

МЕХАНИКА

MECHANICS

Научная статья

УДК 531.7

doi: 10.17223/19988621/76/4

Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем

Антон Владимирович Азин¹, Николай Николаевич Марицкий²,
Сергей Васильевич Пономарев³, Сергей Владимирович Рикконен⁴

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ antonazin@mail.ru

² nnmar.niipmm@mail.ru

³ psv@niipmm.tsu.ru

⁴ rikk2@yandex.ru

Аннотация. Работа направлена на разработку метода неразрушающего контроля радиоэлектронного оборудования и его комплектующих. Метод позволяет выявить скрытые дефекты в конструкции электронной платы и спрогнозировать ресурс работы этой платы с учетом характера вероятных нагрузок при ее эксплуатации. Результаты аналитической оценки ресурса электронной платы верифицированы на основе данных экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с IPC-9701. Погрешность прогнозирования не превышает 5%.

Ключевые слова: электронная плата, паяное соединение, микросхема, скрытый дефект, метод неразрушающего контроля, надежность, долговечность

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0721-2020-0036).

Для цитирования: Азин А.В., Марицкий Н.Н., Пономарев С.В., Рикконен С.В. Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 43–55. doi: 10.17223/19988621/76/4

Prediction of durability of soldered contact joints of chips

Anton V. Azin¹, Nikolay N. Maritsky²,
Sergey V. Ponomarev³, Sergey V. Rikkonen⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ antonazin@mail.ru

² nnmar.niipmm@mail.ru

³ psv@niipmm.tsu.ru

⁴ rikk2@yandex.ru

Abstract. The study is aimed at developing a nondestructive testing method for electronic equipment and its components. This method allows one to identify critical design defects of printed circuit boards (PCB) and to predict their service life taking into account the nature of probable operating loads. The study uses an acoustic emission method to identify and localize critical design defects of printed circuit boards. Geometric dimensions of detected critical defects can be determined by X-ray tomography. Based on the results of the study, a method combining acoustic emission and X-ray tomography has been developed for nondestructive testing of printed circuit boards. The stress-strain state of solder joints containing detected defects is analyzed. Durability is predicted using the damage function of the material, experimental fatigue curve with allowance for rheological properties of materials, the temperature effects, and complex stress-strain state. The results of using the developed method for estimating the degree of damage of the electronic board have been verified based on the experimental results of studies carried out in accordance with IPC-9701. The prediction error does not exceed 5%.

Keywords: printed circuit boards, solder joint, chip, latent defect, nondestructive testing method, reliability, durability

Acknowledgments: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0721-2020-0036).

For citation: Azin, A.V., Maritsky, N.N., Ponomarev, S.V., Rikkonen, S.V. (2022) Prediction of durability of soldered contact joints of chips. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 76. pp. 43–55. doi: 10.17223/19988621/76/4

Введение

Надежность паяных соединений часто становится очень неприятной проблемой при разработке электронных систем. На нее влияет множество различных факторов, и каждый из них может значительно сократить срок службы соединений.

Точное выявление и устранение потенциальных причин отказа паяных соединений в процессе проектирования и изготовления может предотвратить ряд сложных проблем и связанные с ними убытки на более поздних этапах жизненного цикла продукта. Распространенными причинами отказа паяных соединений являются [1]:

1. Нежелательные напряжения, вызванные применением защитных покрытий.

Защитные покрытия (potting, underfill, conformal coating) обладают разными термическими и физико-механическими свойствами. Важными свойствами, кото-

рые нужно учитывать при выборе материала покрытия, являются температура стеклования, модуль упругости и коэффициент линейного теплового расширения.

2. Недооценка температурного цикла работы электронной платы (ЭП).

Для получения точных показателей надежности электронной системы необходим выбор модели долговечности для прогнозирования ресурса ЭП с учетом зависимости долговечности от диапазона температур, времени выдержки и скорости изменения температуры.

3. Механическое перенапряжение.

Для микросхем с мелким шагом выводов характерен отказ, вызванный перенапряжением в паяном соединении, который обычно проявляется в виде отслоения контактных площадок или трещины вдоль интерметаллического соединения припоя с контактной площадкой.

4. Крепление платы и место монтажа компонентов.

Расположение точек крепления и другие ограничения на перемещения платы оказывают значительное влияние на место возникновения и величину относительных деформаций платы в условиях теплового расширения, ударных и вибрационных нагрузок. Зеркальное расположение компонентов ограничивает деформации платы, делая ее более жесткой, что приводит к дополнительным напряжениям в паяных соединениях.

5. Дефекты пайки

Для того чтобы обеспечить высокое качество производства, необходимо проводить анализ микрошлифов и визуальный осмотр паяных соединений, прежде чем выпускать электронное устройство в эксплуатацию.

Одним из самых распространенных видов дефектов пайки многовыводных микросхем являются пустоты. Факторами, вызывающими пустоты в пайке, являются:

- дизайн трафарета и профиль оплавления;
- паяльная паста и дизайн печатных плат;
- обработка поверхности печатной платы и рабочая среда.

Различают следующие типы пустот паяных соединений многовыводных микросхем (рис. 1) [2]:

- 1) микропустоты (от 25 до 50 мкм в диаметре);
- 2) макропустоты (от 100 до 300 мкм в диаметре, в зависимости от размеров паяного соединения) – образуются при захвате газов во флюсе и паяльной пасте;
- 3) усадочные пустоты – удлиненные и шероховатые пустоты, начинающиеся с поверхности паяных соединений;
- 4) пустоты переходных отверстий;
- 5) интерметаллические пустоты – пустоты субмикронного размера в месте соединения припоя и контактной площадки, образующиеся при воздействии на плату повышенных температур;
- 6) точечные пустоты диаметром от 1 до 3 мкм, расположенные между слоем интерметаллидов и медной площадкой.

Согласно IPC (IPC-A-610) пустоты в припое считаются дефектом, если общая расчетная площадь всех пустот в любом заданном шарике / соединении припоя превышает 25% от общей площади шарика припоя при рентгеновском контроле качества паяных соединений ЭП [2].

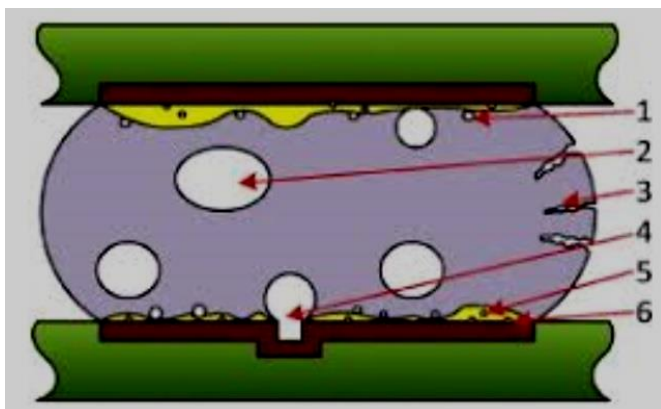


Рис. 1. Типы пустот паяного соединения [2]: 1 – микропустоты; 2 – макропустоты; 3 – усадочные пустоты; 4 – пустоты переходных отверстий; 5 – интерметаллические пустоты; 6 – точечные пустоты

Fig. 1. Type of voids in a solder joint [2]: (1) microvoids; (2) macrovoids; (3) shrinkage voids; (4) micro-via voids; (5) Kirkendall voids; and (6) pinhole voids

Пустоты в паяных соединениях – это потенциальные латентные дефекты, которые могут ускорить рост трещины в паяном соединении при эксплуатационных нагрузках ЭП [3]. Поэтому, независимо от размеров пустот, имеют огромное значение метод выявления пустот в паяном соединении и прогнозирование ресурса ЭП на базе выявленных дефектов.

1. Метод прогнозирования ресурса ЭП

Неразрушающие методы контроля позволяют выявлять дефекты паяных соединений многовыводных микросхем, при этом для прогнозирования ресурса ЭП требуются дополнительные исследования влияния найденных дефектов на целостность паяных соединений с учетом характера вероятных эксплуатационных нагрузок.

Проведенные авторами экспериментальные исследования на образцах ЭП с BGA микросхемами позволили адаптировать комбинацию методов неразрушающего контроля – метода акустической эмиссии (АЭ) и метода рентгеновской томографии (РТ) – для выявления скрытых дефектов в конструкции ЭП [4].

Метод АЭ позволяет при нагрузках, соответствующих эксплуатационным нагрузкам ЭП, выявлять дефекты паяных соединений, которые активируются и развиваются при нагружении. Для определения местоположения скрытых дефектов в конструкции ЭП использовали программное обеспечение AEWIn и аппаратуру Micro2 digital AE system (США) [5].

Метод РТ позволяет определить геометрические размеры выявленных активных дефектов и их расположение в паяных соединениях для проведения численного анализа надежности паяных соединений и ЭП в целом. Данные о скрытых дефектах получены с помощью микрофокусной системы рентгеновской томографии Y. Cheetah 160kV [4].

Методика совместного применения методов АЭ и РТ для получения данных о местоположении и геометрических размерах скрытых дефектов подробно раскрыта в [4].

Новизна данного исследования заключается в совершенствовании модели усталостной долговечности паяных соединений:

- для прогнозирования долговечности используются значения эквивалентных деформаций, что позволяет учитывать не только сдвиговые деформации в плоскости из-за разного термического расширения платы и чипа, но и нормальные, вызванные искривлением платы;

- применена уточненная математическая модель механического поведения материала припоя, учитывающая ползучесть при сравнительно длительном времени деформирования.

Определение механических характеристик материала припоя ПОС-61, используемого для присоединения микросхемы к ЭП, проводили с помощью усталостной испытательной системы INSTRON 8801 (США) в соответствии с ГОСТ 1497–84. Циклические испытания материала припоя ПОС-61 проводили с помощью усталостной испытательной системы INSTRON 8801 (США) в соответствии с ГОСТ 25502–79 [4].

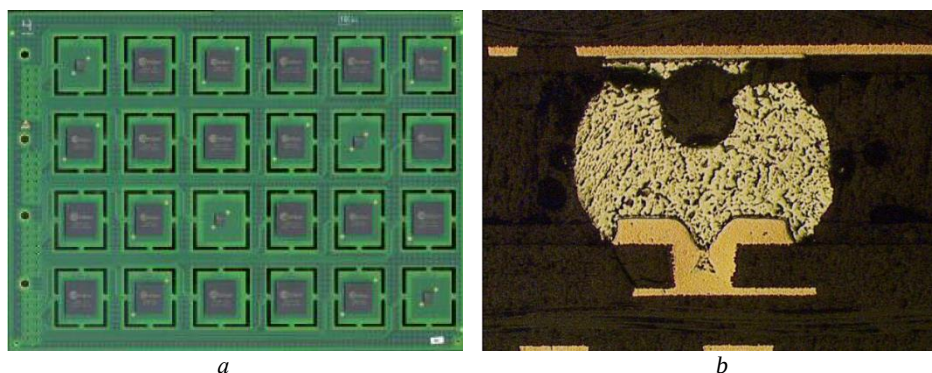


Рис. 2. Экспериментальные исследования из [3]: *a* – экспериментальный образец; *b* – разрушение дефектного паяного соединения в угловом внешнем ряду, 264 цикла, пустота составляет 18% от объема паяного соединения

Fig. 2. Experimental studies [3]: (*a*) test vehicle, (*b*) BGA void assessment: 18% void, outer row, 264 cycles

Для определения максимума интенсивности напряжений в материале припоя при заданных нагрузках проводили численное моделирование паяных соединений BGA контактов с помощью программного пакета ANSYS Mechanical.

Для верификации данных численного анализа предложенного метода использовали результаты эксперимента стороннего исследования из [3]. Исследования по определению влияния пустот в компонентах BGA и CSP с использованием испытаний на термический цикл (от -55 до $+125^{\circ}\text{C}$) в [3] были проведены в соответствии со спецификацией IPC-9701 для оловянно-свинцовых припоев (рис. 2).

2. Численный анализ

2.1. Определение механических характеристик материала припоя ПОС-61

Для определения механических характеристик припоя проведены испытания на одноосное растяжение и циклические испытания [4]. По результатам испытаний на одноосное растяжение установлена билинейная зависимость напряжений от деформации для материала припоя. Для определения параметров модели длительной прочности использовалось соотношение Коффина–Менсона:

$$N^m \Delta \varepsilon = C_N, \quad (1)$$

где N – количество циклов при данной деформации; C_N, m – параметры модели (для данного материала при температуре 20°C $C_N = 0.1892$, $m = 0.53$); $\Delta \varepsilon$ – размах деформации.

Большинство экспериментальных данных по длительной прочности металлов получено по результатам одноосных испытаний, но при оценке реальной работоспособности элементов конструкций необходимо учитывать неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС) [6–10]. В настоящее время существует несколько способов определения эквивалентных величин напряжений и деформаций, некоторые из которых требуют проведения либо большого количества экспериментов для определения параметров, либо сложных вычислений, не приводящих к существенному увеличению точности прогнозирования.

В работе [11] проведен детальный обзор видов эквивалентных величин и для описания длительной прочности в условиях плоского деформированного состояния предложено следующее выражение:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{2} (\varepsilon_z + \sqrt{2 \cdot \varepsilon_{xy}^2}), \quad (2)$$

где ε_e – эквивалентная деформация, ε_z – растягивающая деформация, ε_{xy} – сдвиговые деформации.

Таким образом, для прогнозирования долговечности следует использовать значения эквивалентных деформаций, что позволяет учитывать не только сдвиговые деформации из-за разного термического расширения платы и чипа, но и нормальные, вызванные искривлением платы.

Деформации припоя состоят из двух компонент: мгновенной линейной и деформации ползучести. При определении деформаций ползучести использовались неявный метод описания ползучести в зависимости от температуры и уравнение Аррениуса. Стационарная ползучесть припоя может быть описана уравнением Гарофало–Аррениуса из [12]:

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{dt} = C_1 [\sinh(C_2 \sigma)]^{C_3} \exp(-C_4 / T). \quad (3)$$

Параметры материала C_1, C_2, C_3 и C_4 , необходимые для использования этой модели, были получены путем аппроксимации кривой экспериментальных данных в соответствующих уравнениях ползучести.

Итоговый вид соотношения деформации (4) был определен по данным экспериментальных исследований образцов из материала припоя:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \left(\frac{\sigma}{E(T)} \right) + t^{C_5 - C_6 \cdot \sigma} \cdot C_1 [\sinh(C_2 \sigma)]^{C_3} \exp(-C_4 / T), \quad (4)$$

где $E = 16.082 \cdot 10^9$ Па при 25°C , $C_1 = 2\,317$, $C_2 = 0.051 \cdot 10^{-6}$, $C_3 = 5.04$, $C_4 = 5\,003.6$, $C_5 = 1.498$, $C_6 = 0.0282 \cdot 10^{-6}$. Все параметры можно определить из трех независимых простых экспериментов. В случае термдеформации паяного соединения величина эквивалентного напряжения может быть определена из разности коэффициентов линейного температурного расширения спаянных элементов. $E(T)$ в ГПа в общем случае зависит от температуры и имеет вид, который определяется из экспериментальных данных:

$$E(T) = a - bT, \quad (5)$$

где a и b – параметры модели, отображающие зависимость модуля упругости материала от температуры ($a = 6.4411$, $b = 0.0284$).

Согласование с экспериментальными данными представлено на рис. 3.

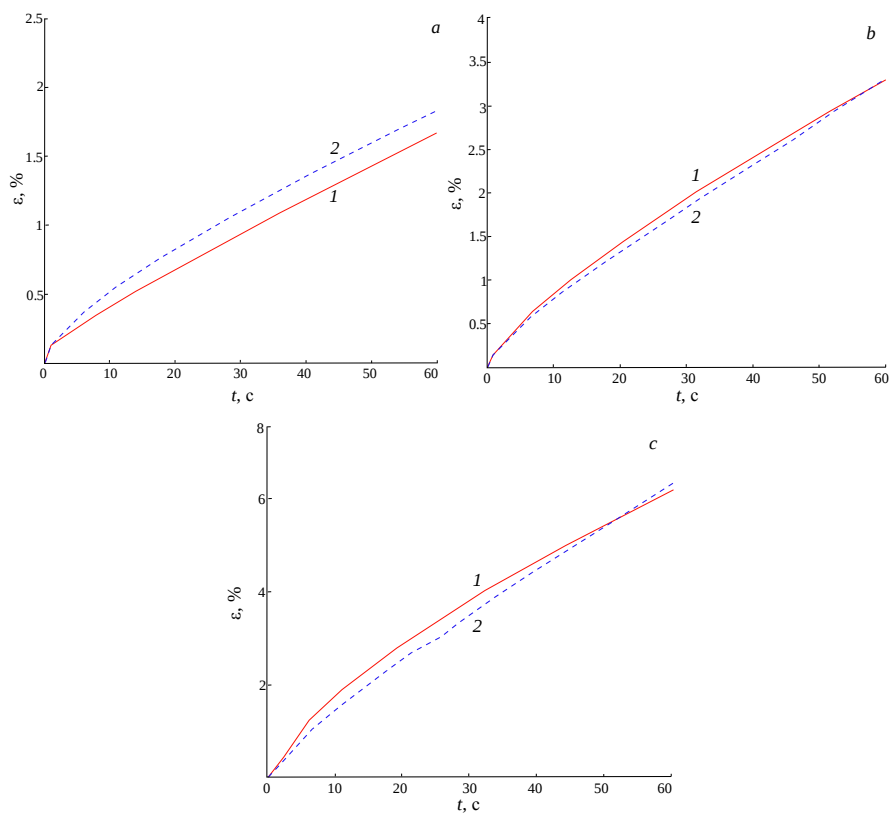


Рис. 3. Результаты испытаний: a , b , c – деформация ползучести при разных уровнях нагружения – 150, 175 и 200 Н соответственно

Fig. 3. Test results: (a), (b), (c) are creep deformations at different loading levels of 150, 175, and 200 N, respectively

2.2. Функция поврежденности материала

Для определения состояния материала в текущий момент и прогнозирования оставшегося срока эксплуатации введем функцию поврежденности материала В.В. Москвитина [13], которая должна удовлетворять следующим условиям:

$$\omega(0) = 0, \quad \omega(t^*) = 1, \quad (6)$$

где t^* – время до наступления предельного состояния (разрушения).

Для оценки поврежденности материала вводится выражение следующего вида, удовлетворяющее условиям (6):

$$\omega(t, T) = \int_0^t \frac{(1 + m_1)(t - \tau)^{m_1}}{t_0(\varepsilon, T)^{1+m_1}} d\tau, \quad (7)$$

где параметр $m_1 = -1 + 1/m$ (для материала припоя $m = 0.53$ при температуре 25°C); ε – эквивалентные деформации; t_0 – долговечность для данного материала, определяемая из экспериментов при температуре T .

При термической циклической нагрузке образцы паяных соединений практически подвергаются малоцикловой усталости, поэтому время до разрушения можно связать с количеством циклов соотношением: $t = N/v$, где t – время до разрушения; N – количество циклов до разрушения, определенное из усталостной прочности Коффина–Менсона (1); v – частота нагружения.

В результате функция поврежденности (7) примет вид:

$$\omega(t, T) = v \int_0^t \frac{(1 + m_1)(t - \tau)^{m_1}}{[C_1(a - bT)\Delta\varepsilon(\tau)^{-1}]^{1+m_1}} d\tau, \quad (8)$$

где $\Delta\varepsilon$ – размах эквивалентных деформаций, величина которых определяется из соотношений (2)–(5); C_1 и m – параметры модели, определенные для данного материала, $C_N(T) = C_1 \cdot E(T)$.

После интегрирования соотношения (8) получим аналитическую зависимость поврежденности материала от времени при заданном уровне деформаций и температуре T , отличной от начальной:

$$\omega(t, T) = \left[\frac{v}{C_1(a - bT)} \right]^{\frac{1}{m}} \Delta\varepsilon t^{\frac{1}{m}}. \quad (9)$$

2.3. Оценка несущей способности паяных соединений

Для прогнозирования ресурса работы электронной платы с обнаруженными дефектами необходимо провести оценку НДС дефектных паяных соединений посредством численного анализа. В задаче НДС электронной платы определялось при температурном цикле от -55 до $+125^\circ\text{C}$ с 15-минутной выдержкой при максимальной и минимальной температурах, скорость охлаждения и нагрева составляла $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ [14].

Для того чтобы учесть все граничные условия и нагрузки, которые испытывает паяное соединение при термоциклировании, необходимо рассмотреть два типа численных моделей: общую и локальную [15].

Образец в экспериментальных исследованиях из [3] – это плата с набором микросхем, которая механически разделена на сегменты для исключения влияния одного компонента на другой. Сегменты имеют равные габариты, и по центру сегмента располагается микросхема. Общая модель отображает сегмент электронной платы с микросхемой (рис. 4). Модель содержит печатную плату, контактные площадки на печатной плате и на подложке микросхемы, подложку,

микросхему, массив паяных соединений. Так как задача осесимметричная, рассматривается 1/4 часть конструкции электронной платы. Результатом решения является поле перемещений для всех узлов модели. Далее это поле перемещений прикладывается к паяным соединениям с дефектами в локальной модели для определения максимума интенсивности напряжений.

Локальная модель отображает паяное соединение, содержащее дефект. Рассмотрен случай углового паяного соединения с дефектом в виде пустоты, занимающей 18% от общего объема паяного соединения (рис. 3, б, 5). Модель содержит: печатную плату, контактные площадки на печатной плате и на подложке микросхемы, подложку, паяное соединение. В качестве нагрузки в локальной модели используются данные, полученные в общей модели: перемещение верхней контактной площадки относительно нижней контактной площадки по всем осям.

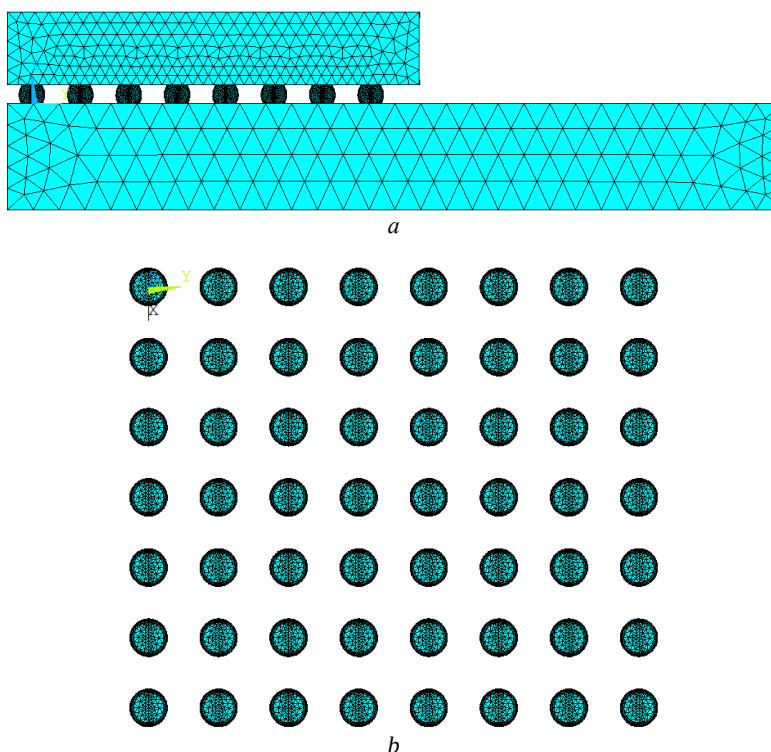


Рис. 4. Глобальная модель: *a* – общий вид; *b* – массив паяных соединений
Fig. 4. Global model: (a) the general view and (b) BGA

В результате численного моделирования определен размах по эквивалентным деформациям при изменении температур от -55 до 125°C : по оси Z – $\Delta\varepsilon_z = 0.0053$, в плоскости XY – $\Delta\varepsilon_{xy} = 0.00377$. Интенсивность напряжений в паяном соединении не превышает предел пропорциональности.

На рис. 6 приведены графики функции поврежденности дефектного паяного соединения для двух случаев: 1 – учет эквивалентной деформации (сплошная линия), 2 – учет только сдвиговой деформации (пунктирная линия). В случае

учета только сдвиговой деформации получаем завышенный срок эксплуатации более чем на 20%.

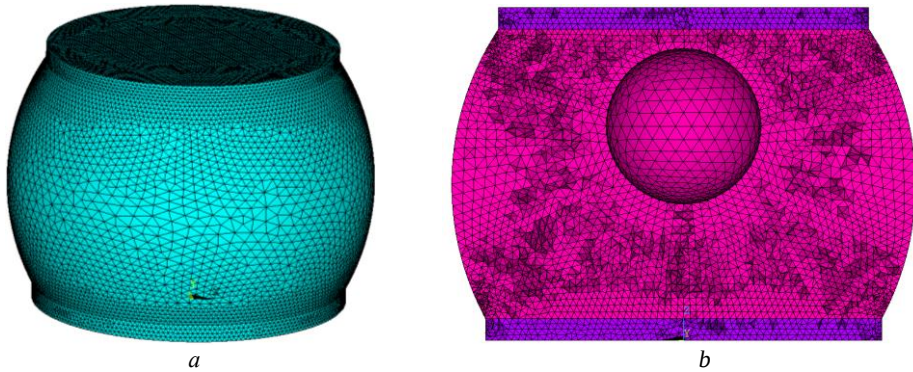


Рис. 5. Локальная модель паяного соединения с дефектом: *a* – конечно-элементная модель паяного соединения; *b* – сечение паяного соединения

Fig. 5. Local model of a soldered joint with a defect: (*a*) general view and (*b*) sub model containing a void

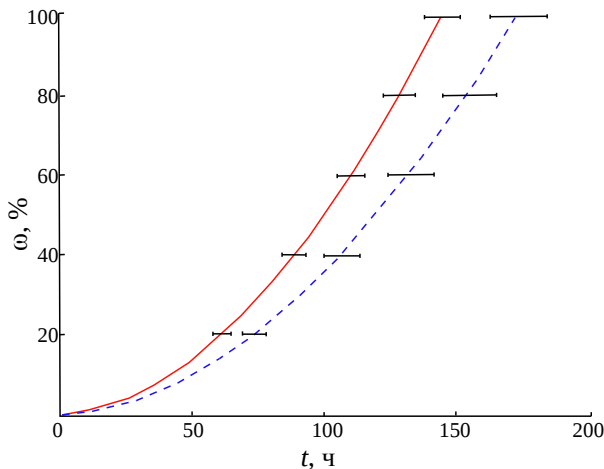


Рис. 6. Функция накопления повреждений дефектного паяного соединения

Fig. 6. Damage accumulation function of a damaged soldered joint

Как видно из рис. 6, при частоте теплового цикла, равной 1 цикл за 30 минут, время работы составляет 144 часа, или 288 циклов, что на 4.3% расходится с экспериментальными результатами из [3]. Погрешность определения параметров функции поврежденности не превышает 7%.

Закключение

По результатам проведенных исследований разработан метод неразрушающего контроля электронной аппаратуры. Метод позволяет выявить скрытые дефек-

ты в конструкции ЭП, проанализировать их опасность и определить остаточный ресурс работы ЭП. Данные численного анализа верифицированы на основе результатов экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с IPC-9701. Погрешность разработанного метода не превышает 5%.

Учет эквивалентного деформированного состояния позволяет точнее оценивать срок жизни и прогнозировать запас прочности ЭП.

Данный метод может применяться на производстве при изготовлении ЭП, отработке новых решений перед серийным производством. Также метод применим для оценки ресурса оборудования в процессе эксплуатации.

Список источников

1. 5 главных причин отказа паяных соединений // Soft engineering group. 2020. URL: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/544-top-5-reasons-solder-joint-failure.html>
2. What is a Solder Void? // PCB Directory. 2020. URL: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-solder-voiding>
3. Hillman D., Adams D., Pearson T., Williams B., Petrick B., Wilcoxon R. The last will and testament of the BGA void. 2011. 15 p. URL: https://www.circuitinsight.com/pdf/last_testament_bga_void_smta.pdf
4. Azin A., Zhukov A., Narikovich A., Ponomarev S., Rikkonen S., Leitsin V. Nondestructive testing method for a new generation of electronics // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 143. Art. 04007. doi: 10.1051/mateconf/201814304007
5. Ponomarev S.V., Rikkonen S., Azin A., Karavatskiy A., Maritskiy N., Ponomarev S.A. The applicability of acoustic emission method to modeling the endurance of metallic construction elements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. V. 71, No. 1. Art. 012056. doi: 10.1088/1757-899X/71/1/012056
6. Симонов Ю.Н., Симонов М.Ю. Физика прочности и механические испытания металлов : курс лекций. Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020.
7. Музыка Н.Р., Щвец В.П. Влияние вида нагружения на процесс накопления повреждений в материале // Проблемы прочности. 2014. № 1. С. 130–136.
8. Лучкин Р.С. Прочность и надежность паяных конструкций. Тольятти : Изд-во Тольяттинского гос. ун-та, 2014.
9. Иванов А.В., Пизанов М.Н. Оценка качества паяных соединений электронных узлов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4-7. С. 1381–1386.
10. Парфенов А.Н. Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 2. С. 46–52.
11. Локощенко А.М. Эквивалентные напряжения в расчетах длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии (обзор) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9, № 4. С. 128–135. doi: 10.18500/1816-9791-2009-9-4-2-128-135
12. Bansal A., Ramakrishna G., Liu K. Investigation of Pad Cratering in Large Flip-Chip BGA using Acoustic Emission // IPC APEX EXPO Proceedings. 2011. 12 p.
13. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов. М. : Наука, 1972.
14. Otiaba K.C., Bhatti R.S., Ekere N.N., Mallik S., Ekpu M. Finite element analysis of the effect of silver content for Sn–Ag–Cu alloy compositions on thermal cycling reliability of solder die attach // Engineering Failure Analysis. 2013. V. 28. P. 192–207. doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.10.008
15. Ladani L.J., Dasgupta A. A meso-scale damage evolution model for cyclic fatigue of viscoplastic materials // International J. of Fatigue. 2009. V. 31. P. 703–711. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2008.03.013

References

1. (2020) 5 *glavnykh prichin otkaza payanykh soedineniy* [Top 5 reasons for solder joint failure]. *Soft engineering group*. Access mode: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/544-top-5-reasons-solder-joint-failure.html>
2. (2020) What is a Solder Void? *PCB Directory*. Access mode: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-solder-voiding>.
3. Hillman D., Adams D., Pearson T., Williams B., Petrick B., Wilcoxon R. (2011) *The last will and testament of the BGA void*. Access mode: https://www.circuitinsight.com/pdf/last_testament_bga_void_smta.pdf
4. Azin A., Zhukov A., Narikovich A., Ponomarev S., Rikkonen S., Leitsin V. (2018) Nondestructive testing method for a new generation of electronics. *MATEC Web of Conferences*. 143. 04007. doi: 10.1051/mateconf/201814304007
5. Ponomarev S.V., Rikkonen S., Azin A., Karavatskiy A., Maritskiy N., Ponomarev S.A. (2015) The applicability of acoustic emission method to modeling the endurance of metallic construction elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 71(1). p. 012056. doi: 10.1088/1757-899X/71/1/012056
6. Simonov Yu.N., Simonov M.Yu. (2020) *Fizika prochnosti i mekhanicheskiye ispytaniya metallov: kurs lektsiy* [Strength physics and mechanical testing of metals: a course of lectures]. Perm: Perm Polytech University.
7. Muzyka N.R., Shvets V.P. (2014) Effect of a loading mode on damage accumulation in the material *Strength of Materials*. 46(1). pp. 105–109.
8. Luchkin R.S. (2014) *Prochnost' i nadezhnost' payanykh konstruksiy* [Strength and reliability of brazed structures]. Togliatti: TSU Publishing House.
9. Ivanov A.V., Piganov M.N. (2016) Otsenka kachestva payanykh soyedineniy elektronnykh uzlov [Assessment of the quality of soldered joints of electronic components]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk – Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 18(4-7). pp. 1381–1386.
10. Parfenov A.N. (2008) Vvedeniye v teoriyu prochnosti payanykh soyedineniy [Introduction to the theory of strength of brazed joints]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*. 2. pp. 46–52.
11. Lokoshchenko A.M. (2009) Ekvivalentnyye napryazheniya v raschetakh dlitel'noy prochnosti metallov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii (obzor) [Equivalent stresses in calculations of long-term strength of metals under complex stress state (review)]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika*. 9(4). pp. 128–135. doi: 10.18500/1816-9791-2009-9-4-2-128-135.
12. Bansal A., Ramakrishna G., Liu K. (2011) Investigation of pad cratering in large flip-chip BGA using acoustic emission. *IPC APEX EXPO Proceedings*.
13. Moskvitin V.V. (1972) *Soprotivleniye vyazkouprugikh materialov* [Resistance of viscoelastic materials]. Moscow: Nauka.
14. Otiaba K.C., Bhatti R.S., Ekere N.N., Mallik S., Ekpu M. (2013) Finite element analysis of the effect of silver content for Sn–Ag–Cu alloy compositions on thermal cycling reliability of solder die attach. *Engineering Failure Analysis*. 28. pp. 192–207. doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.10.008.
15. Ladani L.J., Dasgupta A. (2009) A meso-scale damage evolution model for cyclic fatigue of viscoplastic materials. *International Journal of Fatigue*. 31. pp. 703–711. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2008.03.013.

Сведения об авторах:

Азин Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: antonazin@mail.ru

Марицкий Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nnmar.niipmm@mail.ru

Пonomarev Сергей Васильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: psv@niipmm.tsu.ru

Рикконен Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: rikk2@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Azin Anton V. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: antonazin@mail.ru

Maritsky Nikolay N. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nnmar.niipmm@mail.ru

Ponomarev Sergey V. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: psv@niipmm.tsu.ru

Rikkonen Sergey V. (Candidate of Engineering Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rikk2@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.12.2021; принята к публикации 22.03.2022

The article was submitted 09.12.2021; accepted for publication 22.03.2022