования [2]. В качестве паяного соединения вносят свой вклад многие факторы. Авторы не ставили задачу определить влияние всех этих факторов, а лишь одного и принять упреждающие действия. Цель данной работы — изучение влияния атмосферы чистых помещений на свойства пайки припоев при производстве BGA-корпусов.

## Оборудование

Для пайки шаров используется промышленное оборудование, состоящее из установки для нанесения припоя и конвейерной печи конвекционного типа. Технология нанесения флюса осуществляется методом переноса игольчатой матрицы на контактные площадки подложки (Pin transfer). Температурный профиль печи предварительно откалиброван и соответствует рекомендациям поставщиков для данного типа припоя. Пайка происходит в атмосфере азота при значениях кислорода менее 100 ppm.

После пайки регистрировались показания теста на оборудовании Dage 4000 plus (рис. 1). Процедура тестирования описана в стандарте JEDEC 22b117A «Тестирование на сдвиг шарообразного припоя», суть которого заключается в определении силы, необходимой для отрыва шарика BGA, и оценке характера разрушающего воздействия.

## Паяльный флюс

Говоря о флюсе, мы должны отметить, что этот материал вносит максимальные коррективы в качество паяного соединения. Для эксперимента был взят отмывочный водорастворимый флюс, согласно классификации IPC J-STD-004A «Требования к паяльным флюсам», кислотность 6,5–7,5 pH, остаточные загрязнения соответствуют IPC J-STD 001D «Требования к пайке электронных и электрических устройств» и не превышают  $4 \times 10^{-7}$  кг/м. Флюс поставляется в тубиках и подается на поддон оборудования для дальнейшего переноса на подложку. В процессе производства проводится регулярная проверка его состояния. Такой подход позволяет избежать многих проблем, связанных с несоответствием флюса производственным требованиям.

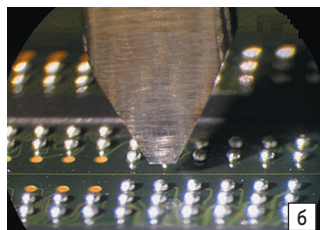
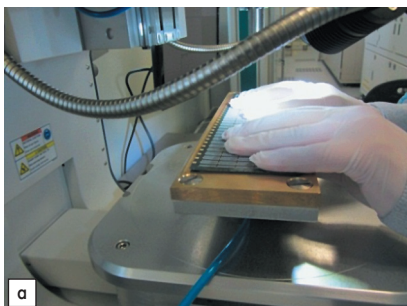


Рис. 1. Процесс проведения тестирования:

а) закрепление подложки на специальном столике; б) наведение инструмента для проведения теста

### Паяльные шары

В течение многих лет для пайки используется олово. Разнообразие сплавов для припоев на основе олова обширно: оловянные, свинцово-оловянные, сплавы на основе олова, серебра и меди, и, наконец, в последнее время появляются шестикомпонентные припои [3]. Господствовавшие ранее свинцовые припои заменяются бессвинцовыми, поскольку директивой RoHS 2011/65/EU ограничено применение свинца в производстве электроники. Кроме того, бессвинцовые сплавы обладают более высокой прочностью и устойчивостью к термоциклированию, а также рекомендуются для пайки компонентов с различными тепловыми коэффициентами линейного расширения [4].

В качестве припоя использовались шары диаметром 450 мкм от четырех различных поставщиков:

- образец 1 (компания 1) — Sn98.5Ag1.0Cu0.5 Ni0.046% (SAC105ND);
- образец 2 (компания 2) — SAC105ND;
- образец 3 (компания 3) — Sn98.5Ag1.0Cu0.5 (SAC105);
- образец 4 (компания 4) — Sn96.5Ag3.0Cu0.5 (SAC305).

### Подложка

Многослойная подложка изготавливается на основе эпоксидной смолы. Контактная площадка подложки — медная с золотым покрытием (гальванический метод с промежуточным слоем никеля).

### Помещение

Эксперимент проводился в чистой комнате, соответствующей 7-му классу согласно ГОСТ Р ИСО 14644-2-2001 [5], с поддержанием влажности 46–52%, а также температуры  $(22 \pm 2)$  °С. Для исключения ошибки показатели влажности регистрировались при процессе монтажа припоя на контактные площадки подложки. Регистрация данных температуры и влажности осуществлялась непрерывно первые 11 ч, а также два раза в каждые последующие сутки в штатном режиме.

### Процедура

Для проведения эксперимента было вскрыто несколько упаковок шарообразного припоя. Процесс пайки выполнялся каждый час в течение первых 11 ч, затем через сутки, через два дня, пять суток и одну неделю. После пайки регистрировались показания теста на сдвиг шара. Время между выходом подложки из печи и снятием результатов измерений не превышало 1 ч (согласно стандарту JEDEC [6]). 20 измерений проводились в различных частях подложки. По полученным значениям были построены диаграммы распределения и проведен анализ отклонения от нормального распределения.

Проводился также рентген-анализ пайки каждой подложки, по результатам которого отмечалась зависимость количества пустот от времени и типа припоя.

Важно учитывать тот факт, что процесс нанесения шариковых выводов на поверхность микросхемы является следующим этапом после герметизации в компаунд. Финальное тестирование микросхем проводится согласно стандарту IPC/JEDEC J-STD 020D «Классификация по уровню чувствительности к влажности негерметичных твердотельных компонентов поверхностного монтажа при пайке оплавлением» и соответствует третьему уровню влагочувствительности, поэтому считаем, что насыщение корпусов влагой происходит на минимальном уровне.

### Предположения

Считается, что разрушение происходит за счет окисления всей структуры в целом и качество паяного соединения зависит от атмосферного (химического) окисления сплава с течением времени. Кроме того, считается, что длительность окисления способствует росту количественного соотношения пустот в интерметаллическом слое к общему объему материала.

Как отмечалось в различных источниках [7], пустоты, как правило, формируются на границе раздела металлов, то есть в той области, где происходит формирование интерметаллического соединения. Исследование толщины окисла показывает [8], что для припоев типа SAC эта величина минимальна по сравнению с другими припоями.

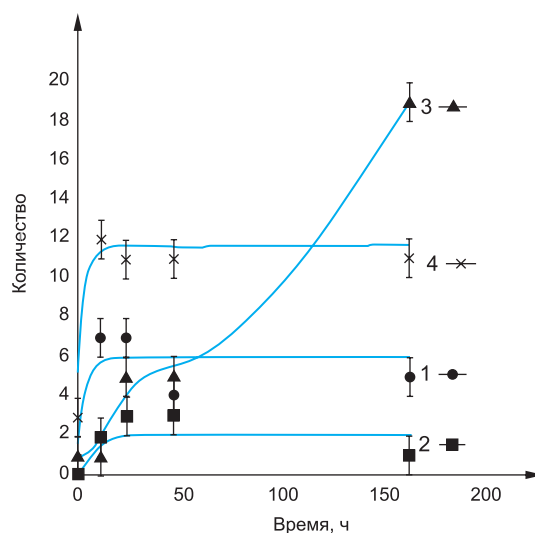


Рис. 2. Кривые законов роста пленок и количество обнаруженных пустот в продукции

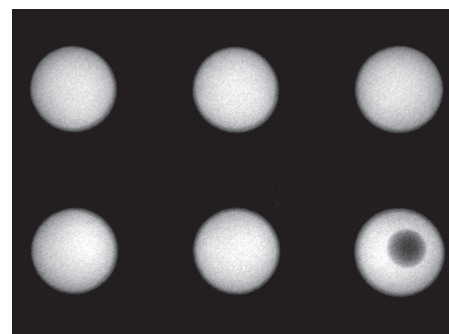
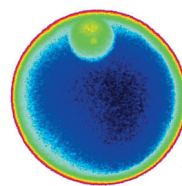


Рис. 3. Пустоты в образцах первого припоя через 11 и 24 ч соответственно

Необходимо также учитывать, что флюс и пайка в атмосфере азота растворяют пленку оксида [9].

Также предполагается, что количество дефектов на припое типа SAC305 выше в промежутке времени, чем количество дефектов на SAC105 и SAC105ND, что объясняется Ying-Hui Wang и соавторами [8].

### Результаты и обсуждения

#### Пустоты

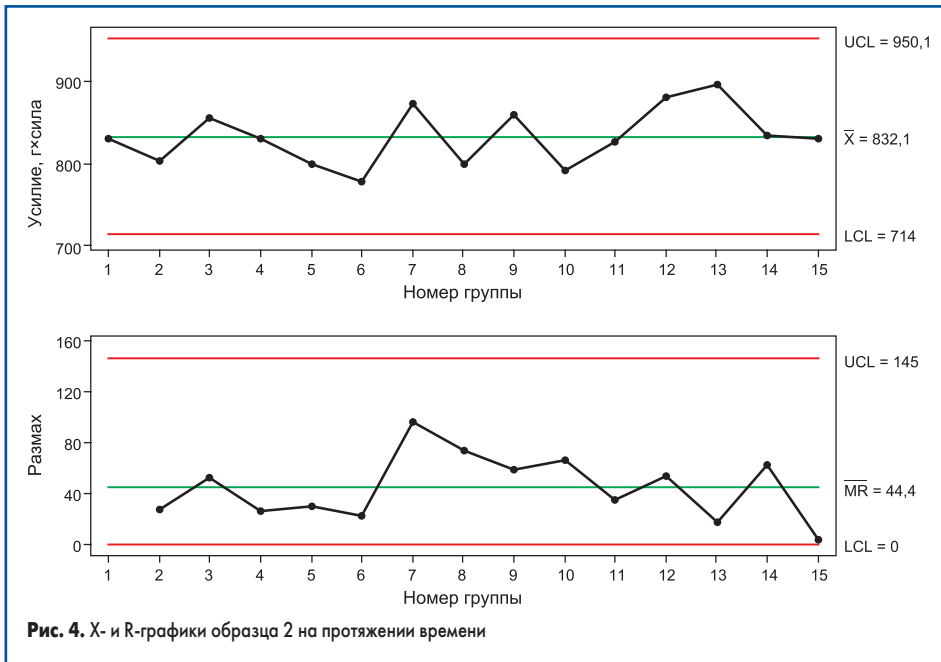
На рис. 2 представлен график зависимости пустот шаров для каждой серии экспериментов в зависимости от времени. Как известно, рост окисных пленок в металлах и сплавах может подчиняться нескольким законам распределения [10]. Тем не менее предполагается преобладание обратного логарифмического закона (образцы 1, 2, 4) и параболического переходящего в линейный закон (образец 3) роста окисла в данном промежутке времени.

Представлены также некоторые фотографии этих дефектов (рис. 3).

Дефектные участки тестировались отдельно на установке теста на сдвиг. Несмотря на то, что их значения были ниже, чем средние по данной подложке, они находились выше минимально допустимой величины для данного типа продукта.

#### Тест на сдвиг

Изначально предполагалось, что изменения во времени приведут к изменениям на контрольных картах Шухарта (индивидуальные значения). Как показано на рис. 4, на примере второго образца никаких критических отклонений не произошло, так как нет выхода за контрольные пределы (UCL, LCL — верхний и нижний контрольный предел соответственно). Следует отметить, что предварительно с помощью критерия Смирнова были отсеяны грубые промахи. Тем не менее, графики для всех образцов показывают, что процесс стабилен, поэтому было решено проанализировать данные другим методом.



Далее проводилось сравнение значений дисперсий и математических ожиданий. Регистрируя 20 значений в течение каждого часа, мы приняли решение сравнивать их последовательно между собой, то есть 1 с 2, 2 с 3 и т.д. Таким образом, замечая одно отклонение, мы предполагали, что

далее тоже будут происходить изменения по мере формирования оксида внутри фрактальной структуры. Тем самым изменения будут свидетельствовать о минимальном изменении уровня окисления. Для сравнения двух рядов наблюдений использовался критерий Фишера (сравнение

двух дисперсий) и критерий Стьюдента (сравнение математических ожиданий).

Нулевой гипотезой предполагалось, что структура сплава не изменяется под действием атмосферного окисления. Альтернативной гипотезой предполагалось, что есть различие в структуре сплава.

В таблицах 1–4 представлены расчеты для сравнения математических ожиданий и дисперсий всех образцов. Отклонение значений от предыдущего выделено цветом.

Самыми стабильными во времени являются припой образцов 1 и 2, содержащие в качестве добавки минимальный процент никеля, обладающий высокой коррозионной стойкостью, препятствующий окислению сплава в целом [11]. Как известно, окисление происходит в два этапа: первый из них характеризуется окислением поверхности припоя, а второй — ростом оксида на внутренних дефектах кристаллической решетки материала.

Кроме того, на седьмые сутки не замечено отклонений ни у одного образца, таким образом, предполагается, что насыщение сплава кислородом закончилось и дальнейшее изменение и рост могут быть связаны с наличием примесей (например, сульфидов и хлоридов, разрушающих серебро) в атмосфере. Однако в чистых помещениях такое не наблюдается.

**Таблица 1.** Образец 1 SAC105ND

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	24	48	5×24	7×24
Среднее значение	795	832,75	827,19	836,84	842,05	848,05	888,75	905,68	932,8	849,4	850,16	849,65	888,94	859,6	841,4
Дисперсия	1080,63	3107,36	3613,26	3587,47	2005,39	2353,52	3621,04	3026,23	6081,43	2926,57	1841,03	2734,24	1923,11	2546,78	3382,04
Критерий Фишера	2,17	2,14	2,19	2,18	2,203	2,17	2,20	2,18	2,17	2,20	2,18	2,20	2,18	2,17	2,17
Расчетное значение Фишера	2,88	1,17	1,01	1,79	0,85	1,54	0,84	2,01	2,08	0,63	0,67	0,7	0,76	1,33	1,15
Расчетное время	2,61	0,31	0,51	0,31	0,4	2,35	0,93	1,26	3,93	0,05	0,03	2,54	1,89	1,06	
Табличное время	2,07	2,02	2,02	2,03	2,03	2,02	2,02	2,03	2,02	2,02	2,03	2,02	2,03	2,02	2,02

**Таблица 2.** Образец 2 SAC105ND

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	24	48	5×24	7×24
Среднее значение	830,35	803,5	855,7	829,76	799,55	777,05	872,7	799,3	857,95	791,65	825,95	878,9	895,7	833,15	829,95
Дисперсия	1413,92	3833,42	4106,54	5293,09	5205,84	1557,5	4593,17	4277,17	4425,94	3061,29	6329	4538,83	4827,69	4535,19	3073,52
Критерий Фишера	2,17	2,17	2,14	2,16	2,2	2,18	2,17	2,17	2,17	2,17	2,24	2,24	2,17	2,17	
Расчетное значение Фишера	2,71	1,07	1,29	1,02	3,34	2,95	1,07	1,03	1,45	2,07	1,31	1,23	1,06	1,06	
Расчетное время	1,66	2,62	1,21	1,33	1,2	5,35	3,49	2,81	3,43	1,58	3,02	0,78	2,89	0,16	
Табличное время	2,07	2,02	2,02	2,03	2,02	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02

**Таблица 3.** Образец 3 SAC105

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	24	48	5×24	7×24
Среднее значение	745,81	747,9	789,1	760,50	849	804,57	805,55	819,35	753,7	800,45	817,5	878,9	895,7	808,3	803,38
Дисперсия	1156,06	356,94	1725,29	1518,68	3514,63	2119,96	3778,16	2017,82	1705,91	1222,79	2415,95	4538,83	4827,69	1680,43	4038,25
Критерий Фишера	2,16	2,14	2,16	2,17	2,14	2,16	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,2	2,17	2,14	
Расчетное значение Фишера	3,24	4,83	1,14	2,31	1,66	1,78	1,87	1,18	0,72	1,98	1,88	1,06	2,87	2,4	
Расчетное время	0,24	4,05	2,27	5,58	2,69	0,06	0,81	4,81	3,86	1,26	3,33	0,78	4,88	0,3	
Табличное время	2,07	2,02	2,02	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02

**Таблица 4.** Образец 4 SAC305

Время	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	24	48	5×24	7×24
Среднее значение	852,3	821,9	822,89	869,32	898,1	817,19	841,8	909,7	890,32	899,95	843,2	887,29	919,2	854,75	863,05
Дисперсия	1921,38	1665,25	1694,21	4850,56	3717,04	4198,76	4884,69	5362,85	4873,45	3755,94	2523,25	5159,21	2121,5	3105,71	3559,27
Критерий Фишера	2,17	2,2	2,2	2,22	2,14	2,16	2,17	2,2	2,18	2,17	2,14	2,16	2,17	2,2	
Расчетное значение Фишера	1,45	1,02	2,86	1,3	1,13	1,16	1,1	1,1	1,3	1,49	2,04	2,43	1,46	0,87	
Расчетное время	2,27	0,08	2,5	1,38	4,11	1,17	3	0,85	0,46	3,2	2,28	1,67	2,99	0,36	
Табличное время	2,02	2,02	2,06	2,02	2,02	2,02	2,02	2,03	2,03	2,02	2,02	2,06	2,02	2,02	2,02

Для более наглядного отображения результатов сведем данные из таблиц 1–4 в график зависимости изменений структуры припоя (отклонения математического ожидания) от времени (рис. 5).

### Выводы

1. Хранение припоя на открытом воздухе в течение недели не влечет за собой качественного ухудшения характеристик паяного соединения для массового производства. Существенный положительный вклад вносит реакция припоя с флюсом в атмосфере азота, что позволяет использовать припой при таких размерах толщины пленки окисла. Варианты, при которых есть необходимость хранить материал дольше одной недели, авторами не рассматриваются. Тем не менее мы придерживаемся практики хранения открытого припоя в атмосфере с поддержанием уровня влажности не более 15%.
2. Детальный анализ соединений показал, что в образцах происходят изменения с течением времени. Так как изменение происходит в два этапа, из показанных результатов авторы предполагают, что первый этап длится порядка 12 ч, второй этап варьируется и зависит как от припоя, так и от морфологии атомарной поверхности сплава, но при этом не превышает пяти дней.
3. Образец припоя № 3 имел значительно больше пустот после пайки. Не исключено, что это связано с некачественным припоем.
4. Включение никеля в состав припоя оказывает положительный эффект на устойчивость к атмосферному окислению.

### Литература

1. Echeverria G., Santos D. et al. Effect of Lead-Free Assembly Processing on Solder Joint Voiding. [http://aam.alent.com/leadfree/pdfs/IPC\\_Paper\\_Lead-Free\\_Voidingv4.pdf](http://aam.alent.com/leadfree/pdfs/IPC_Paper_Lead-Free_Voidingv4.pdf)
2. IPC-7095B. Committee of IPC. США, 2008.
3. Wilding I. J., Toleno G. J. High Reliability Pb-Free Halogen Free Solder. Henkel Electronics Group, 2014.
4. Поверхностный монтаж. Каталог ООО «Предприятие Остек». [http://www.ostec-materials.ru/tech\\_lib/technology/poverkhnostnyy-montazh.php](http://www.ostec-materials.ru/tech_lib/technology/poverkhnostnyy-montazh.php)
5. ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. М.: Стандартинформ, 2008.

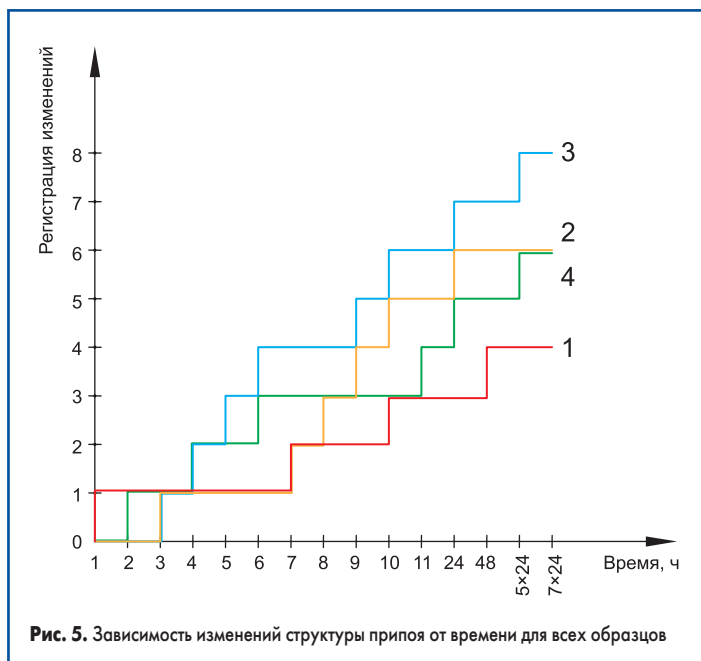


Рис. 5. Зависимость изменений структуры припоя от времени для всех образцов

6. JEDEC STANDARD JESD22-B117A Solder Ball Shear. JEDEC Solid State Technology Association. Вирджиния, 2006.
7. Subramanian K. N. Lead-free Solders. Materials Reliability for Electronics. Пособие. Wiley, 2012.
8. Wang Y.-H. et al. Study on Sn-Ag Oxidation and Feasibility of Room Temperature Bonding of Sn-Ag-Cu Solder Material Transactions. Japan Institute of Metals. Sendai, 2005. Vol. 46.
9. Dong C. C. et al. Effects of Atmosphere Composition on Soldering Performance of Lead-free Alternatives. <http://www.airproducts.com/~media/downloads/white-papers/E/en-effects-of-atmos-comp-soldering-performance-lead-free-alternatives-whitepaper-450-10-012-glb.pdf>
10. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. Учебник. Металлургия, 1976.
11. Rabiattull Aisha I. S. et al. Effect of Nickel Doping in Sn-Ag-Cu Solders on Intermetallic Compound Formation with Immersion Silver and Bare Copper Surface Finish. EMAP. Малайзия, 2009.