

На правах рукописи



Азин Антон Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре прочности и проектирования физико-технического факультета и в лаборатории 23 отдела 20 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Пономарев Сергей Васильевич

Официальные оппоненты:

Барашков Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра строительной механики, профессор

Добрица Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», отдел 10234, начальник отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Защита состоится 29 ноября 2013 г. в 10 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Христенко Юрий Федорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность – одна из основных целей, стоящих перед космической промышленностью на сегодняшний момент это создание искусственного спутника Земли с длительным сроком активного существования. Для этого необходимо, чтобы все конструкционные узлы космического аппарата (КА) имели запас прочности на длительный промежуток времени при экстремальных нагрузках.

Всеобщая миниатюризация электронных компонентов и переход на современную компоновку микросхем электронных модулей (ЭМ), вызванные естественно-техническим развитием и необходимыми целями, требует особого отношения к прочностным характеристикам материалов и типов механических контактов для обеспечения работоспособности модуля на протяжении всего срока технологического ресурса.

В современной науке подобные решения проводятся в основном экспериментальными методами. Поэтому разработка теоретических методов для оценки прочности и долговечности элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является актуальной как в научном, так и в практическом отношении. В инженерной практике расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в материале элементов конструкций проводится с использованием аппарата сопротивления материалов, строительной механики, с помощью упрощенных схем, основанных на постулатах теорий упругости и пластичности. Результаты исследований последних десятилетий указывают на необходимость разработки метода испытания ЭМ, позволяющего выявлять, локализовывать и определять степень опасности зарождающихся дефектов в конструкции ЭМ на основе расчетов НДС их элементов с учетом сложных реологических свойств материалов и характера вероятных нагрузок. Актуальность диссертационной работы определяется потребностью в теоретически обоснованных проектных решениях для повышения надежности ряда ЭМ на основе технологии «система-на-кристалле». Разработанные методы применяются для проверки работоспособности электронных плат (ЭП), в составе ЭМ, при рабочих нагрузках, для выявления скрытых дефектов и оценки степени их опасности.

Объектом проведения научного исследования являются ЭП бортовой РЭА КА, которые представляют собой конструктивно-законченные радиоэлектронные узлы.

Решением задачи моделирования механических процессов в конструкциях приборов и систем занимались такие специалисты, как Маквецов Е. Н., Тартаковский А. М., Кофанов Ю. Н., Кожевников А. М., Кришук В. Н., Шалумов А. С., Фадеев О. А. и др. Исследование на прочность конструкций электромеханической направленности (ЭП), разработка и проектирование, компоновка без брака и с большим качественным и количественным запасом прочности является приоритетным направлением развития технической инфраструктуры. Наиболее интересным, в плане новых возможностей, является развитие технологической составляющей для более широкого применения

методов неразрушающего контроля (МНК) при производстве и тестировании РЭА. Учитывая потенциально широкую область применимости данных методов в развитии электронной промышленности, разработка универсального оборудования для тестирования ЭМ должна занимать одно из ключевых мест в техническом усовершенствовании способов контроля. При этом использование программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, дает возможность исследовать НДС конструкций любой геометрии на их конечно-элементных моделях.

Цель работы – разработка неразрушающего метода определения начала развития дефектов и мест локализации опасных дефектов при механических испытаниях электронных плат РЭА.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих взаимосвязанных **задач**:

- определение несущей способности контактных соединений современных корпусов микрочипов с ЭП при отрывных и сдвиговых нагрузках;
- разработка эффективного способа механических испытаний электронных плат РЭА, учитывающего условия эксплуатации и их реальное нагружение в составе прибора;
- разработка способа применения акустической эмиссии для определения начала развития дефектов в компонентах электронных плат при механическом нагружении;
- разработка устройства (испытательный стенд) для реализации метода механических испытаний.

Методика исследования – при выполнении диссертационной работы применялись методы механики деформируемого твердого тела и математического моделирования, численные методы, а также методы экспериментального исследования процессов деформирования твердых тел.

Использовались современные экспериментальные методы испытаний и установки для их реализации (механические испытания – универсальный испытательный стенд Microtester Instron, метод акустической эмиссии – система акустико-эмиссионного контроля AE System).

Научная новизна заключается в следующем:

1. На основе новых решений о деформации контактных соединений из припойного материала получен теоретический прогноз долговечности паяных соединений контактов BGA и PGA корпусов микрочипов с ЭП.
2. На основе проведенного исследования разработан новый метод определения остаточного ресурса и оценки долговечности по планируемой истории нагружения для материала припоя контактного соединения комплектующих ЭП.
3. На основе моделирования НДС ЭП при эксплуатационных нагрузках разработан новый метод испытания ЭП на механические воздействия, позволяющий учитывать реальные нагрузки ЭП в составе РЭА.
4. Обоснован способ количественной оценки на базе данных АЭ концентрации дефектов, возникающих при пластическом деформировании припойного материала.

5. В результате трехмерного моделирования деформации были получены оценки прочности конструкции испытательного стенда для механических испытаний ЭП.

Теоретическая ценность – на основе новых численных решений о деформации контактных соединений из припойного материала получен теоретический прогноз долговечности паяных соединений контактов многовыводных корпусов микрочипов, используемых в комплектации бортовой РЭА перспективных спутниковых платформ.

Практическая ценность – разработанный метод оценки долговечности контактных соединений позволяет более точно прогнозировать механическое поведение контактных паяных соединений компонентов ЭП бортовой РЭА, а значит повысить качество и оперативность проектных работ. Разработанные способ испытания ЭП на механические воздействия и устройство для его реализации позволяют проводить испытания создаваемых ЭП на всех этапах разработки на нагрузки, соответствующие реальному нагружению ЭП при работе в составе прибора, тем самым повысив качество выпускаемой продукции.

Внедрение результатов работы – результаты диссертационного исследования включены в научно-технические отчеты по опытно-конструкторской работе по теме «Разработка комплекса программных и технических средств проектирования, изготовления и испытаний унифицированного ряда электронных модулей на основе технологии «система-на-кристалле» для систем управления и электропитания космических аппаратов (КА) связи, навигации и дистанционного зондирования Земли с длительным сроком активного существования», выполненной по Постановлению Правительства Российской Федерации № 218 (ГК № 13.G25.31.0017 от 07.09.2010) и научно-исследовательской работе по теме «Разработка метода неразрушающего обнаружения потенциально опасных дефектов электронных модулей приборов космических аппаратов с использованием аппаратуры акустической эмиссии» выполненной в порядке реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (регистрационный номер № 01201359297, ГК № 14.514.11.4077 от 14.03.2013).

На защиту выносятся:

1. Результаты численного моделирования НДС в паяных соединениях контактов BGA и PGA корпусов микрочипов с ЭП под воздействием механических нагрузок.

2. Метод оценки долговечности контактных паяных соединений компонентов ЭП.

3. Способ испытания ЭП на механические воздействия, использующий численное моделирование ЭП.

4. Способ использования метода акустической эмиссии для локализации дефекта на ЭП и оценка степени его поврежденности при механических испытаниях.

5. Устройство, позволяющее использовать разработанный метод для испытания ЭП.

Достоверность полученных результатов обеспечивается математической корректностью постановок задач, применением апробированных методов решения, решением тестовых и модельных задач, подтверждается хорошим совпадением полученных численных результатов, в частных случаях, с численными решениями и экспериментальными данными других исследователей.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, заключается в непосредственном его участии на всех этапах исследований: обсуждение физики процессов, математическая постановка задачи, разработка алгоритмов и программ, проведение параметрических расчетов, анализ и интерпретация результатов, написание статей. Основные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены А.В. Азиным самостоятельно. Постановка задач исследований осуществлена аспирантом как единолично, так и в соавторстве с научным руководителем.

Апробация – основные результаты и положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 5 Международных и Всероссийских конференциях: 1) II Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», 11 апреля 2012 г., г. Томск; 2) XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Механики XXI века», 15 мая 2012 г., г. Братск; 3) XIX Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 15 апреля 2013 г., г. Томск; 4) X международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук – 2013», 23 апреля 2013 г., г. Томск; 5) 8 всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 22 апреля 2013 г., г. Томск.

Публикации – результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в т.ч. 5 из них в изданиях, входящих в перечень ВАК. Публикации, отражающие основное содержание работы, приведены в конце данного автореферата.

Структура и объем работы. Настоящая диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы; содержит 110 рисунков, 10 таблиц, библиографический список литературы из 85 наименований – всего 152 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются существующие вариации контактных соединений для поверхностного монтажа современных корпусов микрочипов. К ним относятся BGA (контакты в виде шариков), PGA (контакты в виде медных столбиков), CGA (контакты в виде столбиков из тугоплавкого припоя) и MCS (контакты в виде пружинки) (рисунок 1.1).



а) BGA; б) PGA; в) CGA; г) MCS

Рисунок 1.1 – Общий вид микросхем

Описаны дефекты паяных соединений, характерных для этих типов контактов, и используемые стандарты и методы контроля для выявления данных дефектов. По проведенному анализу существующих методов и их комбинаций, применяемых для дефектоскопии ЭП, выявлено и определено наиболее перспективное сочетание метода акустической эмиссии и рентгеновского метода.

Также рассмотрены существующие научные школы механики деформированного твердого тела в вопросе математического моделирования повреждаемости материала и их достижения в этой области.

Во второй главе описывается разработанный метод оценки долговечности контактных соединений при произвольной нагрузке, включающий в себя:

1. Определение механических характеристик материала припоя, используемого для присоединения корпуса микрочипа к ЭП.
2. Проведение циклических испытаний материала припоя.
3. Проведение численного моделирования контактных соединений исследуемого корпуса микрочипа для определения максимума интенсивности напряжений в материале припоя при заданных нагрузках (моделям задаются характеристики материалов полученные в п.1).
4. Определение сдвиговых деформаций при заданном диапазоне рабочих температур.
5. Расчет по результатам п.2 максимального количества циклов до разрушения контактного соединения.

Приводится алгоритм реализации разработанного метода.

Для определения механических характеристик припоя проведены испытания на одноосное растяжение и циклические испытания образцов из припоя ПОС-61 следующего вида: лопатки с рабочей частью длиной 35 мм и сечением 8х8,5 мм.

По результатам испытаний на одноосное растяжение определена билинейная зависимость напряжений от деформации для материала припоя, сплошная линия – экспериментальные данные, пунктир – билинейная аппроксимация (рисунок 2.1а).

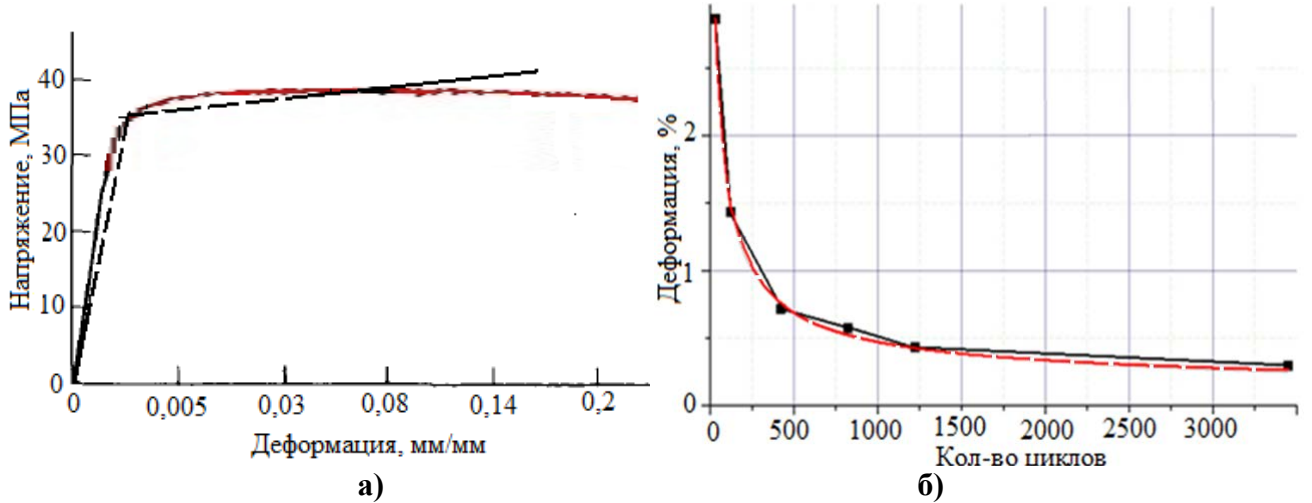
Для определения параметров модели длительной прочности использовались соотношение Коффина-Менсона

$$N^m \Delta \epsilon = C_N, \quad (2.1)$$

где N – количество циклов при данной деформации; $\Delta \epsilon$ – размах деформации; C_N , m – параметры модели. Для данного материала $C_N = 0,1892$, $m = 0,53$. Согласование результатов теоретических расчетов (пунктир) и экспериментальных данных (сплошная линия) представлено на рисунке 2.1б.

Даная зависимость позволяет спрогнозировать долговечность исследуемого материала при малоцикловой усталости без учета скорости нагружения и при

постоянной температуре.



а) зависимость напряжений возникающих в образце при соответствующем уровне деформаций, б) зависимость уровня деформаций от количества циклов до разрушения

Рисунок 2.1 – Результаты испытаний

Далее формулируется задача определения напряженно-деформированного состояния контактных паяных соединений корпуса микрочипа с ЭП.

Расчетная модель соединения включает часть микросхемы, контактные площадки печатной платы, саму плату и элемент BGA или PGA.

В общем случае состояние этой механической системы описывается нелинейной системой уравнений механики сплошных сред. Область пространства Ω , которую занимает данная механическая система, имеет сложную топологию и разделена на конечное число подобластей ω_m , $\Omega = \sum_m \omega_m$. В каждой подобласти ω_m определены физико-механические свойства материала. Тогда для точки $x \in \Omega$, $x = (x_1, x_2, x_3)$ записывается система уравнений

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\sigma_{kj} \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right) = 0, \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right), \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}) \quad (2.4)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера; u_i , σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты вектора перемещения, второго тензора напряжений Пиолы-Кирхгофа, тензора деформаций.

Материалы всех элементов конструкции за исключением материала припоя предполагаются изотропными и линейными. Тогда закон Гука (2.4) для этих подобластей ω_m имеет вид

$$\sigma_{ij} = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu_m}{1-2\nu_m} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \right), \quad (2.5)$$

где E_m , ν_m – модуль Юнга и коэффициент Пуассона m -го материала.

Для припоя закон Гука (2.4) аппроксимируется билинейной зависимостью, состоящей из упругого и пластичного участков.

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} k_1 \left(\frac{\nu_1 E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} \theta \delta_{ij} + \frac{E_1}{(1+\nu_1)} \varepsilon_{ij} \right), & 0 \leq \varepsilon_{ij} < \varepsilon_* \\ \sigma_0 + k_2 \left(\frac{\nu_2 E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)} \theta \delta_{ij} + \frac{E_2}{(1+\nu_2)} \varepsilon_{ij} \right), & \varepsilon_* \leq \varepsilon_{ij} < \varepsilon_{**} \end{cases} \quad (2.6)$$

где $k_1 = \operatorname{tg} \alpha$, $k_2 = \operatorname{tg} \beta$, α и β – углы наклона касательных к функциям на данном промежутке, E_1, ν_1, E_2, ν_2 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для материала припоя на данном промежутке; σ_0 – условный предел текучести; ε_* – уровень деформации при σ_0 ; ε_{**} – уровень деформации, при котором материал разрушается.

Паяное соединение может содержать дефекты, уменьшающие его прочностную способность. Рассматривать какие-то конкретные типы дефектов смысла не имеет, потому что потребуется вводить большое количество параметров с целью охвата всего "букета" разнообразия. Поэтому дефектность материала припоя рассматривается как распределенная характеристика по всему объему паяного соединения.

Для определения состояния материала в текущий момент и прогнозирования оставшегося срока эксплуатации введем функцию поврежденности материала (заимствована у Москвитина В.В.), которая должна удовлетворять следующим условиям:

$$\omega(0)=0, \quad \omega(t_*)=1, \quad (2.7a)$$

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

Для оценки поврежденности материала, вводится выражение следующего вида

$$\omega(t, T) = \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{t_0(\varepsilon, T)^{1+m_1}} d\tau, \quad (2.7b)$$

где параметр $m_1 = -1 + 1/m$ (для материала припоя $m = 0,53$); ε – интенсивность деформации; t_0 – долговечность для данного материала, определяемая из экспериментов при температуре T и не зависящая от времени деформации.

Для оценки повреждаемости паяных соединений при термоциклировании используем частный случай (2.7б)

$$\omega(t, T) = \nu \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{[C_1(a-bT)\Delta\varepsilon^{-m}]^{1+m_1}} d\tau, \quad (2.8a)$$

где $\Delta\varepsilon$ – размах деформаций, не зависящий от времени; ν – частота нагружения, C_1 и m – параметры модели, определенные для данного материала, где $C_N(T) = C_1 \cdot E(T)$ и $E(T) = a - bT$ ($C_N = 18,92$, $m = 0,53$ при температуре 25°C); a и b – параметры модели, отображающие зависимость модуля упругости материала от температуры ($a = 6,4411$, $b = 0,0284$).

После интегрирования соотношения (2.8a) получим аналитическую зависимость поврежденности материала от времени и при заданной температуре T , отличной от начальной:

$$\omega(t) = \left[\frac{\nu}{C_1(a-bT)} \right]^{\frac{1}{m}} \Delta\varepsilon t^{\frac{1}{m}} \quad (2.8b)$$

Система уравнений (2.2) – (2.4) дополняется граничными условиями. На закрепленных границах ставится условие

$$u_i(\bar{x}) = 0, \quad \bar{x} \in S_1, \quad (2.9)$$

а на остальных границах условие

$$n_k \sigma_{kj} \left(\delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = 0, \quad \bar{x} \in S_2 \quad (2.10)$$

где S_1, S_2 – границы области Ω .

Проводится численное моделирование контактных соединений исследуемого корпуса микрочипа для определения максимума интенсивности напряжений в материале припоя при заданных нагрузках. Для получения адекватных результатов расчета с помощью программного пакета ANSYS для задания свойств материала припоя используются полученные в испытаниях данные.

Несущие свойства паяных соединений BGA и PGA корпусов определялись для растягивающих и сдвиговых нагрузок. Приложение растягивающей нагрузки на элемент корпуса имитировало ситуацию прогиба платы в составе прибора при эксплуатационных нагрузках (ударных, вибрационных и др.). Испытание на сдвиговые нагрузки моделирует термомеханическое разрушение вызванное напряжениями и деформациями, возникающими в электронном пакете из-за тепловой нагрузки от окружающей среды или внутреннего тепла при работе в составе аппаратуры (несоответствие в коэффициенте теплового расширения, среди различных материалов; температурные градиенты в системе и др.).

Несущие свойства элемента BGA определялись для растягивающих и сдвиговых нагрузок. Для элемента BGA рассматривались два случая: с обтеканием шарика контактной площадки и без обтекания (рисунок 2.2а и б).

Рассмотрим случай без обтекания шарика контактной площадки. При осевых нагрузках задача может рассматриваться как осесимметричная (рисунок 2.2в). Нижняя сторона платы закреплена. Верхняя сторона микросхемы перемещается вертикально на заданную величину. На левой границе ставится условие симметрии.

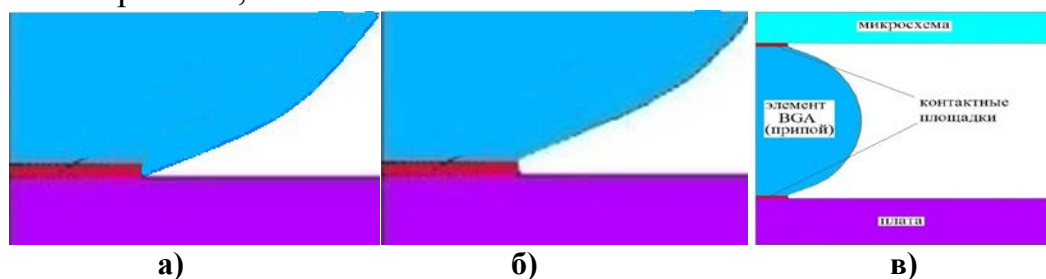
Величина растягивающей силы определяется по формуле

$$F = \int_S \sigma_{nn} dS \quad (2.11)$$

где S – площадь максимального сечения элемента BGA; σ_{nn} – напряжения, нормальные к поверхности сечения.

Материал припоя упругопластичен.

В расчетах элемент BGA имел диаметр 0,5 мм, 0,6 мм, 0,7 мм, а диаметр контактных площадок соответственно равнялся 0,16 мм, 0,19 мм, 0,23 мм. Отношение размера контактных площадок к размеру элемента BGA приблизительно равно 0,32.



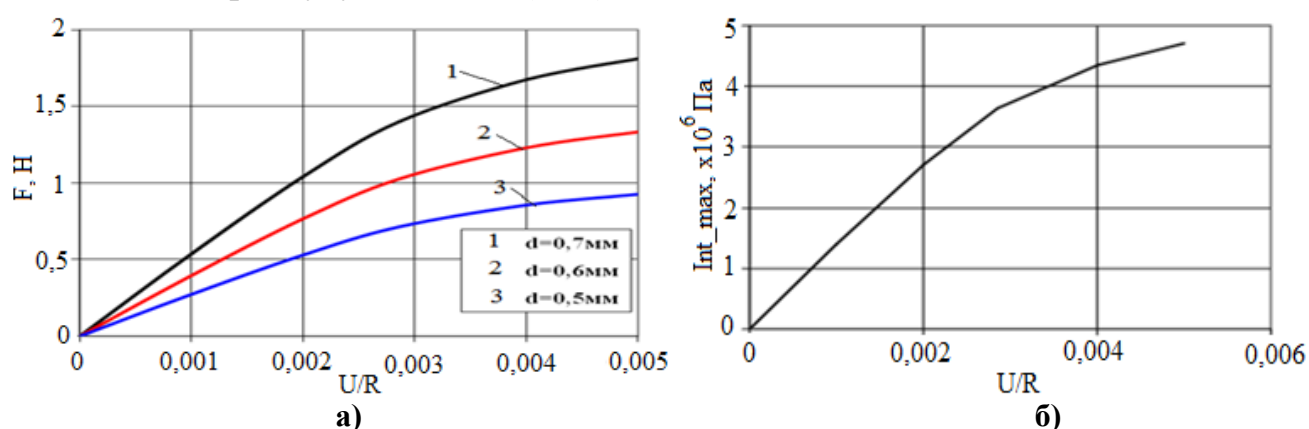
а) случай с обтеканием, б) случай без обтекания, в) расчетная модель

Рисунок 2.2 – Исследования НДС BGA соединения при растягивающих нагрузках

Несущая способность элемента BGA определялась по уровню интенсивности напряжений в материале элемента. Момент, когда интенсивность напряжений локально достигала величины предела прочности материала, считался началом разрушения элемента. Возможность отрыва припоя от контактных площадок не рассматривалась.

На рисунке 2.3а приведены графики изменения растягивающей силы, действующей на элемент BGA, в зависимости от величины вертикального перемещения микросхемы и от диаметра элемента BGA. Величина U/R ограничена значением $\approx 0,005$, так как при этом интенсивность напряжений в материале элемента BGA достигает предела прочности. Пока в материале преобладают упругие деформации, графики на рисунке 2.3а показывают прямую пропорциональность в зависимости $F(U/R)$. Развитие пластических деформаций приводит к нарушению этой зависимости. Из рисунка 2.3а следует, что несущая способность элемента BGA при растягивающей нагрузке равна: 1,8 Н ($d = 0,7$ мм); 1,33 Н ($d = 0,6$ мм); 0,93 Н ($d = 0,5$ мм).

На рисунок 2.3б показана зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины вертикального перемещения корпуса микросхемы, отнесенного к радиусу элемента (U/R).



а) зависимость величины растягивающей силы от вертикального перемещения корпуса микросхемы; б) обобщенная зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от вертикального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 2.3 – Результаты решения

На рисунке 2.4 показано распределение интенсивности напряжений в элементе BGA перед началом его разрушения, когда достигается предел прочности материала. Видно, что пластические деформации охватывают нижнюю и верхнюю части объема элемента BGA. Центральная и периферийная части остаются в области упругих деформаций.

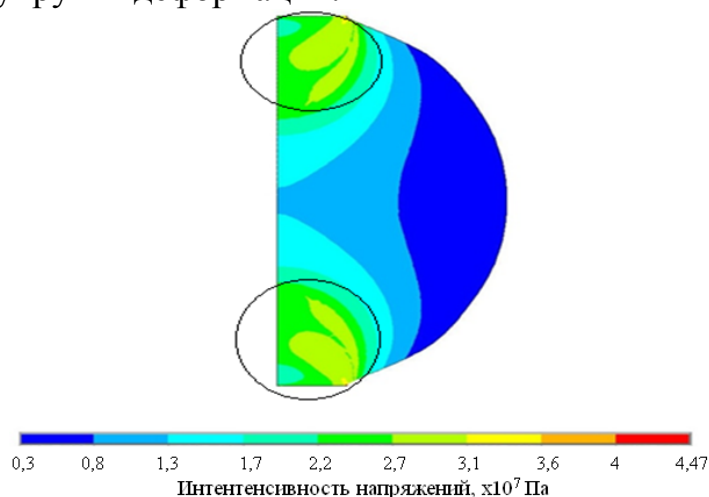


Рисунок 2.4 – Распределение интенсивности напряжений в элементе BGA перед началом его разрушения (растягивающие нагрузки)

Несущие свойства элемента BGA при сдвиговых перемещениях корпуса микросхемы определяются из решения трехмерной задачи. Однако это решение обладает симметрией относительно плоскости проходящей через ось симметрии элемента BGA. Поэтому следует рассматривать только половину конструкции, которая лежит по одну из сторон плоскости симметрии (рисунок 2.5).

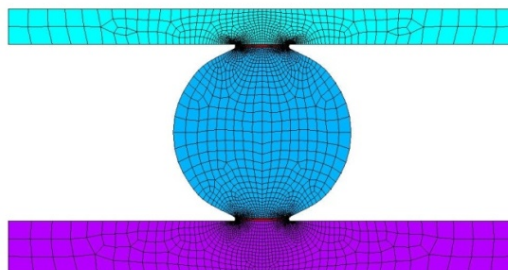
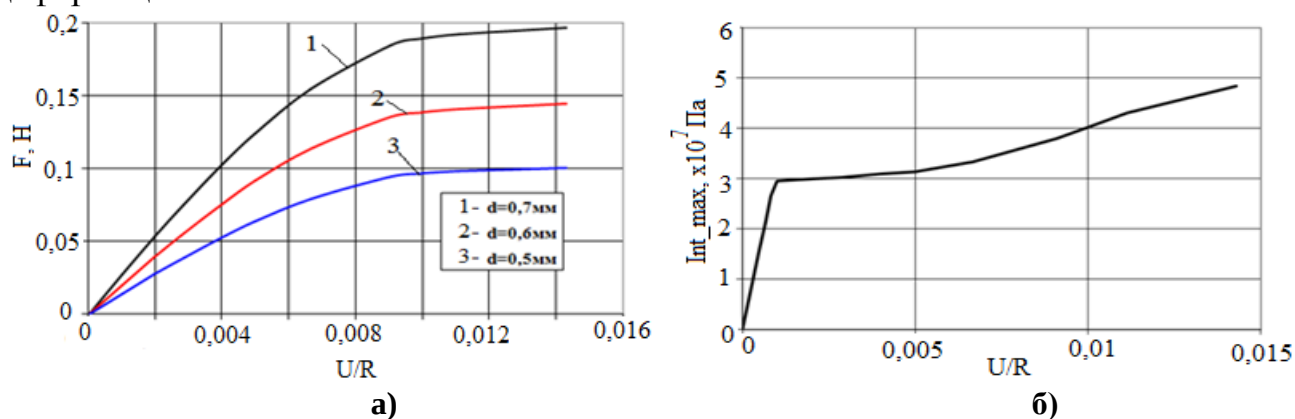


Рисунок 2.5 – Конечно-элементная модель элемента BGA

С использованием трехмерной модели были проведены расчеты, результаты которых представлены на рисунке 2.6. Построена зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, при горизонтальном перемещении корпуса микросхемы (рисунок 2.6а). Расчеты показывают, что несущая способность элемента BGA при сдвиговой нагрузке равна: 0,2 Н ($d = 0,7$ мм); 0,15 Н ($d = 0,6$ мм); 0,1 Н ($d = 0,5$ мм).

На рисунке 2.6б показана зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы. Видно, что при $U/R < 0,001$ график является прямым. Это говорит о том, что элемент BGA работает в области упругих деформаций. При $U/R > 0,001$ быстро растет влияние эффектов пластичности, что приводит к излому графика. Последующее увеличение величины максимальной интенсивности напряжений обусловлено постепенным упрочнением материала при росте пластических деформаций.

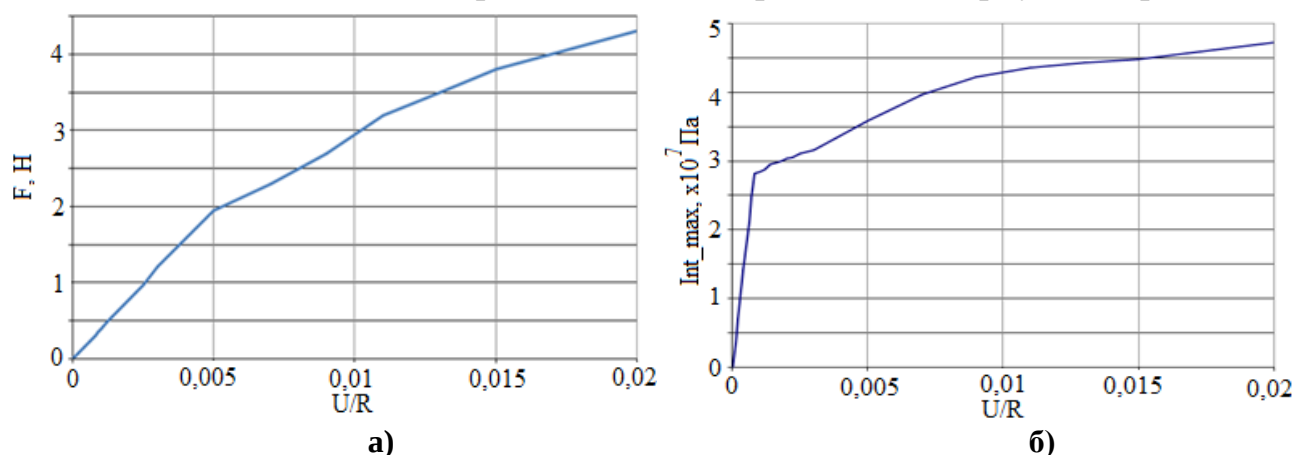


а) зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, от горизонтального перемещения корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 2.6 – Результаты решения

Рассмотрим случай натекания припоя на контактную площадку. Из проведенного выше анализа определено, что прочностные свойства контактного соединения типа BGA линейно зависят от увеличения диаметра шарика, поэтому решено, для данного случая рассмотреть контактное соединение диаметром

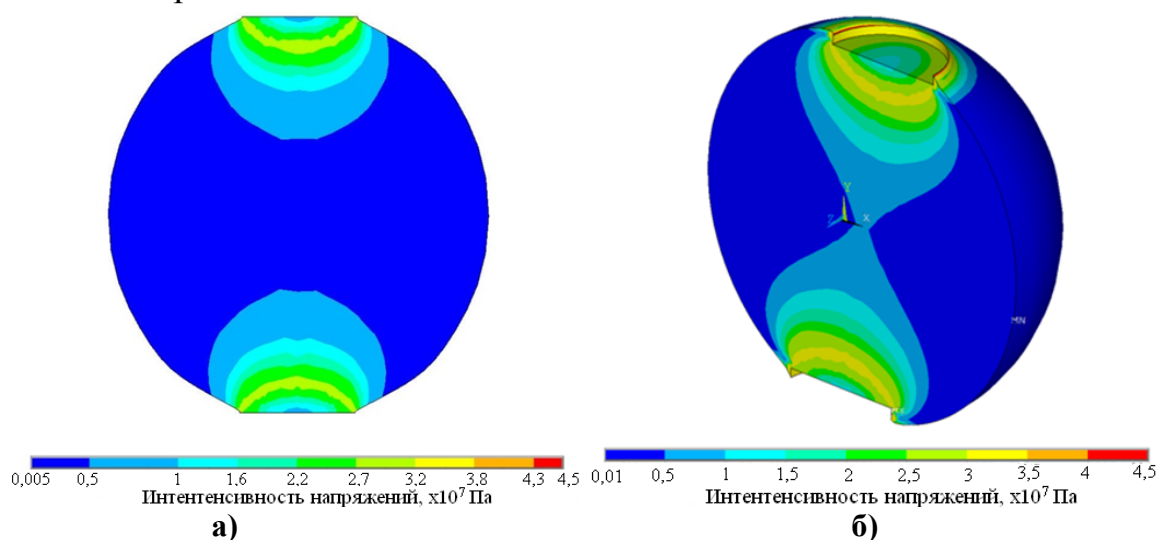
0,7 мм, как наиболее прочное. С использованием трехмерной модели были проведены расчеты, результаты которых представлены на рисунке 2.7. Построена зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, при горизонтальном перемещении корпуса микросхемы (рисунок 2.7а). Расчеты показывают, что несущая способность элемента BGA при сдвиговой нагрузке равна 4,3 Н. На рисунке 2.7б показана зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы.



а) зависимость величины силы, действующей в элементе BGA, от горизонтального перемещения корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в элементе BGA от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 2.7 – Результаты решения

На рисунке 2.8 показано распределение интенсивности напряжений в элементе BGA в обоих случаях перед началом его разрушения, когда достигается предел прочности материала. Область пластических деформаций расположена вблизи контактных поверхностей.



а) случай без обтекания припоем контактной площадки, б) случай с обтеканием

Рисунок 2.8 – Распределение интенсивности напряжений в элементе BGA перед началом его разрушения (сдвиговые нагрузки)

Несущие свойства элемента PGA определялись для растягивающих нагрузок. В общей постановке эта задача не отличается от аналогичной задачи для элемента BGA и рассматривается как осесимметричная. Существенное различие состоит в

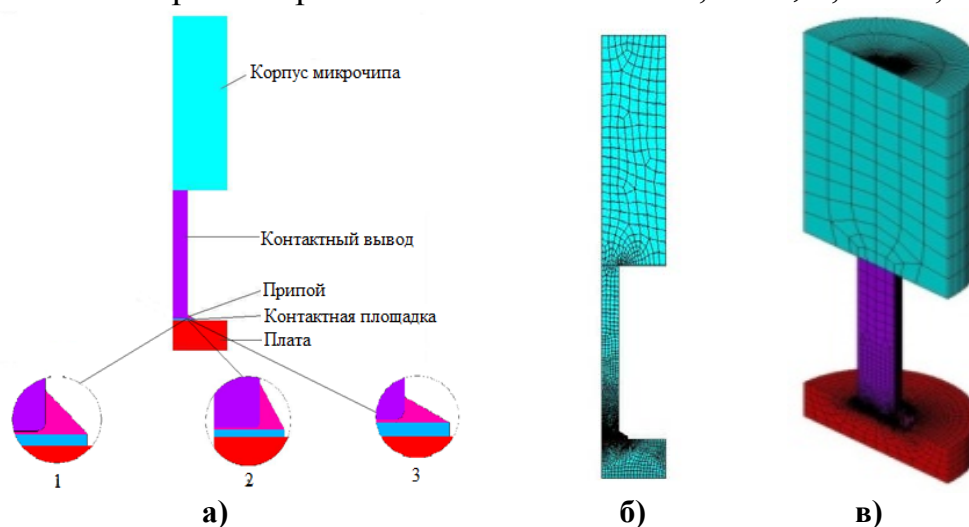
том, что элемент BGA, связывающий микросхему и плату, является геометрически большим объектом в рамках рассматриваемой задачи. В случае с PGA припой является тонкой прослойкой между торцом стержневого контакта и контактной площадкой на плате. В тоже время напряженно-деформированное состояние этой прослойки представляет наибольший интерес, так как именно она отвечает за прочность рассматриваемого соединения.

Общий вид соединения показан на рисунке 2.9а. В представленной расчетной модели толщина припоя между стержневым контактом и контактной площадкой была постоянной. В задаче рассматривалось влияние объема припоя, нанесенного на контактную площадку, на прочность последующего соединения. Это влияние моделировалось путем высоты, на которую затекал припой при взаимодействии со стержневым контактом, как это показано на выносах рисунка 2.9а.

На рисунке 2.9б показана конечно-элементная модель соединения. Ставились следующие граничные условия: нижняя сторона платы закреплена; верхняя сторона микросхемы перемещается вертикально на заданную величину; на левой границе ставится условие симметрии.

Толщина слоя припоя под торцом стержневого контакта $h = 0,01$ мм.

Высота натекания припоя принимала значения $H = 0,07$ мм; $0,14$ мм; $0,21$ мм.



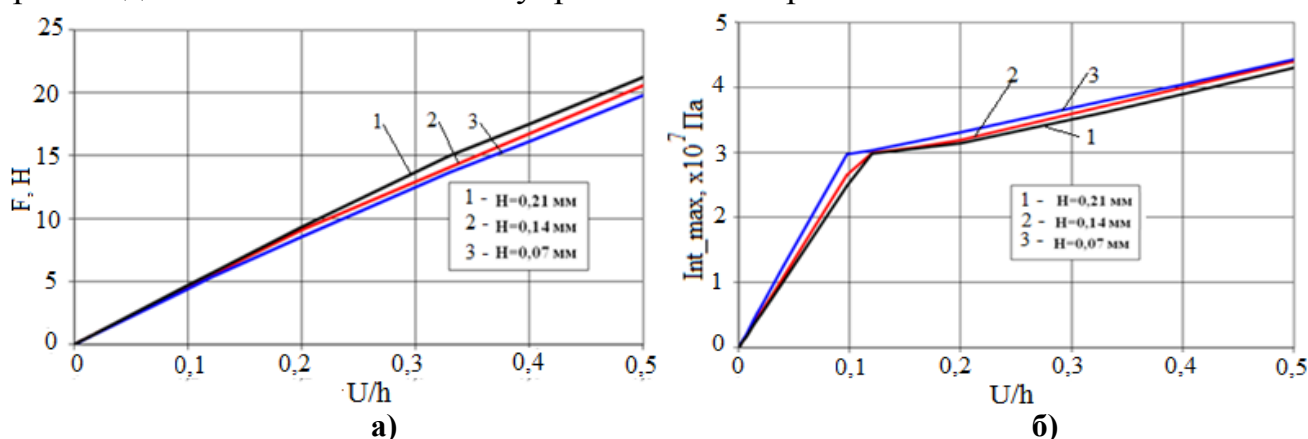
а) расчетная модель; конечно-элементные модели для б) плоского и в) объемного случая

Рисунок 2.9 – Исследования НДС PGA соединения

Физико-механические свойства припоя были такие же, что и в задачах о BGA соединении. Элемент PGA считался медным. Его размеры: диаметр – $0,52$ мм; высота – $2,2$ мм. На торце имеется скругление с радиусом, равным $0,026$ мм.

На рисунке 2.10а показано изменение растягивающей силы, действующей на элемент PGA в зависимости от вертикального перемещения корпуса микросхемы. Момент, когда интенсивность напряжений локально достигала величины предела прочности материала, считался началом разрушения элемента. Этому состоянию соответствует значение $U/h = 0,5$. Максимальная нагрузка на элемент PGA равнялась $21,3$ Н ($H = 0,07$ мм); $20,6$ Н ($H = 0,14$ мм); $19,8$ Н ($H = 0,21$ мм). Зависимость $F(U/h)$ во всех случаях можно считать линейной. Результаты показали слабую зависимость максимальной растягивающей силы от высоты натекания припоя на элемент PGA.

На рисунке 2.10б приведена зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины вертикального перемещения корпуса микросхемы. Все графики имеют линейные начальные участки, соответствующие линейным деформациям. При достижении предела текучести происходит излом графиков, и дальнейшее увеличение максимума интенсивности напряжений происходит за счет пластического упрочнения материала.



а) зависимость величины силы, действующей в элементе PGA, от вертикального перемещения корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины вертикального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 2.10 – Результаты расчета

Несущие свойства элемента PGA определялись для сдвиговых нагрузок. На рисунке 2.9в показана конечно-элементная модель соединения. Ставились следующие граничные условия: нижняя сторона платы закреплена; левая сторона микросхемы перемещается горизонтально на заданную величину.

Толщина слоя припоя под торцом стержневого контакта $h = 0,01$ мм.

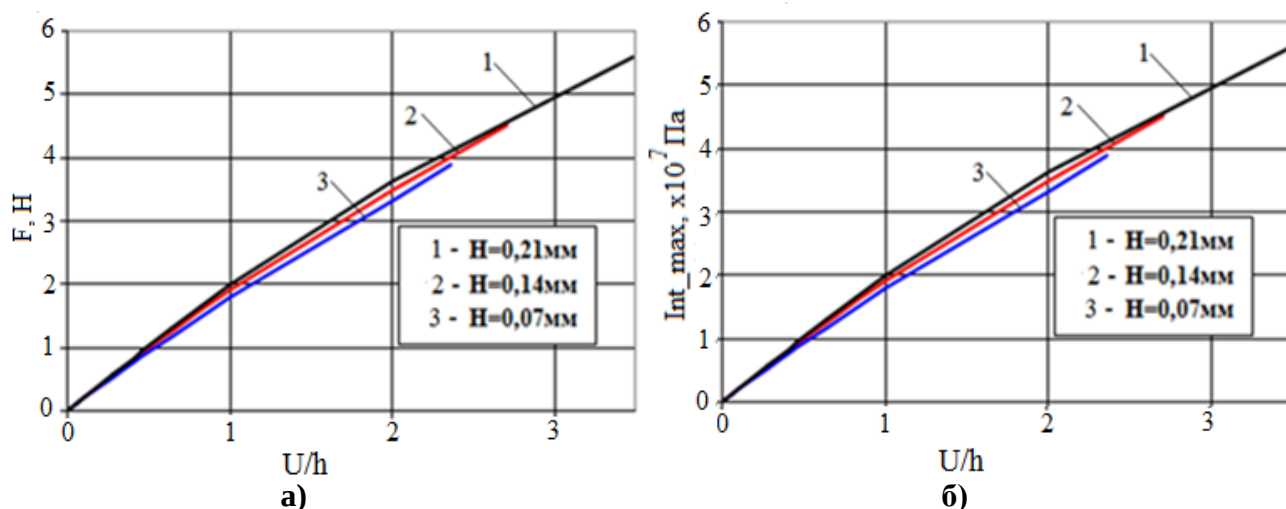
Высота натекания припоя принимала значения $H = 0,07$ мм; $0,14$ мм; $0,21$ мм.

Несущие свойства элемента PGA при сдвиговых перемещениях определялись решением трехмерной задачи. Вследствие симметрии рассматривается только половина конструкции, как показано на рисунке 2.9в.

На рисунке 2.11а показана зависимость сдвиговой силы, действующей в элементе PGA, от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы. Максимум сдвиговой силы ограничен достижением интенсивности напряжений, действующих в припое, предела прочности материала.

На величину сдвиговой силы оказывает существенное влияние уровень натекания припоя. Для $H = 0,21$ мм и $H = 0,07$ мм разница составляет $1,5$ Н.

На рисунке 2.11б приведена зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины горизонтального сдвига корпуса микросхемы. Так же как и в случае BGA контакта (рисунок 2.6б) графики состоят из двух участков: первый соответствует линейным деформациям; второй – пластическим деформациям. Эти участки разделяются точкой излома графика. В этом случае существенна зависимость максимума интенсивности напряжений от уровня натекания припоя.



а) зависимость величины силы, действующей в элементе PGA, от величины горизонтального сдвига корпуса микросхемы; б) зависимость максимума интенсивности напряжений в слое припоя от величины горизонтального перемещения корпуса микросхемы

Рисунок 2.11 – Результаты решения

На рисунке 2.12 показано распределение интенсивности напряжений в припое, соединяющем элемент PGA с платой, при действии сдвиговых нагрузок. Показано распределение вблизи момента начала разрушения. Высота натекания припоя равна 0,07 мм. Из рисунка видно, что максимальные значения интенсивности напряжений достигаются на границе припоя – элемент PGA.

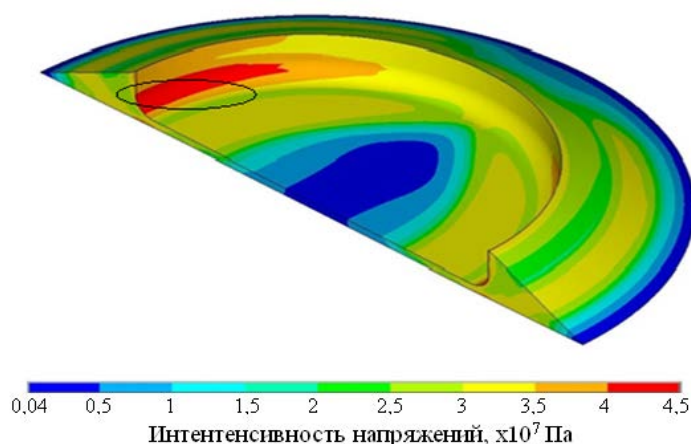


Рисунок 2.12 – Распределение интенсивности напряжений в припое, соединяющем элемент PGA с платой

Результаты численного моделирования показывают, что при сравнимых характерных размерах BGA контактов и PGA выводов последние являются более надежными с позиций отрывных нагрузок и по отрывному усилию на порядок превосходят BGA контакты.

При размерах наплывов припоя на цилиндрическую поверхность контакта PGA более четверти диаметра контактного вывода увеличения прочности при отрыве не несут.

Результаты исследования на растягивающие нагрузки показали, что системы выдерживают небольшие нагрузки, поэтому при изготовлении ЭП, содержащих в монтаже чипы с BGA и PGA корпусами, необходима проверка устойчивости паяных соединений этих систем к эксплуатационным нагрузкам.

Оценка несущей способности контактных соединений

По полученным результатам моделирования НДС контактных соединений корпусов микрочипов (BGA и PGA) и результатам других исследователей (данные о корпусах типа MCS взяты из отчета NASA) построен график зависимости максимума интенсивности напряжений в паяном соединении (в Па) от горизонтального перемещения чипа относительно платы (в мм) (рисунок 2.13). На рисунке 2.13 приняты обозначения: BGA* – BGA при обтекании припоя контактной площадки, BGA – BGA без обтекания.

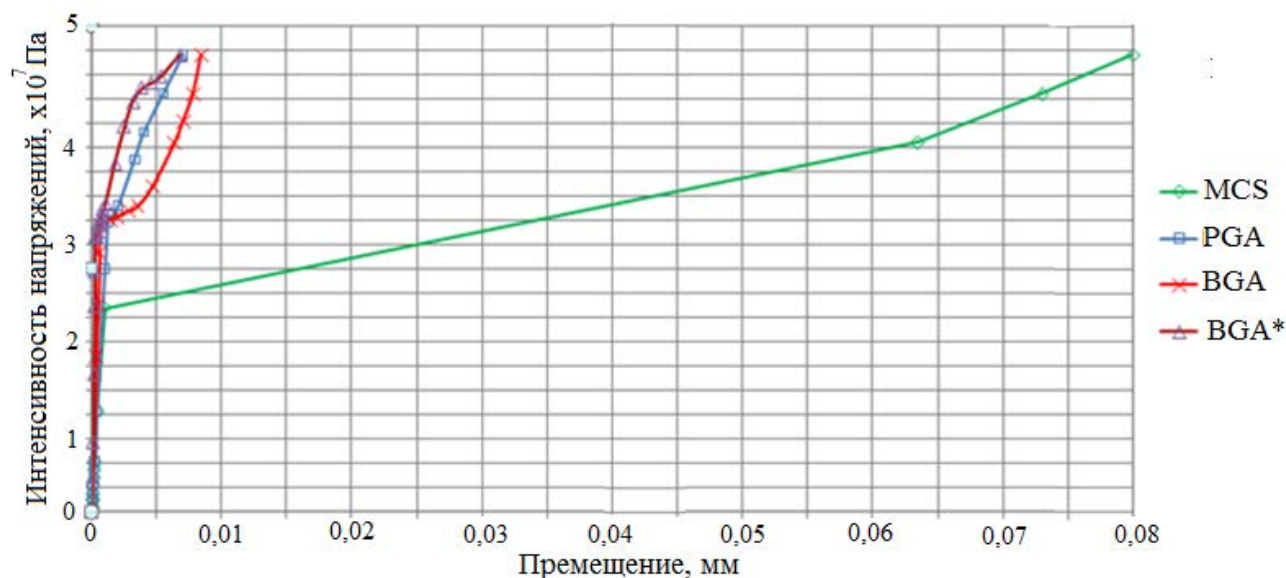


Рисунок 2.13 – Результаты расчета

Для оценки несущей способности рассмотренных контактных соединений, определяется сдвиг τ корпуса микрочипа относительно ЭП при температурном цикле от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ по выражению (взято у R.R. Tumalla):

$$\tau = L(\alpha_b - \alpha_c)(T_{max} - T_0) + L(\alpha_b - \alpha_c)(T_0 - T_{min})$$

где L – расстояние от контакта до геометрического центра корпуса микрочипа, α_b и α_c – коэффициенты теплового расширения печатной платы и корпуса микрочипа соответственно, T_0 , T_{min} и T_{max} – температура при нормальных условиях, минимальное и максимальное значение температуры в цикле соответственно.

Чтобы получить значения максимума интенсивности напряжений в паяном соединении контакта, соотносим сдвиг с результатами на графике (рисунок 2.13).

Сдвиговая деформация вычисляется по соотношению (его вид определялся из испытаний на одноосное растяжение образцов из материала припоя)

$$\varepsilon(\sigma, t) = \left(\frac{\sigma}{E}\right) + A_1 \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{B_1}$$

где $A_1 = 1,17 \cdot 10^{57}$, $B_1 = 22,26$, $E = 16,082 \cdot 10^9$ Па.

Для определения количества циклов до момента, когда контактное паяное соединение потеряет свою несущую способность при заданной нагрузке, используется выражение (2.86)

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

Для расчета применялись следующие данные:

- скорость нагружения $v = 1,39 \cdot 10^{-3}$ циклов/с (протяженность температурного цикла по времени равна 1 цикл в 2 часа);
- константы модели $C_1 = 3,3012$, $a = 6,4411$, $b = 0,0284$;
- повреждаемость изменяется в диапазоне $0 \leq \omega(t) \leq 1$.

По результатам решения построена зависимость степени повреждаемости паяного соединения от времени работы при данной скорости нагружения для каждого типа контактов (рисунок 2.14). На графике показано, что при данной скорости нагружения корпус чипа на PGA контактах отработает 2500 часов, на BGA контактах (без натекания припоя на контактную площадку) – 3600 часов, на BGA контактах (с натеканием припоя на контактную площадку) – 2250 часов, на MCS контактах – 6500 часов.

По результатам теоретического расчета долговечности контактных соединений корпуса микрочипа с ЭП при термоциклировании самым надежным является корпус на MCS контактах.

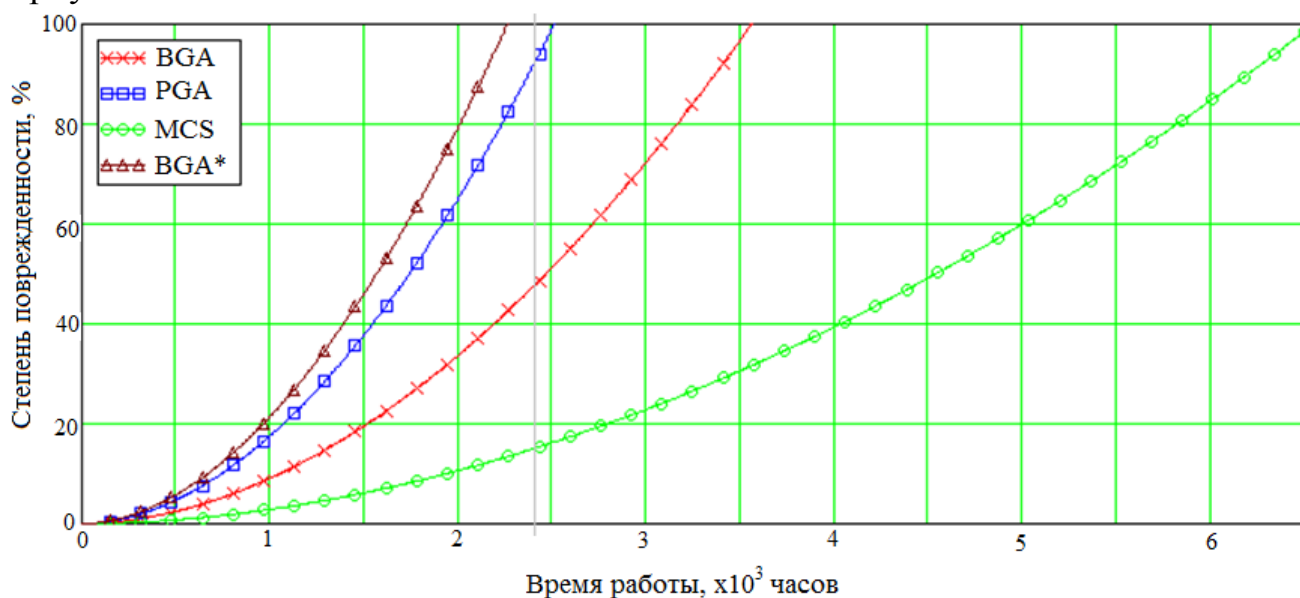


Рисунок 2.14 – Результаты расчета. Функция поврежденности разных типов контактов в зависимости от времени работы

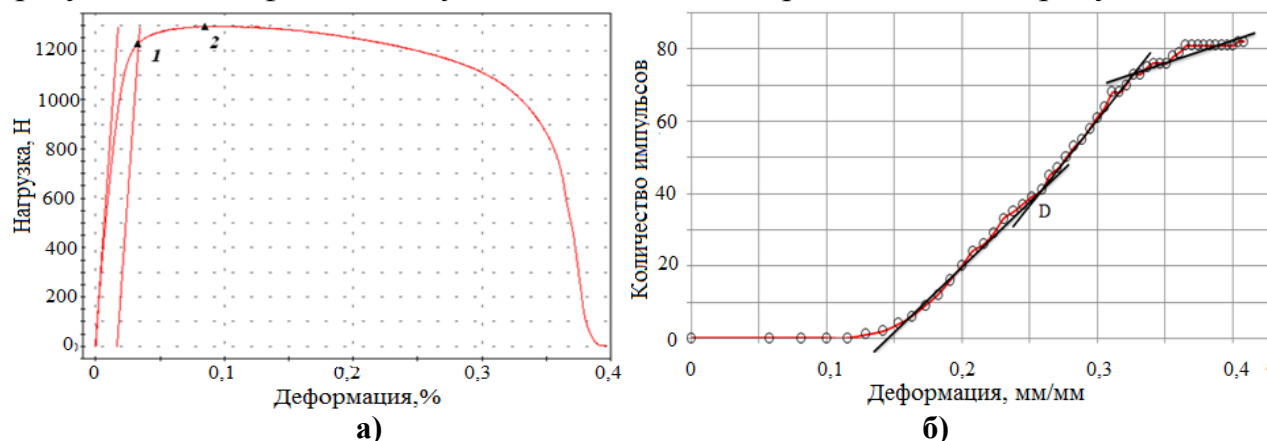
Третья глава посвящена определению степени поврежденности исследуемого типа материала с помощью метода акустической эмиссии.

Для описания поведения материала паяного соединения под нагрузкой необходимо отслеживать накопление повреждений в реальном времени. Поэтому, разработка метода количественной оценки структурных изменений в твердом теле представляется актуальной.

Анализ акустической эмиссии (АЭ), сопровождающей деформацию и разрушение твердых тел, является очень эффективным в этом отношении. Метод АЭ – эффективное средство неразрушающего контроля и оценки материалов, основанное на обнаружении упругих волн. Любой дефект производит свой собственный акустический сигнал, регистрация которого возможна на большом расстоянии. К особенностям метода акустического контроля, относятся высокая чувствительность и принципиальная возможность раннего обнаружения дефектов независимо от их ориентации, формы и положения, а также возможность наблюдения в реальном масштабе времени.

Рассмотрены существующие подходы использования параметров метода акустической эмиссии для прогнозирования разрушения материалов. Чтобы обосновать применимость выбранной методики для материала паяного соединения, проведены испытания на одноосное растяжение. Для испытания использовались образцы следующего вида: лопатки с рабочей частью длиной 35 мм и сечением 8х4 мм.

Образцы испытывали на Microtester Instron 5948. На границах рабочей зоны образца установлены акустические датчики. При помощи установки АЭ Micro 2 digital AE system регистрировалось появление и местоположения образующихся дефектов. Результаты испытаний представлены на рисунке 3.1.



а) зависимость нагрузки F от деформации ε ;

б) зависимость количества импульсов АЭ N_a от деформации $\varepsilon^{1/2}$

Рисунок 3.1 – Результаты испытаний

На рисунке 3.1б видно, что накопления повреждений в материале контактного соединения идет в три этапа (три прямые линии). На первом этапе происходит накопление микрповреждений в одной области (достигается точка деструкции D – предел текучести материала точка 1 на рисунке 3.1а), на втором этапе микрповреждения перерастают в микротрещины (основная часть событий АЭ) и достигается максимум нагрузки (точка 2 на рисунке 3.1а), на третьем этапе образуется макротрещина и количество событий АЭ остается практически неизменным.

Представленная на рисунке 3.1б экспериментальная кривая аппроксимируется соотношением:

$$N(x) = A_1 * (\text{th}(A_2(x - x_0)) + 1),$$

$$x = \varepsilon^{1/2}$$

где N – количество циклов до разрешения при данном размахе деформаций, ε – размах деформации, A_1 , A_2 , x_0 – параметры модели (для материала припоя параметры $A_1 = 42,5$; $A_2 = 12,5$; $x_0 = 0,26442$), th – функция гиперболического тангенса.

Соотнеся зарегистрированное количество акустических импульсов за определенное количество тестовых циклов при заданном размахе деформаций, мы определим точку на диаграмме, приведенной на рисунке 3.1б. Суммарная погрешность прогнозирования степени поврежденности объекта моделирования

и, как следствие, погрешность прогнозирования оставшегося ресурса жизни не превышает 9%.

Четвертая глава посвящена разработке метода испытания ЭП на механические воздействия и конструкции испытательного стенда, для реализации этого способа.

При работе приборов в составе различных машин и оборудования (например, космических аппаратов) платы с электрорадиоэлементами подвергаются различного вида внешним воздействующим факторам: механическим, климатическим, ионизационному излучению и т.д. К механическим воздействиям относят: статические, вибрационные, линейные, ударные нагрузки и акустический шум. Изделия, предназначенные для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, должны быть прочными и устойчивыми при воздействии этих факторов. Эта способность проверяется в процессе проведения испытаний на механические воздействия. Испытания ЭП на все виды воздействий требуют длительного времени, наличие разнообразного дорогостоящего оборудования и, кроме того, ЭП будут повторно проходить этот объем испытаний уже в составе аппаратуры. Поэтому необходим метод, который не задействует сложного оборудования и способный проверить надежность работы разрабатываемой ЭП при эксплуатационных нагрузках.

В разрабатываемом методе сначала создают подробную конечно-элементную модель ЭП, и проводят анализ прибора на все виды механических нагрузок. Например, для аппаратуры применяемой на космических аппаратах, – это квазистатические (линейные), вибрационные (гармоническая и случайная вибрация) и ударные воздействия. По результатам такого моделирования получают поле перемещений, возникающих в ЭП при эксплуатации в составе прибора. Затем строят огибающую максимальных значений перемещений. Реализация этого поля перемещений с соблюдением соответствующих граничных условий закрепления платы в приборе обеспечит при отработочных испытаниях (испытания проводят на расчетные нагрузки, включающие коэффициенты безопасности) создание напряжений, которые не будут превышены при эксплуатации. Расчетным путем далее выбирают точки приложения нагрузки и точку с максимальным перемещением.

Затем величину нагрузки в каждой из выбранных точек определяют по формуле 4.1 (рисунок 4.1):

$$\delta_j(x_i, y_i) = G \cdot P_i(x_j, y_j) / D, \quad (4.1)$$

где $\delta_j(x_i, y_i)$ – перемещение в j точке под влиянием нагрузки приложенной в i точке; $P_i(x_j, y_j)$ – нагрузка приложенная в точке i ; G – коэффициент пропорциональности связывающий перемещение с усилием и цилиндрической жесткостью платы; $D = E \cdot h^3 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$ – цилиндрическая жесткость платы (E – модуль Юнга материала печатной платы, h – толщина печатной платы, ν – коэффициент Пуассона материала печатной платы).

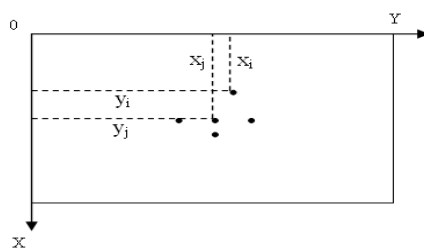


Рисунок 4.1 – Схема расчета предлагаемого метода

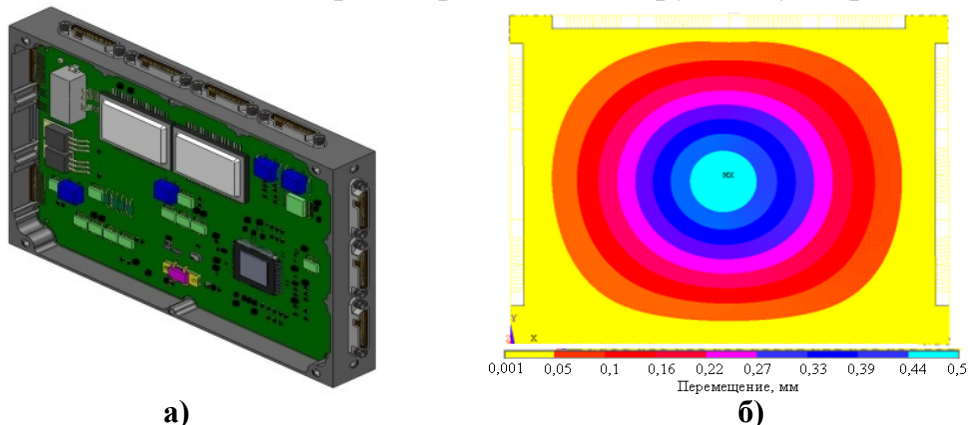
Такой подход (учет перемещений в контролируемой точке от нагрузок, приложенных во всех точках) позволяет получить поле перемещений и контролировать его уже по формуле (4.2).

$$\delta_{\max}(x_j, y_j) \geq \sum_{i=1}^N \delta_j(x_i, y_i) + \Delta, \quad (4.2)$$

где $\delta_{\max}(x_j, y_j)$ – максимальное перемещение в точке j ; $\sum_{i=1}^N \delta_j(x_i, y_i)$ – суммарное перемещение в j точке; N – количество точек приложения нагрузки ($N \geq 1$); j – номер точки с максимальным перемещением; i – номер текущей точки с перемещением; Δ – погрешность задания перемещения.

Затем переходят к проведению испытаний, при этом в оснастке для установки ЭП обеспечивают граничные условия, аналогичные условиям закрепления ЭП в составе прибора. Это обеспечивает нагружение ЭП в зоне закрепления, как при работе в составе прибора. Причем нагружение выбранных точек проводят последовательно, контролируя перемещения в остальных точках, и при необходимости увеличивают перемещение в последующих точках, обеспечивая создание поля перемещений с реальными возможностями оборудования без опасения не нужного перегрузения ЭП, при этом напряжения, возникающие в плате, не превышают допустимых значений для материала электронной платы и комплектующих элементов. При созданном таким образом напряженном состоянии ЭП проверяют целостность электрических цепей проходящих через наиболее напряженные контакты.

Для подтверждения работы данного метода проводится численное моделирование электронного модуля (ЭМ), состоящего из двух ЭП наклеенных на алюминиевую рамку (рисунок 4.2а). На рисунке 4.2б показано поле перемещений поверхности ЭМ, возникающее при инерционной нагрузке с ускорением 20g.



а) общий вид электронного модуля, б) изолинии прогибов платы при динамических испытаниях электронного модуля

Рисунок 4.2

Используя формулы (4.1) и (4.2), рассчитываются точки приложения локальных нагрузок и величины этих нагрузок. Затем переходят к проведению испытаний, при этом в оснастке для установки ЭМ обеспечивают граничные условия, аналогичные условиям закрепления ЭМ в составе прибора. Рассчитанные нагрузки прикладываются в выбранных точках, в результате получается определенный прогиб, который должен соответствовать прогибу поверхности ЭМ при динамическом нагружении. Сравнение профилей прогиба вдоль и поперек ЭМ при двух способах нагружения представлено на рисунке 4.3.

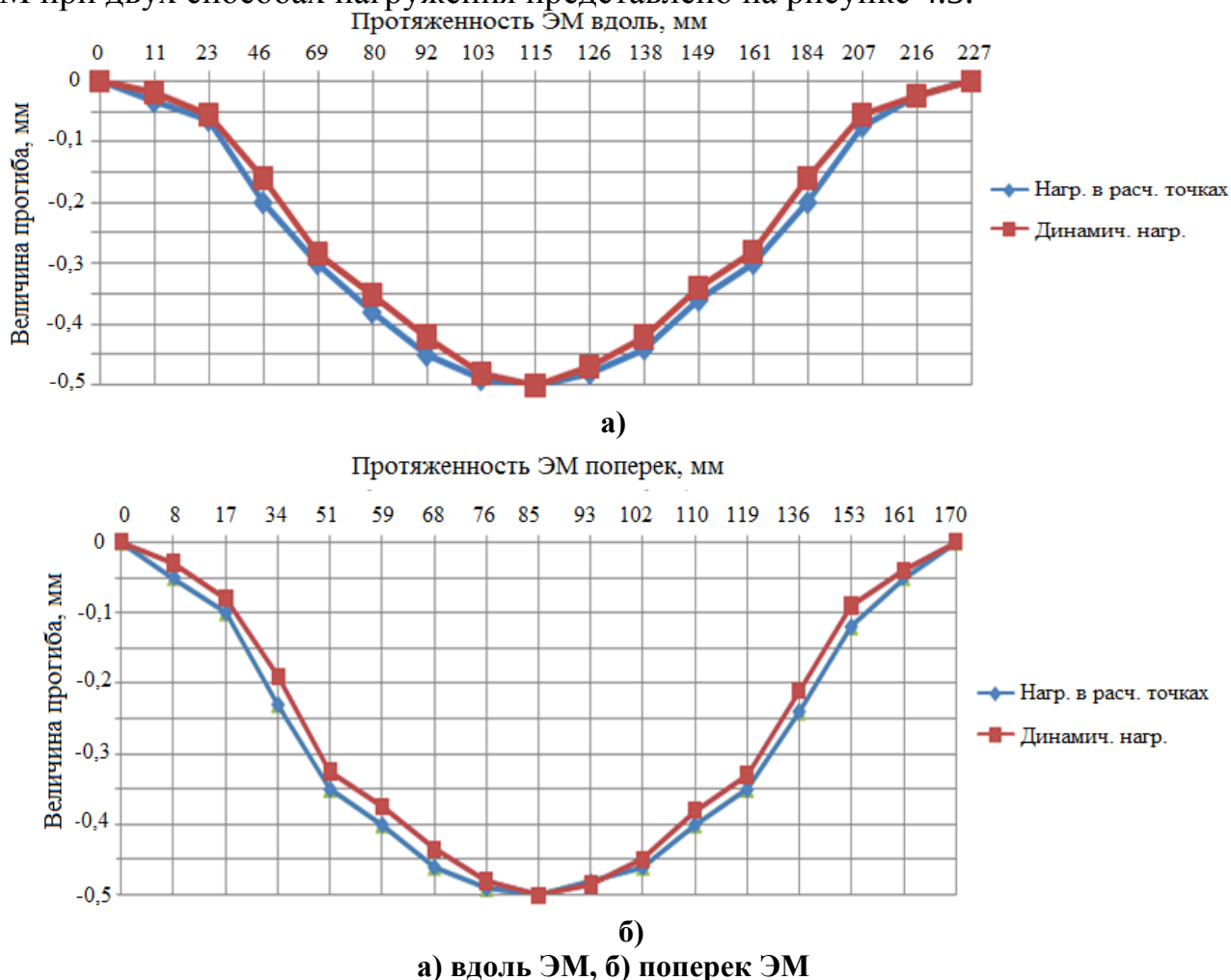


Рисунок 4.3 – Профили прогиба поверхности ЭМ

Из графиков видно, что прогибы совпадают. Поэтому можно заключить, что представленный метод учитывает условия эксплуатации и реальное нагружение ЭП в составе прибора, а, следовательно, позволяет проводить более качественный анализ надежности работы ЭП.

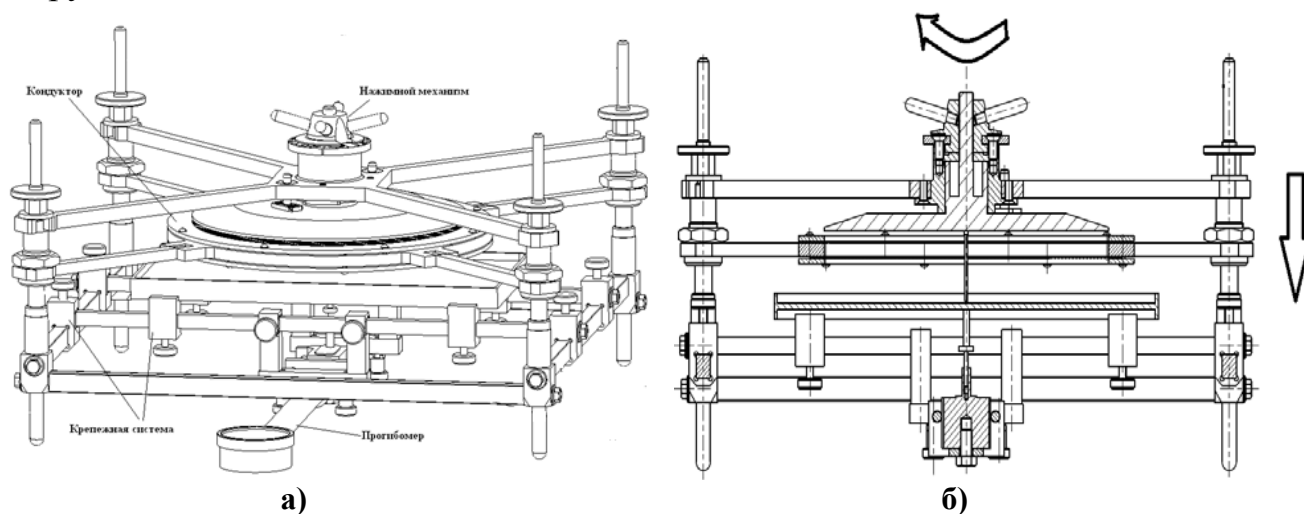
Значимость способа для проведения испытаний ЭП на стадии отработки обоснована, поэтому необходимо разработать устройство (испытательный стенд), с помощью которого выше описанный метод можно было осуществить. На рисунке 4.4а представлена конструкция испытательного стенда для механических испытаний электронных модулей, состоящая из нажимного механизма, кондуктора и крепежной системы с прогибомером.

Принцип работы устройства заключается в следующем: ЭМ устанавливается на опоры стенда таким образом, чтобы центральная ось стенда проходила через

точку максимального прогиба модуля. Присоединяется прибор проверки функциональности ЭМ.

Над ЭМ устанавливается кондуктор и фиксируется гайками на стойках. В кондуктор, до упора в поверхность платы, устанавливаются инденторы, количество и координаты расположения, которых соответствуют расчетам, сделанным с помощью вышеизложенного метода. Выше устанавливается нажимной механизм.

Под ЭМ на крепежном механизме фиксируется прогибомер. Выдвижной винт прогибомера подводится к поверхности ЭМ в рассчитанной точке максимального прогиба. Шкала нутромера зануляется. Под нагрузкой ЭМ будет прогибаться, и индикатор будет отображать величину прогиба. На рисунке 4.4б показана схема нагружения ЭМ.



а) общий вид; б) схема нагружения ЭМ

Рисунок 4.4 – Измерительный стенд

Для обоснования конструкции и материалов, которые используются для изготовления стенда, проведен численный расчет конечно-элементной модели стенда на рабочие нагрузки в программно-инженерного пакета ANSYS.

По данным проведенного расчета интенсивность напряжений на всех компонентах конструкции находится в зоне упругости материалов стенда (максимальное значение интенсивности напряжений равно $0,481 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, модуль Юнга для стали – $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$). Максимальное значение интенсивности напряжений на корпусе ЭМ $0,194 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, модуль Юнга сплава алюминия $0,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, следовательно нагружение ЭМ проходит в зоне упругости. Максимальные напряжения в материале платы возникают в зонах контакта с инденторами, за счет которых проводится нагружение ЭМ. Максимальное значение интенсивности напряжений равно $0,729 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, модуль Юнга защитного слоя $0,2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, следовательно защитная поверхность платы повреждена не будет.

Проведенный конечно-элементный анализ доказывает, что с использованием разработанных метода и испытательного стенда можно проводить более качественный анализ надежности работы как самих ЭП, так и в составе ЭМ, потому что учитываются условия эксплуатации и реальное нагружение ЭП в составе прибора.

По результатам проведенных исследований создан программно-аппаратный комплекс, состоящий из испытательного стенда и акустической системы, назначение которого заключается в совершении механического воздействия на ЭМ с целью проверки работоспособности, выявлению и классификации дефектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи разработки метода оценки прочности и долговечности паяных контактных соединений элементов ЭП при эксплуатационных нагрузках.

Сформулирован и решен ряд важных с практической точки зрения задач о деформации паяных соединений элементов ЭП под действием механических нагрузок.

Основные научные и практические результаты состоят в следующем:

1. На основе новых численных решений о деформации контактных соединений из припойного материала получен теоретический прогноз долговечности паяных соединений контактов BGA и PGA корпусов микрочипов с ЭП. Результаты исследования на растягивающие нагрузки показали, что системы выдерживают небольшие нагрузки, поэтому при изготовлении ЭП, содержащих в монтаже чипы с BGA и PGA корпусами, необходима проверка устойчивости паяных соединений этих систем к эксплуатационным нагрузкам.

2. На основе проведенного исследования разработан метод оценки долговечности контактных соединений, включающий выражения определения остаточного ресурса и оценки долговечности по планируемой истории нагружения для материала контактного соединения комплектующих ЭП.

3. Разработан способ испытания ЭП на механические воздействия, использующий численное моделирование ЭП. Представленный метод учитывает условия эксплуатации и реальное нагружение ЭП в составе прибора, а, следовательно, позволяет проводить более качественный анализ надежности работы ЭП.

4. Обоснована методика количественной оценки на базе данных АЭ концентрации дефектов, возникающих при пластическом деформировании припойного материала.

5. Разработано устройство (испытательный стенд), реализующее представленный метод механических испытаний ЭП. В результате трехмерного моделирования были получены оценки прочности конструкции испытательного стенда при рабочих нагрузках.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В. Обзор методов обнаружения механических дефектов радиоэлектронных модулей // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 12/2. – С. 3 – 9. – 0,42 / 0,12 п.л.

2. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев В. С., Пономарев С. В., Жуков А. П., Сунцов С. Б. Экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформируемого состояния и оценка долговечности BGA и CGA контактов электронных модулей // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 10/2. – С.146-153. – 0,48 / 0,12 п.л.

3. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В., Сунцов С. Б. Разработка метода испытания электронных плат с чипами с BGA и CGA на механические воздействия и устройства для его осуществления // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/3. – С. 3 – 8. – 0,36 / 0,12 п.л.

4. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В., Сунцов С. Б. Разработка экспериментально-теоретического метода прогнозирования разрушения материалов для радиоэлектроники // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 7/2. – С. 3 – 9. – 0,42 / 0,18 п.л.

5. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В., Сунцов С. Б. Обзор существующих инженерных решений по контактам корпусов керамических микрочипов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 7/2. – С. 9 – 15. – 0,42 / 0,09 п.л.

Заявка на патент Российской Федерации:

6. Заявка на изобретение № 2012123246 Способ испытаний электронных плат на механические воздействия // **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Орлов С. А., Пономарев С. А., Пономарев С. В., Сунцов С. Б. / приоритет от 05.06.2012. – 0,84 / 0,18 п.л.

7. Заявка на изобретение № 2013112350 Устройство для испытаний электронных плат на механические воздействия // **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Орлов С. А., Пономарев С. А., Пономарев С. В., Сунцов С. Б. / приоритет от 19.03.2013. – 0,84 / 0,18 п.л.

Свидетельство на программу для ЭВМ:

8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013613398 Программа расчета влияния механических нагрузок на электронные модули // Пономарев С. А., Пономарев С. В., **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Бовсуновский А. Б. / Опубл. 03.04.2013. – 0,84 / 0,12 п.л.

Статьи в других научных изданиях:

9. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В. Разработка метода испытаний электронных плат с чипами на BGA и CGA корпусах на механические воздействия // Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики

сплошных сред и небесной механики: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной 50-летию физико-технического факультета Томского государственного университета. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 58 – 61. – 0,24 / 0,06 п.л.

10. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В. Разработка метода прогнозирования разрушения материалов для радиоэлектроники // Труды Томского государственного университета. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной 50-летию физико-технического факультета Томского государственного университета. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – С. 191 – 194. – 0,24 / 0,06 п.л.

11. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В. Разработка комплексного экспериментально-теоретического метода прогнозирования разрушения материалов для радиоэлектроники // Механики XXI века. XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. – С. 5 – 11. – 0,3 / 0,08 п.л.

12. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А., Пономарев С. В. Разработка метода испытаний электронных плат с чипами на BGA и CGA корпусах на механические воздействия // Механики XXI века. XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. – С. 11 – 15. – 0,36 / 0,09 п.л.

13. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А. Обзор существующих инженерных решений по контактам керамических корпусов микрочипов // Труды X международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук – 2013». – Томск, 2013. – С. 654 – 657. – 0,24 / 0,09 п.л.

14. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А. Разработка метода испытания электронных плат с чипами на механические воздействия и устройства для его осуществления // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Т. 1. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 119 – 120. – 0,12 / 0,03 п.л.

15. **Азин А. В.**, Марицкий Н. Н., Пономарев С. А. Разработка экспериментально-теоретического метода прогнозирования разрушения материалов для радиоэлектроники // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Т. 3. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 50 – 52. – 0,18 / 0,06 п.л.

Подписано в печать 25.10.2013 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 15/10-13
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а