

На правах рукописи



Марицкий Николай Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ 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 механики деформируемого твердого тела 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, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра строительной механики, профессор

Усманов Давид Бисенович, кандидат физико-математических наук, Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», ведущий инженер

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Защита диссертации состоится 27 декабря 2013 г. в _____ 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 «26» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Христенко Юрий Федорович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Одна из основных целей, стоящих перед космической промышленностью на сегодняшний день это создание искусственного спутника Земли с длительным сроком активного существования (15 лет и выше). Среди требований, предъявляемым к изделиям аппаратуры космического назначения, важное место занимают характеристики стойкости и долговечности при воздействии механических и термомеханических нагрузок.

Процесс создания космических аппаратов (далее КА) включает в себя этапы, связанные с проектированием, изготовлением и экспериментальной отработкой отдельных элементов, агрегатов, систем и аппарата в целом. В современных условиях до 40% всех возникающих проблем решаются при помощи испытаний в рамках наземной экспериментальной отработки. Совершенствование средств математического моделирования физических процессов постепенно уменьшает эту долю, выводя решение ряда проблем в область проектирования.

Современные технологии проектирования элементов конструкции и радиоэлектронной аппаратуры (далее РЭА) КА основываются на использовании цифровой модели изделий, что позволяет существенно сократить сроки разработки и оценить степень соответствия разрабатываемых изделий аппаратуры космического назначения требованиям, предъявляемым к ним, еще на этапе проектирования, а также снизить объемы наземной экспериментальной отработки за счет сокращения итераций доводки опытных образцов.

Построение цифровой модели этих изделий, пригодной для моделирования механических процессов, как на этапе проектирования, так и на этапе наземной экспериментальной отработки, невозможно без использования адекватных, теоретически обоснованных физико-математических моделей, достоверно описывающих механическое поведение используемых материалов и учитывающих особенности их поведения в условиях эксплуатации изделий из них, а также методов достоверного прогнозирования долговечности этих материалов.

Таким образом, качественное, надежное и эффективное моделирование напряженно-деформированного состояния материалов элементов КА является одним из актуальных направлений для развития ракетно-космической отрасли.

Решением задачи моделирования механического поведения материалов в конструкциях занимались такие специалисты как Ю.Н. Работнов, А.А. Ильюшин, В.В. Москвитин, М.А. Колтунов, Б.Е. Победря, В.В. Болотин, Н.А. Махутов, С.О. Гевлич, В.Н. Кришук, А.Н. Аношкин, В.М. Горицкий и др. При всем разнообразии наибольший интерес представляют сравнительно простые, но адекватно описывающие реальное механическое поведение материалов, нелинейные модели, параметры которых возможно определить либо по минимальному числу простых экспериментов (одноосное растяжение, трехточечный изгиб и проч.), либо по результатам кратковременных испытаний. Также большой интерес представляет

возможность определения параметров моделей механического поведения и прогнозирования ресурса эксплуатации при помощи методов неразрушающего контроля (МНК). Учитывая потенциально широкую область применимости данных методов в развитии электронной промышленности, разработка метода прогнозирования долговечности и определения параметров моделей механического поведения материалов при помощи МНК должна занимать одно из ключевых мест в области проектирования.

Цель диссертации – установление закономерностей механического поведения и разработка метода достоверного прогнозирования долговечности материалов, применяемых элементах космических аппаратов (а именно: высокоплотных керамик с низкой температурой обжига на основе оксида алюминия, низкотемпературных припоев системы олово–свинец, конструкционных сталей, композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего, металлических сетеполотен).

Решаемые задачи для достижения поставленных целей:

1. Исследование механического поведения материалов, используемых в современной технике (в том числе космической), а именно высокоплотных керамик с низкой температурой обжига на основе оксида алюминия, низкотемпературных припоев системы олово–свинец, конструкционных сталей, композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего, металлических сетеполотен.

2. Определение, на основе анализа экспериментальных результатов, моделей механического поведения рассматриваемых материалов в условиях реализующихся при эксплуатации КА, учитывающих особенности поведения материалов и накопленные в процессе эксплуатации повреждения.

3. Разработка алгоритма и методики определения материальных констант моделей и механических характеристик исследуемых материалов на основании проведенных механических испытаний в диапазоне температур эксплуатации космической техники.

4. Разработка алгоритма определения параметров кинетического уравнения модели накопления повреждений низкотемпературных припоев, системы олово–свинец в стационарном температурном поле в условиях статического и циклического нагружения при помощи метода акустической эмиссии.

5. Проведение механических испытаний для определения материальных констант рассматриваемых материалов и параметров моделей по разработанным методикам и алгоритмам в стационарном температурном поле в условиях статического и циклического нагружения с использованием современных средств и методов исследования, а также анализ полученных результатов.

Методика исследования – при выполнении диссертации применялись методы механики деформируемого твердого тела и математического моделирования, а также методы экспериментального исследования процессов деформирования

твердых тел. Использовались современные экспериментальные методы испытаний и установки для их реализации.

Новизна результатов диссертации:

1. Проведен комплекс экспериментальных исследований современных материалов, применяемых в элементах космических аппаратов (а именно: композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего, металлических сетеполотен, керамических материалов на основе оксида алюминия, низкотемпературных припоев системы олово-свинец, конструкционных сталей).

2. На основании анализа результатов экспериментов показана возможность описания деформации низкотемпературных припоев системы олово–свинец при гомологических температурах T/T_m от 0,1 до 0,9 в диапазоне деформаций от 0 до 6% нелинейной моделью вязкоупругости с учетом накопленных повреждений. Разработан и реализован алгоритм определения параметров моделей оценки долговечности и описания механического поведения рассмотренных материалов, используемых в элементах космических аппаратов. Область применения указанных моделей: описание механического поведения и оценка долговечности рассмотренных материалов при статическом деформировании в диапазоне скоростей до $1,5 \text{ с}^{-1}$ и при циклическом – с частотой до 30 Гц в температурном диапазоне от 20 до 180°C .

3. Показана полезность и эффективность применения современного метода неразрушающего контроля – акустической эмиссии (далее АЭ) для: а) определения параметров кинетического уравнения разработанной с позиций механики деформируемого твердого тела модели повреждаемых материалов; б) прогнозирования предела выносливости рассмотренных материалов.

4. Получены новые экспериментальные результаты: деформирования низкотемпературных припоев системы олово-свинец и композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего в малоцикловой области; циклического деформирования конструкционных сталей и высокоплотных керамик на основе оксида алюминия в мало и многоцикловых областях; одноосного растяжения указанных припоев и композитных материалов в интервале гомологических температур T/T_m от 0,1 до 0,9; одноосного и двухосного деформирования металлического сетеполотна.

5. Разработана нелинейная модель описания механического поведения металлических сетеполотен при квазистатическом нагружении и разгрузке, учитывающая контактное взаимодействие структурных элементов материала.

Практическая ценность полученных результатов: полученные математические соотношения позволяют более точно описать поведение рассмотренных материалов, в том числе и при циклических нагружениях, а значит повысить качество и оперативность проектных работ. Разработанные модели повреждаемых материалов с кинетическим уравнением, построенным по

результатам акустической эмиссии, позволят с высокой достоверностью спрогнозировать долговечность элементов КА при активном существовании в условиях космического пространства.

Достоверность результатов проведенных исследований – обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечена:

- обоснованностью исходных предпосылок и использованием классических методов математического моделирования напряженно-деформированного состояния материалов;

- погрешность моделирования не превышает 3% на всем времени жизненного цикла образцов материалов при разных условиях деформирования;

- согласованием, в частных случаях, полученных результатов с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов;

- при проведении измерений использовалось аттестованное метрологическими службами измерительное оборудование.

На защиту выносятся следующие положения:

1. На основании анализа проведенных экспериментальных и теоретических исследований показана возможность: а) применения степенных моделей усталостной долговечности для описания механического поведения материалов, используемых в элементах космических аппаратов (а именно: низкотемпературных припоев системы олово-свинец, керамических материалов на основе оксида алюминия, конструкционных сталей, композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего), при циклическом деформировании в диапазоне частот до 30 Гц, реализующемся при эксплуатации космических аппаратов; б) описания деформации низкотемпературных припоев системы олово–свинец в интервале гомологических температур T/T_m от 0,1 до 0,9 в диапазоне деформаций от 0 до 6% при помощи нелинейной модели механического поведения вязкоупругого повреждаемого материала с использованием ядер М.А. Колтунова.

2. Нелинейная модель механического поведения металлических сетеполотен, разработанная на основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований, учитывающая контактное взаимодействие структурных элементов материала.

3. Кинетические уравнения моделей повреждаемых материалов, построенные на основе анализа результатов, полученных при помощи классических методов исследования и метода акустической эмиссии, предназначенные для оценки ресурса эксплуатации изделий из рассмотренных материалов.

4. Алгоритм определения параметров модели вязкоупругих и хрупких повреждаемых материалов с кинетическим уравнением функции повреждаемости, построенным на основе анализа результатов акустической эмиссии, а также

параметров определяющих соотношений, описывающих напряженно-деформированное состояние рассмотренных материалов.

5. Результаты экспериментальных исследований механического поведения материалов, применяемых при изготовлении элементов космических аппаратов: циклического деформирования конструкционных сталей и керамик на основе оксида алюминия в мало и многоциклового области с частотами до 30 Гц; циклического деформирования низкотемпературных припоев системы олово-свинец и композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего в малоциклового области с частотами до 30 Гц; ползучести низкотемпературных припоев системы олово-свинец и композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего при н.у.; одноосного растяжения, сжатия, трехточечного изгиба рассмотренных материалов в температурном диапазоне, реализующемся при эксплуатации космических аппаратов; результаты одноосного и двухосного статического растяжения металлических сетеполотен.

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 на защиту, получены автором самостоятельно. Постановка задач исследований осуществлена автором как единолично, так и в соавторстве с научным руководителем.

Апробация работы – основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на 6 Международных и Всероссийских конференциях: 1) VII международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук–2010», 20 апреля 2010 г., г. Томск; 2) II Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», 11 апреля 2012 г., г. Томск; 3) XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Механики XXI века», 15 мая 2012г., г. Братск; 4) XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ–2013), 15 апреля 2013г., г. Томск; 5) X международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук–2013», 23 апреля 2013 г., г. Томск; 6) 8 всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 22 апреля 2013 г., г. Томск.

Внедрение результатов работы – результаты диссертационного исследования включены в научно-технические отчеты по: опытно-конструкторской работе по постановлению Правительства РФ № 218 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»; составной части ОКР по теме «Создание цифровой модели бортовой РЭА для моделирования механических процессов на этапах проектирования и наземной экспериментальной отработки», шифр СЧ ОКР «Развитие – ТГУ»; НИР по теме: «Разработка метода неразрушающего обнаружения потенциально опасных дефектов электронных модулей приборов космических аппаратов с использованием аппаратуры акустической эмиссии», шифр «2013–1.4–14–514–0010–014»; НИР по теме: «Моделирование прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов», шифр заявки «2013–1.3–14–513–0002–020»; НИР по теме «Определение механических характеристик конструкционных материалов в условиях динамических испытаний» заказчик ОАО АвтоВАЗ.

Публикации – результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 5 из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Публикации, отражающие основное содержание диссертации приведены в конце данного автореферата.

Структура и объем – диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы; содержит 51 рисунок, 37 таблиц, библиографический список из 79 наименований и 34 нормативных документов – всего 135 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы и определены конкретные задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту. Завершают введение сведения об апробации работы, практическом применении результатов, структуре и объеме диссертации.

В первой главе в первом параграфе для описания поведения низкотемпературных припоев системы олово–свинец проведен анализ существующих соотношений связи напряженного и деформированного состояний вязкоупругих материалов.

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

В третьем параграфе первой главы описаны характерные особенности металлических сетеполотен и теоретическая разработка модели механического поведения данного материала для описания деформации с учетом контактного взаимодействия структурных элементов в нем.

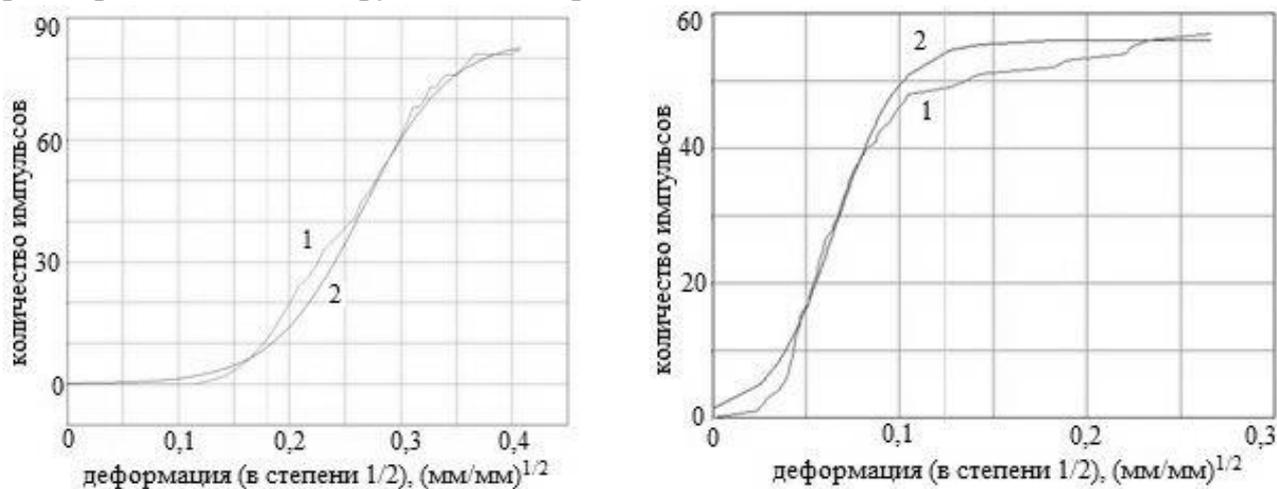
Во второй главе представлены алгоритм определения моделей (и их параметров) описания механического поведения, описание современных МНК и практическое применение метода АЭ для построения кинетического уравнения модели повреждаемого материала (на примере испытаний контактных соединений типа BGA чипа с печатной платой) и для прогнозирования места разрушения образца при статическом и циклическом деформировании. Кроме того, для описания механического поведения материалов, используемых в элементах КА (а именно, низкотемпературных припоев, высокоплотных керамических материалов на основе оксида алюминия, конструкционных сталей, композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего) проведен обзор моделей усталостной долговечности и подходов учета температурных воздействий в определяющих соотношениях.

Для отработки метода АЭ и определения вида функции поврежденности материала проведена серия экспериментов по регистрации акустических сигналов при помощи установки АЭ Micro2 digital AE system [Physical Acoustic Corporation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pacndt.com/>] при срезе одного шарика BGA контакта из припоя ПОС-61 для получения диаграмм накопления акустических сигналов от развивающихся дефектов в процессе деформирования контакта, определения точности метода, параметров модели накопления повреждений и момента зарождения дефектов в процессе механического воздействия. На основании анализа результатов проведенных экспериментов построен (рисунок 2.1) график накопления акустических импульсов, возникающих при развитии дефектов, в зависимости от деформаций образца.

Представленная на рисунке 2.1 экспериментальная кривая с погрешностью не более 3% аппроксимируется соотношением:

$$N(x) = A1 * (\text{th}(A2(x - x0)) + 1), \quad x = \varepsilon^{1/2},$$

где N – количество импульсов акустических сигналов, ε – деформация, $A1$, $A2$, $x0$ – параметры модели, th – функция гиперболического тангенса.



Экспериментальные данные – 1, аппроксимирующие кривые – 2.

Рисунок 2.1 – Накопление АЭ импульсов в зависимости от деформации $\varepsilon^{1/2}$ для образцов припоя в виде лопаток (слева) и проволоки (справа)

Таким образом, использование метода акустической эмиссии дает корректные результаты обнаружения роста дефекта (как конкретного события, так и зависимость количества импульсов от времени) вплоть до момента разрушения образца.

В третьей главе детально описываются методика проведения экспериментальных исследований, используемое при экспериментах оборудование, порядок и цели проведения экспериментов, определяемые параметры.

При проведении экспериментальных исследований для определения механических характеристик и параметров математических моделей использовалось следующее оборудование: универсальные испытательные стенды «Instron 8801» и «Instron 5948 MicroTester», термокамера «Instron 3119-407» для универсального испытательного стенда «Instron 8801», аппаратура АЭ «Micro II digital AE system», оптическая система измерения деформационного поля VIC 3D [CorrelatedSolutions, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://correlatedsolutions.com>]. В качестве измерительного оборудования использовались: встроенный датчик температуры термокамеры «Instron 3119-407», встроенные датчики контроля перемещения захватов испытательных стендов «Instron 8801» и «Instron 5948 MicroTester», входящие в комплект испытательных стендов внешние экстензометры (датчики деформаций) «Instron 2620-603», измерительная линейка, штангенциркуль, микрометр.

Оптическая система VIC 3D использовалась для вычисления коэффициента Пуассона для построения диаграмм деформирования в истинных координатах. Определение истинных напряжений при высоких скоростях деформирования (для конструкционных сталей порядка 1 с^{-1}) затруднено в связи с небольшими размерами образцов (рабочая зона $12 \times 50 \text{ мм}$), оптическая же система позволила получить главные компоненты тензора деформаций для всей площади поверхности образцов.

Испытания проводились для отработки методики прогнозирования поведения исследуемых материалов, определения параметров предложенных математических моделей и материальных констант рассмотренных материалов, а так же определения влияния температуры.

Проведение испытаний осуществлялось в три этапа:

1. Одноосные испытания на растяжение, сжатие, изгиб, циклическое нагружение и испытания на ползучесть образцов из исследуемых материалов при постоянной температуре. На этом этапе определялись: *а)* прочностные характеристики испытанных материалов; *б)* характер ползучести, если есть, – ограниченная, установившаяся, либо неограниченная и параметры соответствующих ядер.

2. Испытания, в ходе которых определялась степень влияния температуры на модуль Юнга рассматриваемых материалов и определялся вид зависимости $E(T)$.

3. Испытания для определения вида и параметров кинетического уравнения модели повреждаемых материалов (функции поврежденности) с использованием аппаратуры АЭ.

На первом этапе образцы испытывались при комнатной температуре. По результатам испытаний строились графики зависимости напряжений от деформаций (для одноосных испытаний, на основании которых определялись деформационно-прочностные характеристики материала), графики зависимости напряжения (или деформации) в цикле от количества циклов (для определения параметров циклической долговечности) и графики податливости от времени (для испытаний на ползучесть).

На втором этапе экспериментальных исследований проводились испытания при различных постоянных температурах окружающей среды. По результатам серии экспериментов строился сводный график зависимостей податливости от времени при постоянной температуре, на основании которых определялся тип уравнений (линейные или нет), определялись параметры ядер ползучести, функции нелинейности (если они есть), аналитически определялись параметры ядер релаксации.

На основании сводных графиков податливостей от логарифма времени при разных температурах делался вывод о применимости температурно-временной аналогии и определялись параметры ее функции.

На третьем этапе экспериментальных исследований проводилось одноосное растяжение образцов, на которых закреплены датчики аппаратуры АЭ. Растяжение производилось с постоянной скоростью, в процессе деформирования регистрировались акустические сигналы от появляющихся и растущих дефектов. Строился сводный график зависимости количества импульсов от времени деформирования, на основании которого определялись вид и параметры функции поврежденности (кинетического уравнения модели повреждаемых материалов), учитываемой в соотношениях для приведенного времени.

Также представлена методика прогнозирования разрушения при помощи метода АЭ. Прогнозирование места разрушения происходило путем определения локации максимального количества амплитудных всплесков в рабочей зоне (рисунок 2.2). Методика проведения экспериментов заключается в следующем. Образец с прямоугольной рабочей зоной растягивался с постоянной скоростью. На границах рабочей зоны образца установлены акустические датчики. При помощи аппаратуры АЭ регистрировалось появление и местоположения акустических сигналов от образующихся и растущих дефектов, а также регистрировалось накопление этих сигналов во времени.

Для тех же материалов, кроме этого, получены результаты применения акустической эмиссии и при циклических испытаниях (рисунок 2.3). Нагружение жесткое, регулярное, изменяющееся по синусоиде, с коэффициентом асимметрии $R_\epsilon = -1$. На основе анализа этих результатов прогнозировалось место разрушения

образца задолго до самого разрушения (2/3 от общего времени эксперимента, разрушение произошло близко к центру образца – максимальные пики).

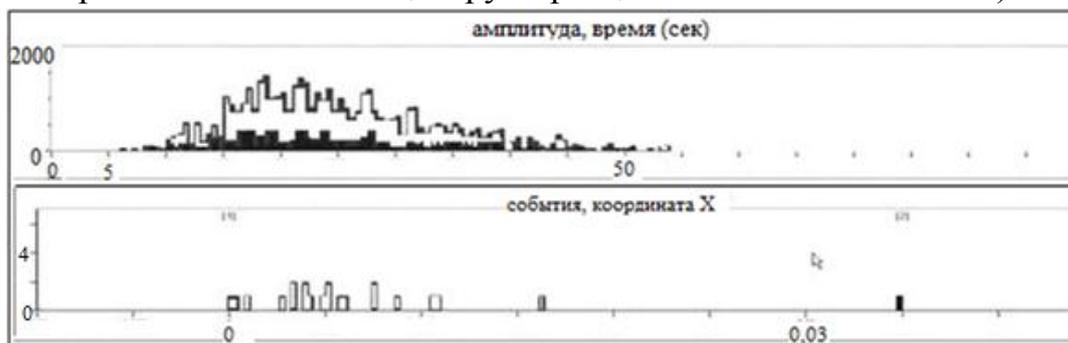


Рисунок 2.2 – Результаты, полученные методом АЭ при статическом испытании

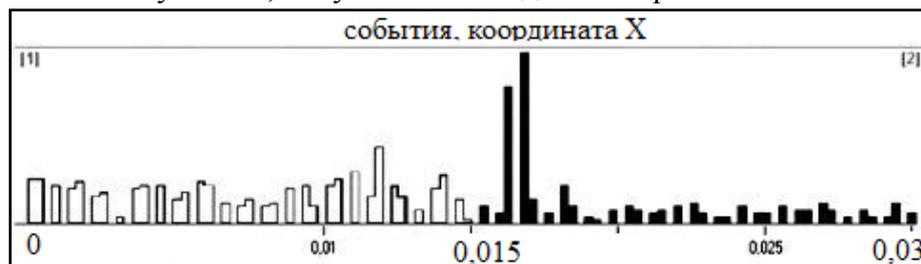


Рисунок 2.3 – Результаты работы АЭ при циклическом испытании

При известном законе изменения деформаций образца от времени ($\epsilon(t)$) для статического нагружения или известной зависимости амплитуды деформаций от времени до разрушения для циклического деформирования:

$$\Delta\epsilon = CN^{-\alpha} + C_1N^{-\beta}, \quad (2.1)$$

(где α и C – константы, определяемые экспериментально по опытам на долговечность в малоцикловой области, β и C_1 – параметры многоцикловой усталости (многоцикловая усталость – количество циклов деформирования свыше 10^5 , малоцикловая – до 10^5), N здесь – количество циклов до разрушения, связаны со временем до разрушения соотношением $N=tv$, v – частота нагружения) с помощью описанного выше соотношения становится возможным определение зависимости времени деформирования от изменения количества акустических импульсов ($t=t(N,\epsilon)$). Для определения состояния материала в текущий момент и прогнозирования оставшегося срока эксплуатации функцию поврежденности материала $\omega(t)$ и ее кинетическое уравнение взяты из монографии [Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 344 с.]:

$$\omega(t) = \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{t_0^{1+m_1}(\epsilon,N)} d\tau, \quad (2.2)$$

где t_0 – долговечность для данного материала, определяемая из экспериментов при постоянной температуре, параметр m_1 определяется из условий $\omega(t_*)=1$, где t_* – время до наступления предельного состояния (разрушения). Выбор вида функции поврежденности обоснован тем, что данное соотношение дает возможность описать поврежденность различных материалов при разных видах нагружения (для этого необходимо определить вид и параметры функции долговечности t_0 , которая может

описывать кривую долговечности при ползучести, релаксации, циклическом деформировании или же описывать закон статического деформирования).

Влияние степени накопленных повреждений в уравнениях связи напряжения и деформации для вязкоупругих материалов учитывалось с помощью введения модифицированного времени t^* , связанного с физическим временем t и вышеописанной функцией $\omega(t)$ соотношением:

$$dt^* = \frac{dt}{a_{\omega}(\omega(t))}, \quad t^* = \int_0^t \frac{d\xi}{a_{\omega}(\omega(\xi))},$$

где $a_{\omega}(\omega)$ – экспериментально определяемая функция.

В этой главе, кроме вышеуказанного приведена методика проведения экспериментов на образцах металлических сетеполотен, получаемые результаты и методика их обработки.

В четвертой главе приведены результаты практического определения материальных констант материалов, применяемые при изготовлении элементов космических аппаратов, параметров моделей механического поведения и моделей усталостной долговечности рассмотренных материалов, применяемых при описании механического поведения материалов (как при статическом, так и при циклическом нагружении), параметров вязкоупругих моделей низкотемпературных припоев (на примере припоя ПОС-61), а также определение погрешности разработанной модели накопления повреждений, применяемой для прогнозирования разрушения рассмотренных материалов.

Для одномерного случая механическое поведение вязкоупругих материалов (в частности, низкотемпературного припоя), используя теорию Больцмана–Вольтерры [Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация : учеб. пособие для ВУЗов. М., 1976. 277 с.], удобно отображать соотношениями вида:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= E_0 \left[\varepsilon(t) - \int_0^t R(t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \\ \varepsilon(t) &= \frac{1}{E_0} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau \right]. \end{aligned}$$

Ядра релаксации и ползучести задаются общими соотношениями вида:

$$R(t) = A e^{-\beta t} t^{\alpha-1}, \tag{3.а}$$

$$K(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_1^{\infty} \frac{[A \Gamma(\alpha)]^n t^{\alpha n}}{\Gamma(\alpha n)}, \tag{3.б}$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера, A , α , β – параметры ядер ползучести и релаксации. Для определения параметров ядер проведена серия экспериментов на ползучесть припоя ПОС-61 при постоянных температуре ($T=25^\circ\text{C}$) и уровнях напряжений, по результатам которой построены графики ползучести (рисунок 3.1) при разных уровнях нагрузки в виде соотношения:

$$\frac{\varepsilon(\sigma, t) - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} = \int_0^t R(t - \tau) d\tau,$$

где ε_k – деформации при заданном уровне напряжений (не зависят от времени), которые можно аппроксимировать на основе анализа результатов одноосного растяжения по формуле:

$$\varepsilon_k = \sigma/E + A_1(\sigma/E)^B.$$

параметры соотношения для ε_k следующие: $A_1 = 1,17 \cdot 10^{57}$, $B = 22,26$, E (модуль Юнга при комнатной температуре) = $16,082 \cdot 10^9$ Па.

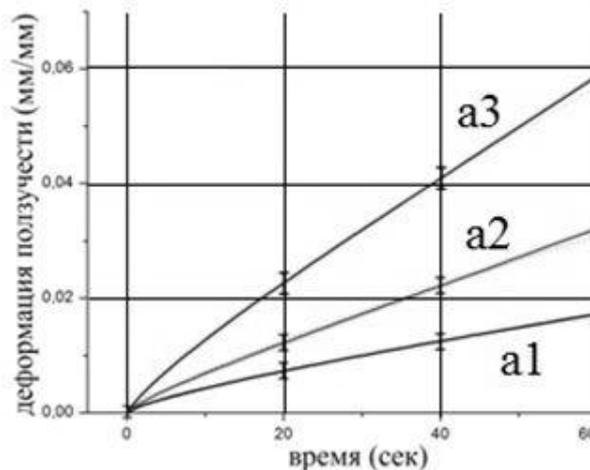
На основании проведенных исследований сделан вывод, что ядро релаксации, соответствующее данному ядру ползучести, будет в виде (3.б) с указанными параметрами, а само уравнение релаксации можно записать в виде:

$$\frac{\sigma_k - \sigma(\varepsilon, t)}{\sigma_k} = \int_0^t K(t - \tau) d\tau,$$

где σ_k – напряжения при заданном уровне деформаций, которые аппроксимируются (при $a = -6,03$, $b = -0,687 \cdot 10^{-3}$, $c = 0,353 \cdot 10^{-3}$) соотношением:

$$\sigma_k = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_{mц} \\ Ee^{a+\frac{b}{\varepsilon+c}}, & \varepsilon_{mц} < \varepsilon < \varepsilon_{\sigma} \end{cases}.$$

Здесь $\varepsilon_{mц}$ и ε_{σ} – деформации, соответствующие пределам пропорциональности и прочности соответственно. Параметры ядер вида (3.а и 3.б): $\beta = 0$, $\alpha = 0,8118$, $A = 10,1 \cdot 10^6$. Согласование представлено на рисунке 3.1, из анализа которого видно, что предложенная зависимость аппроксимирует экспериментальные данные с высокой точностью.



a1, a2, a3 – аппроксимирующие кривые для уровней напряжения 21,2 МПа, 24,76 МПа и 28,29 МПа соответственно

Рисунок 3.1 – Графики ползучести припоя ПОС-61

Для оценки зависимости модуля Юнга от температуры проведены эксперименты на образцах из припоя ПОС-61 при повышенных температурах (результаты приведены на рисунке 3.2 справа). На основании проведенных экспериментов построена зависимость модуля Юнга от температуры, которую можно представить в виде линейного соотношения:

$$E(T) = a - bT \quad (3.1).$$

Испытания низкотемпературной керамики DuPont GreenTape 951, стали 08Ю ОСВ не выявили изменения модуля Юнга при повышенной температуре (в заданном интервале температур от 20 до 180°C).

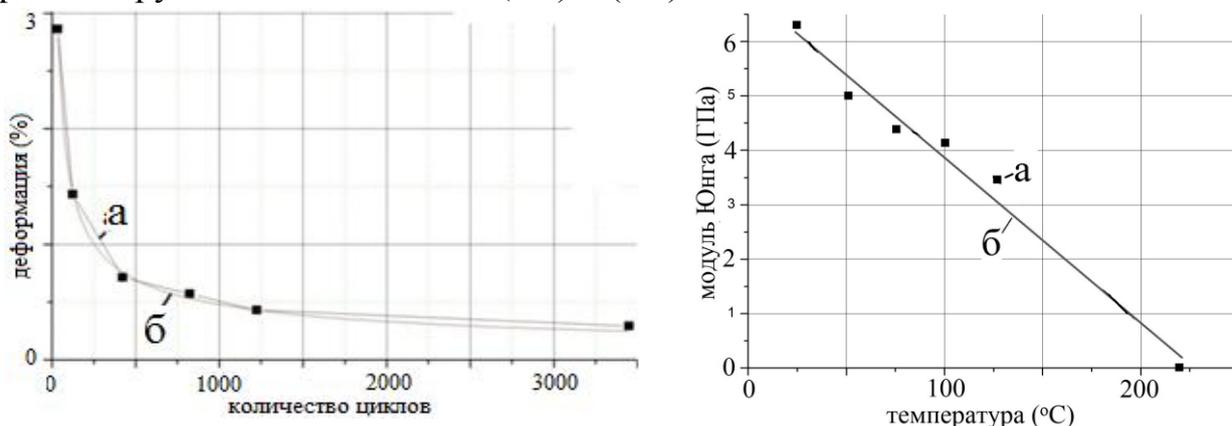
Для описания усталостной долговечности и прогнозирования времени жизни припойных соединений при циклическом нагружении в соотношении (2.1) остается

только одно слагаемое, так как упругая составляющая деформаций пренебрежимо мала по сравнению с пластической:

$$N^m \Delta\varepsilon = C_N, \quad (3.2)$$

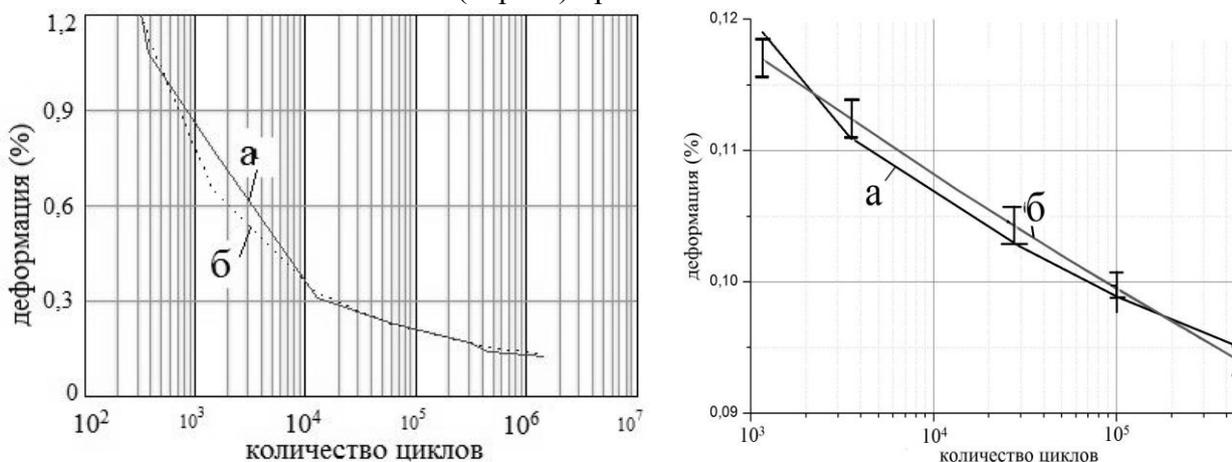
где $\Delta\varepsilon$ – размах деформаций в цикле, N – количество циклов, C_N и m – параметры модели, определенные на основании проведенных экспериментов на циклическое деформирование. В общем случае параметр C_N зависит от температуры ($C_N = C_N(T)$), вид этой зависимости подбирается таким образом, чтобы параметр m от температуры не зависел.

Для керамических материалов аналогичным образом остается только слагаемое, отвечающее за упругую составляющую деформаций, так как для данных материалов пластические деформации пренебрежимо малы. Для металлов же в уравнении (2.1) нельзя пренебрегать ни одним из слагаемых соотношения. Кривая усталостной долговечности для припоя и согласование с (3.2) представлены на рисунке 3.2. На рисунке 3.3 представлены кривые усталостной долговечности для стали 08Ю ОСВ и для керамики с низкой температурой обжига DuPont GreenTape 951 и аппроксимирующие соотношения (2.1) и (3.2) соответственно.



Экспериментальные данные – (а), аппроксимирующие соотношения – (б)

Рисунок 3.2 – Кривая долговечности (слева) и зависимость модуля Юнга от температуры (справа) припоя ПОС-61



Экспериментальные данные – (а), аппроксимирующие соотношения – (б)

Рисунок 3.3 – Кривая долговечности стали 08Ю ОСВ (слева) и НТК (справа)

Из анализа рисунков 3.2 и 3.3 видно, что использованные соотношения аппроксимируют экспериментальные кривые с высокой точностью, что позволяет использовать их для дальнейшего применения в среде численного моделирования.

В нашем случае, принимая во внимание соотношение для определения долговечности (3.2), вид функции повреждаемости (2.2) для припоя преобразуется к следующей форме:

$$\omega(t) = v^{1+m_1} \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{(C_N(T)\Delta\varepsilon^{-m})^{1+m_1}} d\tau, \quad (3.3)$$

где $\Delta\varepsilon$ – размах деформаций, не зависящий от времени, v – частота нагружения.

Приняв в соотношении (3.3) $C_N(T) = C_1 * E(T)$ и определив C_1 при $E(T=25^\circ\text{C})$, после интегрирования получим (для припоя ПОС-61) аналитическую зависимость поврежденности материала от времени и при заданной температуре (T), отличной от начальной:

$$\omega(t) = \left[\frac{v}{C_1(a-bT)} \right]^{1/m} \Delta\varepsilon t^{1/m} \quad (3.4)$$

Одноосные испытания низкотемпературной керамики показали практическое отсутствие пластических деформаций, то есть материал деформируется по линейному закону (закону Гука). В результате вышесказанного для описания поведения керамики при циклических воздействиях и определения функции повреждаемости данного материала необходимо в уравнении (3.3а) определить неизвестные параметры при $\omega(t) = 1$ и $C_N(T) = const$ (определены из испытаний на долговечность при постоянной амплитуде деформаций). Итоговое соотношение керамики DuPont GreenTape 951 будет вида:

$$\omega(t) = \frac{vt}{C\Delta\varepsilon^{-m}}.$$

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что в диапазоне от -30°C до $+150^\circ\text{C}$ температура не оказывает заметного влияния на свойства сталей, поэтому соответствующая функция повреждаемости для стали будет отображаться уравнением (2.1), для которого (при известном соотношении для параметров цикла $N=tv$, где N – количество циклов, t – время, v - частота) функция $t_0(\varepsilon, T)$ при $T=const$ из соотношения (2.2) представлена в виде:

$$t_0(\varepsilon) = \left[\frac{\Delta\varepsilon - C_1(tv)^{-\beta}}{Cv^{-\alpha}} \right]^{-\frac{1}{\alpha}}.$$

Тогда итоговое соотношение для функции повреждаемости для стали будет:

$$\omega(t) = (Cv)^{\frac{1+m_1}{-\alpha}} \int_0^t \frac{(1+m_1)(t-\tau)^{m_1}}{(\Delta\varepsilon - C_1(\tau v)^{-\beta})^{1+m_1}} d\tau.$$

В данном соотношении неизвестный параметр m_1 , также как и ранее, определяется из условия $\omega(t_*) = 1$, где t_* - время наступления предельного состояния.

Параметры моделей долговечности для рассмотренных материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделей усталостной долговечности рассмотренных материалов

Параметр	Сталь 08Ю ОСВ	НТК DuPont GreenTape 951	Припой ПОС-61	Углепластик М60J-EX1515
Коэффициент усталостной пластичности, C	0,213	–	18,92	2760
Экспонента усталостной пластичности, α	0,545	–	0,53	1
Коэффициент усталостной прочности, C_1	$5,287 \cdot 10^{-3}$	$1,514 \cdot 10^{-3}$	–	–
Экспонента усталостной прочности, β	0,103	0,037	–	–

Для определения механических свойств углепластика, изготовленного из препрега М60J и цианат-эфирного связующего EX1515, проведены испытания на растяжение при отличающихся на два порядка скоростях деформирования для определения предельных характеристик исследуемого материала и выявления влияния скорости нагружения на данные характеристики. Кроме того, проведены испытания тонких пластин из данного углепластика на изгиб для определения предельных характеристик и испытания брусков прямоугольного сечения при разных температурах для выявления влияния температуры на модуль Юнга материала.

Испытания на растяжение при скоростях деформирования (от $0,001\text{с}^{-1}$ до $0,1\text{с}^{-1}$) не показали существенного влияния скорости нагружения, как на деформационно-прочностные характеристики углепластика, так и на вид диаграммы деформирования. Прочностные характеристики углепластика на изгиб и растяжение близки по значениям между собой, что свидетельствует о достоверности полученных данных. Испытания на сжатие не проводились, так как данный материал плохо работает при сжимающих усилиях. Так же для углепластика проведены испытания на ползучесть при нагрузках, близких пределу прочности (до $0,9 \sigma_B$). По результатам экспериментов установлена ползучесть в пределах 1%, что можно отнести к погрешности испытаний.

Для оценки влияния температуры на модуль Юнга углепластика проведены испытания на изгиб при повышенных температурах. Результаты испытаний представлены на рисунке 3.4а.

Как видно из анализа рисунка 3.4а экспериментальные данные хорошо аппроксимируются параболической зависимостью:

$$E(T) = A + BT + CT^2.$$

где $E(T)$ – модуль Юнга материала в ГПа; A , B и C – параметры (равны 77,6913; 0,1502 и $-0,0031$ соответственно). Полученные экспериментальные нашли подтверждение в литературе [Парейшис Й.П., Даргужис С.А. Усталостная прочность некоторых материалов, применяемых в конструкции планера. Механика композитных материалов. Рига, Из-во Зинатне. № 3, 1980, с.451 – 455.; Суворова Ю.В., Викторова И.В., Машинская Г.П. Длительная прочность и разрушение органопластиков. Механика композитных материалов. Рига, Из-во Зинатне. № 6, 1980, с.1010 – 1013.].

На основании проведенных циклических экспериментов (отрезок АВ на рисунке 3.4б) и их согласование с данными (отрезок CD на рисунке 3.4б), полученными из [Парейшис Й.П., Даргужис С.А. Усталостная прочность некоторых материалов, применяемых в конструкции планера.] сделан вывод, что для моделирования процессов деформирования и усталостной прочности углепластиков также применима модель типа (3.2), в которой число циклов до наступления предельного состояния связывается с падением модуля Юнга за цикл. Выражение для описания усталостной долговечности углепластиков в логарифмических координатах записывается следующим образом:

$$\lg\left(\frac{\Delta E}{N}\right) = a - b \lg N_*, \text{ откуда следует: } N_* = A \left(\frac{\Delta E}{N}\right)^{-c},$$

где N_* – количество циклов до разрушения; $\Delta E/N$ – изменение модуля Юнга за цикл; параметры математических соотношений: $a=7,1$; $b=1,1$; $A=2760$; $c=1$. Предел длительной прочности углепластика (σ_{-1}) на базе 10^6 циклов равен 240 МПа.

Следовательно, для данного материала можно прогнозировать выносливость по результатам кратковременных испытаний на усталость с определением изменения жесткости за один цикл с помощью приведенного выражения.

Приняв в соотношении (3.3) $A=C_N(T)=C_1 \cdot E(T)$ и определив C_1 при $E(T=25^\circ\text{C})$, после интегрирования получим (для углепластика) аналитическую зависимость поврежденности материала от времени и при заданной температуре (T), отличной от начальной:

$$\omega(t) = \left[\frac{\nu}{C_1(A+BT+CT^2)} \right]^{1/m} \frac{\Delta E}{N} t^{1/m}.$$

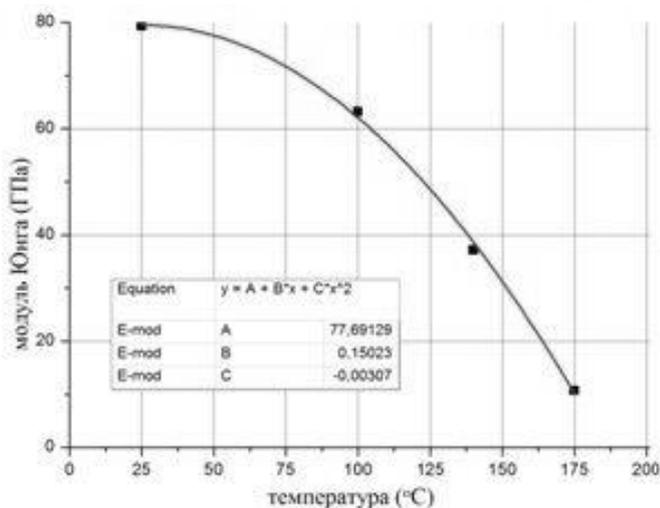
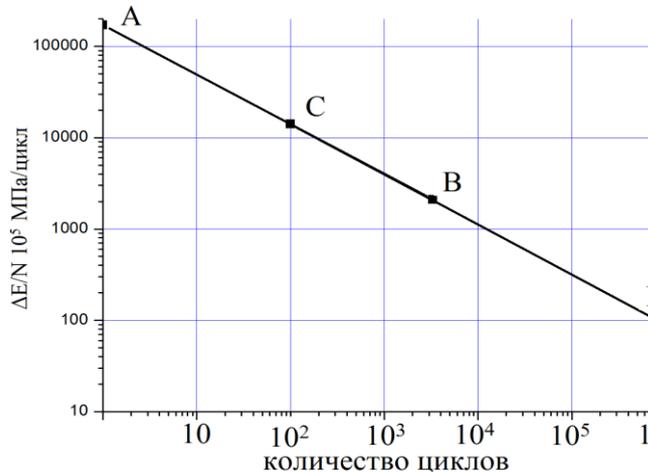


Рисунок 3.4а – Зависимость модуля Юнга углепластика от температуры (аппроксимация параболой)



Результаты экспериментов – АВ; данные из литературы – CD
Рисунок 3.4б – Усталостная кривая углепластика

В параграфе 6 главы 4 представлена детальная оценка погрешности модели накопления повреждений для низкотемпературных припоев (на примере ПОС-61). Для остальных исследованных материалов порядок определения параметров модели аналогичен.

На основании анализа результатов достаточного количества проведенных экспериментов (не менее 4 экспериментальных образцов для каждого испытания, выбиралось среднее арифметическое значение величины для обеспечения статистической достоверности) заявленная модель повреждаемого материала обеспечивает адекватность описания механического поведения объектов моделирования, а на основании точности аппроксимации экспериментальных данных способна отражать поведение материалов с погрешностью, не превышающей 3%.

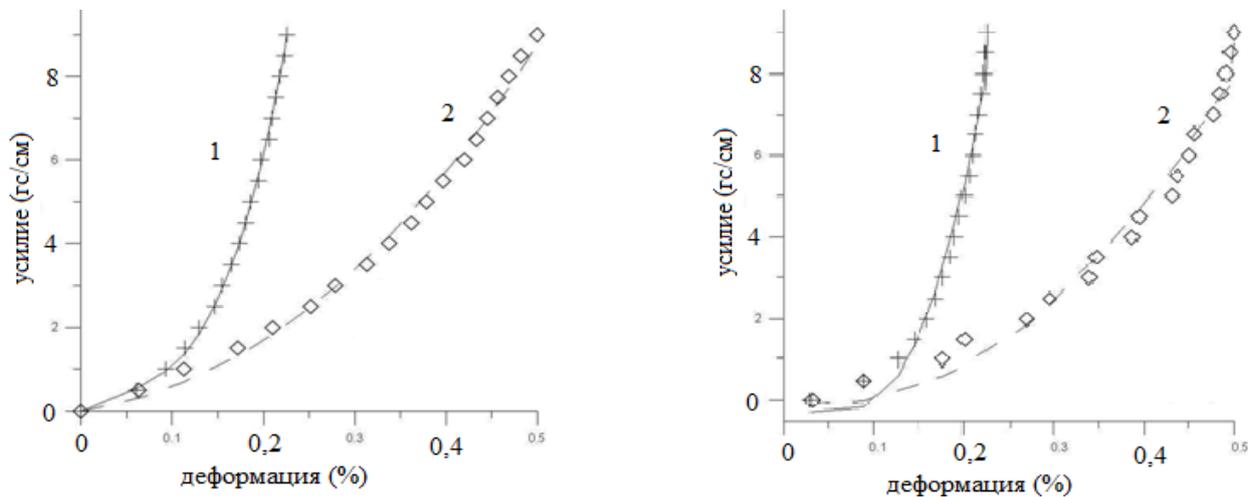
Предложенный метод прогнозирования срока эксплуатации и оставшегося ресурса жизни объекта исследования заключается в следующем: готовое изделие (ЭМ КА с длительным сроком активного существования), предварительно закрепив на нем датчики АЭ, подвергают тестовому нагружению (определенное количество циклов с амплитудой, не превышающей расчетные эксплуатационные нагрузки), в течении которого снимают акустические данные. Соотнеся зарегистрированное количество акустических импульсов за определенное количество тестовых циклов при заданном размахе деформаций, мы определим точку на диаграмме, приведенной на рисунке 2.1. Погрешность определения данной точки складывается из погрешности нагружающего устройства (не более 5% по деформациям, что следует из характеристик самого устройства), погрешности регистрации акустических сигналов (не более 1%, что следует из характеристик метода АЭ) и погрешности аппроксимации (менее 3%, следует из погрешности аппроксимации экспериментальных данных). Таким образом, общая погрешность суммарная погрешность прогнозирования степени поврежденности объекта моделирования и, как следствие, погрешность прогнозирования оставшегося ресурса жизни не превышает 9%.

В параграфе 7 данной главы представлены экспериментальные результаты деформирования металлических сетеполотен и согласование разработанной модели механического поведения с экспериментальными данными. Общий вид математической модели деформирования сетеполотна с учетом контактного взаимодействия структурных элементов материала (согласование с экспериментальными данными представлено на рисунке 3.5):

$$T_1 = E_1 \frac{(\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2)}{1 - \nu^2} \varepsilon_1^{\beta_1} \pm A_1 \varepsilon_1 e^{-B_1 \varepsilon_1}$$

$$T_2 = E_2 \frac{(\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1)}{1 - \nu^2} \varepsilon_2^{\beta_2} \pm A_2 \varepsilon_2 e^{-B_2 \varepsilon_2},$$

где T_i и ε_i ($i=1,2$) – усилия и деформации в соответствующих направлениях, $E_1, E_2, \beta_1, \beta_2$ – константы, определяемые из одноосного растяжения, параметры $A_{1/2}, B_{1/2}$ определим из одноосных испытаний материала, знак «+» при нагружении, «-» при разгрузении, так как контактное взаимодействие структурных элементов материала – аналог внутреннего трения – препятствует изменению деформаций, либо этот знак учитывается в коэффициентах $A_{1/2}$.



1 – для жесткого направления ортотропии, 2 – для мягкого

Рисунок 3.5 – Согласование разработанной модели с экспериментальными результатами для сетеполотна при нагружении (слева) и разгрузении (справа)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению актуальной задачи по моделированию механического поведения следующих материалов, используемых в современной ракетно-космической технике: высокоплотной керамики на основе оксида алюминия, композитных материалов на основе углеродных волокон и цианатэфирного связующего, металлических сетеполотен, низкотемпературных припоев системы свинец–олово, конструкционных сталей.

1. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований показана применимость модели Коффина-Мэнсона (степенной закон усталостной долговечности) для описания механического поведения при циклическом нагружении с частотой до 30 Гц материалов, применяемых при изготовлении элементов космических аппаратов (а именно: низкотемпературных припоев системы свинец–олово, конструкционных сталей, высокоплотной керамики на основе оксида алюминия и композитных материалов на основе углеродных волокон и цианатэфирного связующего), в температурном диапазоне от 20°C до 180°C.

2. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований показана возможность описания механического поведения низкотемпературных припоев в диапазоне гомологических температур T/T_m от 0,1 до 0,9 при помощи модели механического поведения вязкоупругого повреждаемого материала с использованием ядер М.А. Колтунова.

3. На основании анализа результатов экспериментальных исследований, показавших необходимость учета поврежденности рассмотренных материалов в указанном диапазоне температур, для оценки ресурса эксплуатации изделий из рассмотренных материалов в модели повреждаемых материалов разработаны кинетические уравнения, построенные на основе данных, полученных как классическими методами исследований, так и методом акустической эмиссии.

4. Разработан и реализован алгоритм определения материальных констант и параметров предложенных моделей. Эксперименты при реализации этих алгоритмов проведены с использованием современных методов исследования, достоверность полученных результатов подтверждается достаточным количеством экспериментов, использованием оборудования, аттестованного метрологическими службами, согласованием, в частных случаях, полученных результатов с результатами теоретических и экспериментальных результатов других авторов.

5. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработана модель механического поведения металлического сетеполотна, учитывающая контактное взаимодействие структурных элементов материала. Эта модель позволяет учесть особенности механического поведения ортотропных сетеполотен при различных путях нагружения изделий из данного материала.

6. Получены новые экспериментальные результаты: циклического деформирования низкотемпературных припоев системы олово-свинец и композитных материалов на основе углеродных волокон и цианат-эфирного связующего в малоцикловой области; циклического деформирования конструкционных сталей и высокоплотных керамик на основе оксида алюминия в мало и многоцикловых областях; одноосного растяжения указанных припоев и композитных материалов в интервале гомологических температур T/T_m от 0,1 до 0,9; статического одноосного и двухосного растяжения металлических сетеполотен.

Таким образом, описанная в диссертации модель длительного разрушения дает возможность, исходя из характеристик, полученных в результате кратковременных испытаний, описать разрушение как процесс при различных режимах нагружения и исследовать зависимость прочности и предельных деформаций от времени до разрушения.

В диссертации разработан алгоритм, предназначенный для определения деформационно-прочностных характеристик, параметров модели механического поведения при статическом и циклическом деформировании и параметров кинетического уравнения модели повреждаемых материалов с использованием, как классических методов исследования, так и метода АЭ.

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. / Том. политех. ун-т. – 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. / Том. политех. ун-т. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2013. – С. 50 – 52. – 0,18 / 0,06 п.л.

Подписано в печать 25.11.2013 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 27/11-13
Отпечатано в ООО «Позитив–НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а