

m^{-1} на длине волны фотовозбуждающего излучения (0,96 мкм) дает значение, которое может отличаться от полученного из рассмотренных выше частотных измерений примерно на 2%. Значение скорости поверхностной рекомбинации, рассчитанное по формуле (1) при $I_s = 4 \cdot 10^3$ Вт/м², составляет 25 м/с. При расчетах полагалось, что излучение фотовозбуждающего лазерного диода в плоскости образца образует конус с площадью около 1 см².

Предлагаемая методика не требует использования данных о коэффициенте диффузии и объемном времени жизни носителей и может быть полезной для определения скорости поверхностной рекомбинации при использовании излучений миллиметрового диапазона.

Список использованных источников

1. Palais O., Arcari A. Contactless measurement of bulk lifetime and surface recombination velocity in silicon wafers // J. Appl. Phys. – 2003. – vol. 93. – no. 8. – pp. 4686–4690.
2. Separation of the bulk lifetime and surface recombination velocities in semiconductor wafer by a single microwave photoconductance/ F. X. Chen et al// Semicond. Sci. and Technology. 2004. vol. 19, no. 9. P. 959–963.
3. Богатыренко В.В., Зиновчук А.В. Измерение скорости поверхностной рекомбинации и объемного времени жизни в пластинах Si по кинетике избыточного теплового излучения // Физика и техника полупроводников. 2015, Т. 45, вып. 1. С. 62 – 66.
4. Басс Ф.Г., Гуревич Ю.Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М.: Наука, 1975. 400 с.

УДК 621.791.313.5

М.Д. Мордасов, П.А. Шерстеникин, Д.М. Мордасов
Тамбовский государственный технический университет
Тамбов, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРМОВОЗДУШНОЙ ПАЙКИ

Аннотация. Проведен анализ поверхностей разрушения паяных соединений, полученных при помощи термовоздушной пайки. Выявлены дефекты характерные

для термовоздушной пайки и осуществлена оценка их влияния на прочностные характеристики швов.

M.D. Mordasov, P.A. Sherstenikin, D.M. Mordasov

Tambov State Technical University

Tambov, Russia

STUDY OF JOINTS OBTAINED BY THERMAL AIR SOLDERING

***Abstract.** The analysis of the fracture surfaces of soldered joints obtained by thermal air soldering is carried out. The defects of thermal air soldering have been identified and their influence on the strength characteristics of the seams has been evaluated.*

При изготовлении габаритных тонкостенных изделий из металлов и сплавов, таких как корпуса теплообменников, резервуаров, объемные и коаксиальные резонаторы и др., возникает ряд прикладных научных проблем, в том числе связанных с выбором адекватного способа неразъемного соединения их компонентов. В ряде случаев единственным возможным способом является низкотемпературная пайка. Наиболее широко применяемые технологии низкотемпературной пайки в печах и в ваннах, наряду с очевидными преимуществами имеют главный недостаток, связанный с ограничением верхнего предела габаритных размеров паяемых конструкций. Недостатком газопламенной пайки, позволяющей осуществлять пайку любых по размеру конструкций, является необходимость работы с открытым огнем, а также сложность осуществления низкотемпературных процессов. Единственным способом регулирования температуры в этом случае является увеличение и точное поддержание расстояния между горелкой и паяемыми поверхностями, что технически сложно реализуемо.

Перспективной технологией для решения, обозначенной выше проблемы, является бесконтактная низкотемпературная пайка горячим газом (термовоздушная) [1, 2].

При разработке новых технологий неразъемного соединения деталей важным этапом является контроль качества, который может проводиться как с применением методов неразрушающего контроля, так и разрушающими методами. На этом этапе определяют наличие дефектов в шве, а также структуру диффузионной зоны соединения. Исследования структуры проводятся при помощи методов микроскопии. Для определения дефектов применяют визуальный измерительный контроль, методы, основанные на использовании

излучений, а также методы механических испытаний с последующим фрактографическим анализом поверхностей разрушения.

В настоящей работе приведены результаты исследования паяных швов деталей из меди, полученных при помощи термовоздушной низкотемпературной пайки [1].

При проведении исследований были изготовлены образцы паяных соединений (ГОСТ 19249-73) пластин из меди МЗр толщиной 2 мм: ПВ-1 (стыковое), ПН-1 (нахлесточное), ПТ-1 (тавровое).

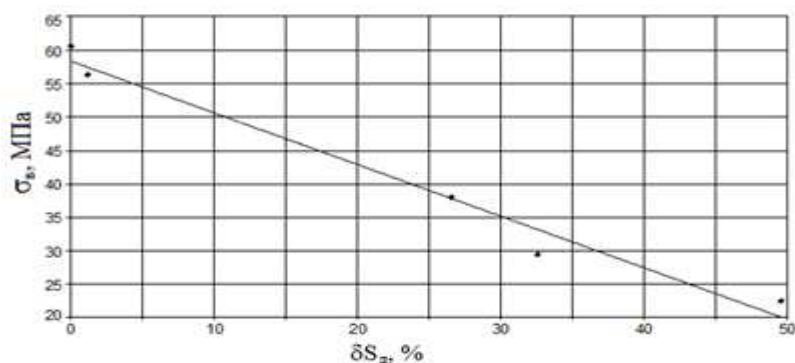
Пайка экспериментальных образцов осуществлялась оловянно-свинцовым припоем ПОС-61 в виде прутка диаметром 2 мм.

Механические испытания образцов паяных соединений проводились на универсальной разрывной машине УТС-101-5 (скорость 20 мм/мин, тип датчика 5000 Н). Стыковые и нахлесточные соединения испытывались в режиме растяжения до полного разрушения образцов, тавровые соединения испытывались при работе машины в режиме сжатия. Обработка результатов механических испытаний осуществлялась с использованием программно-технического комплекса «Analyzer».

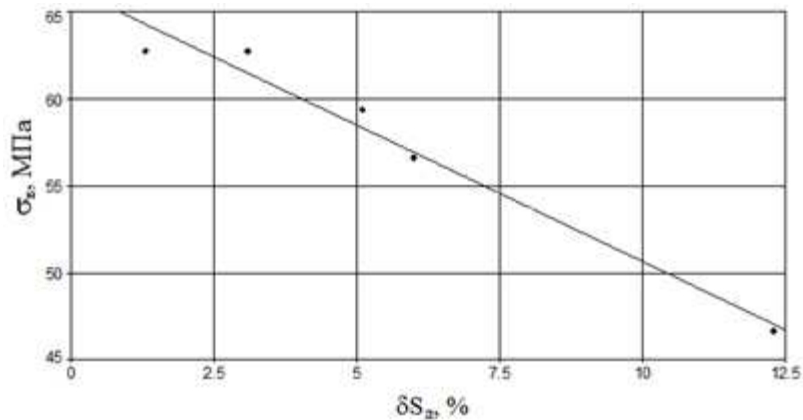
Исследование поверхностей разрушения на наличие дефектов пайки осуществлялось путем обработки их микрофотографий в программе анализа данных микроскопии Gwyddion 2.63.

При анализе изломов паяных соединений выявлено, что преобладающим дефектом является непропай - частичное незаполнение паяльного зазора припоем, незначительная доля приходится на порообразование. В среде программы Gwyddion 2.63 осуществлена идентификация этих дефектов и определение их суммарной площади в отношении к общей площади паяного соединения.

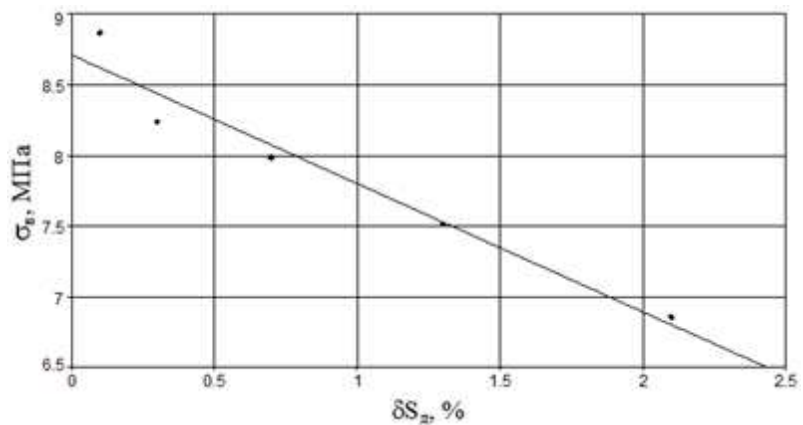
На рис. 1 представлены зависимости прочности при разрушении σ_b от относительной площади дефектов δS_d при пайке встык, внахлест и при пайке таврового соединения.



а)



б)



в)

Рис. 1 - Зависимость прочности при разрушении от относительной площади дефектов при пайке встык (а), внахлест (б), втавр (в)

В результате аппроксимации экспериментальных данных полиномом первой степени получены следующие выражения:

- при пайке встык: $\sigma_b = 58,37 - 0,77 \cdot \delta S_d$, $R^2 = 0,97$;
- при пайке внахлест: $\sigma_b = 66,37 - 1,57 \cdot \delta S_d$, $R^2 = 0,97$;
- при пайке таврового соединения: $\sigma_b = 8,71 - 0,91 \cdot \delta S_d$, $R^2 = 0,95$.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при изменении относительной площади дефектов на 1 %, прочность при разрушении для различных видов соединения изменяется следующим образом:

- стыковое – на 1,3%;
- нахлесточное – на 2,4 %;
- тавровое на 10 %.

При растяжении стыкового паяного шва влияние дефектов типа «непропай» и «пора» на прочность шва наименьшее, что связано с особенностями формирования шва. При сборке деталей под пайку устанавливается определенный зазор, который в дальнейшем заполняется припоем. Прочность такого соединения в значительной степени определяется величиной прослойки припоя между

поверхностями паяемых деталей. При растяжении шва, в условиях стесненной деформации, формируется жесткое объемное напряженное состояние, возникающее в шве, что обуславливает повышение прочности соединения.

На прочность нахлесточных соединений наибольшее влияние оказывают непропаи по краям паяемой области, уменьшающие эффективную площадь нахлестки. Напряженное состояние в нахлесточном соединении неоднородно, на краях возникает концентрация напряжений, сдвиговые деформации максимальны, однако в силу структурной неоднородности шва, формирующейся при его кристаллизации, они практически не передаются в объем шва, и возможное наличие там пор оказывает слабое влияние на прочностные характеристики. Следует отметить, что влияние на прочность нахлесточного соединения оказывает наличие галтелей, которые снижают концентрацию напряжений на краю соединения.

В отличие от стыковых и нахлесточных соединений, работающих преимущественно при растягивающих или сжимающих нагрузках, тавровое соединение может эксплуатироваться в широких условиях приложения усилий. При растягивающей нагрузке, которая приложена в направлении перпендикулярном оси шва, тавровый шов работает аналогично стыковому. При выбранной схеме испытания таврового соединения (рис. 2) зарождение трещины происходит с обратной стороны шва в непосредственной близости к детали 2. Область концентрации напряжений смещается по мере раскрытия трещины в сторону шва, а на диаграмме нагружения появляется протяженная зона разрушения, ширина которой составляет 75-95% от толщины паяемых пластин. Учитывая такой механизм разрушения таврового соединения, становится очевидной высокая чувствительность прочности к наличию дефектов, в том числе и внутренних.

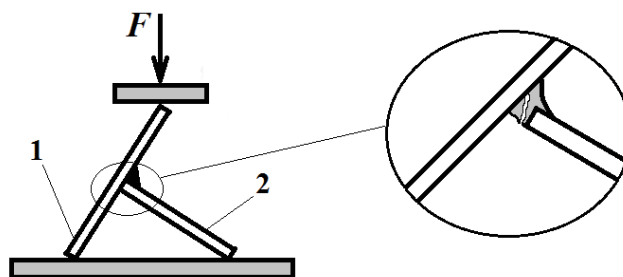


Рис. 2 - Схема испытания на излом образца таврового паяного соединения (1, 2 – детали, составляющие соединение; F – сжимающее усилие)

Таким образом, проведенный в работе анализ поверхностей разрушения паяных соединений позволил выявить дефекты характерные для термовоздушной пайки. Осуществлена оценка влияния относительной площади этих дефектов на прочностные характеристики швов. Установлено, что наибольшее уменьшение прочности в зависимости от наличия дефектов характерно для тавровых швов, что связано с особенностями распределения напряжений в ходе их нагружения.

Работа выполнена в рамках программы конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года» управления образования и науки Тамбовской области, проект № МУ2022-02/27.

Список использованных источников

1. Мордасов Д.М. Термовоздушная пайка габаритных тонкостенных изделий из меди / Д.М. Мордасов, П.В. Монастырев, М.Д. Мордасов, А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, В.А. Езерский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2023. – Т. 29. № 3. – С. 497-506.
2. Луконин, Н. В. Применение способа бесконтактной пайки для создания высоконадежных прецизионных соединений антенно-фидерных устройств космических аппаратов / Н.В. Луконин, О.А. Белов, Д.М. Доронкин, А.Н. Коробкин, И.Я. Шестаков // Исследования наукограда. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 144 – 150.

УДК 621.785.53

Е.Б. Панченко, П.А. Шерстеникин, М.Д. Мордасов
Тамбовский государственный технический университет
Тамбов, Россия

ТВЕРДОФАЗНОЕ АЗОТИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. Проведено азотирование из твердой среды различных сталей, легированных хромом. Осуществлен металлографический анализ диффузионных слоев. Определены факторы, влияющие на качество диффузионного слоя.