

На правах рукописи

Терехин Александр Васильевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ЭЛАСТОМЕРНЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и  
аппаратуры

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации Акционерном обществе «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» имени А.Г.Ромашина» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт машиноведения имени А.А.Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Думанский Александр Митрофанович,**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Дудченко Александр Александрович,**  
профессор ФГБОУ ВПО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)» (МАИ),  
  
доктор технических наук,  
**Зезин Юрий Павлович,**  
ведущий научный сотрудник Научно-  
исследовательского института механики  
МГУ им. М.В. Ломоносова, лаборатория  
ползучести и длительной прочности

Ведущая организация: ФГБУН «Институт прикладной механики»  
Российской академии наук (ИПРИМ  
РАН), 125040, Москва, Ленинградский  
проспект, дом 7

Защита состоится «15» июня 2016г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



А.Ю. Карпачев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Клеевые соединения на основе эластомерных адгезионных материалов широко используются во многих отраслях современной промышленности благодаря ряду преимуществ по отношению к другим способам соединения, обусловленному специфическими физико-механическими характеристиками эластомеров. В частности, в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники эластомерные клеевые соединения (ЭКС) зачастую являются единственно возможным способом обеспечения надежного и герметичного соединения хрупких неметаллических элементов конструкции (керамических или композиционных) с металлическим корпусом летательного аппарата (ЛА).

Использование ЭКС в конструкциях современных высокоскоростных ЛА приводит к его эксплуатации в экстремальных условиях комплексных теплосиловых нагрузок, при которых эластомерный адгезив проявляет характерные реологические свойства (ползучесть, релаксация напряжений, временная зависимость прочности и т.д.). Однако применяемые в настоящее время методы оценки работоспособности ЭКС зачастую не позволяют в полной мере учесть особенности механического поведения эластомерных адгезивов, а используемые при этом технические испытательные средства, как правило, не дают возможности учитывать специфику эксплуатации ЭКС в конструкциях высокоскоростного ЛА. Эти обстоятельства приводят к появлению ошибок в результатах оценки работоспособности ЭКС при наземной лабораторно-стендовой отработке высокоответственных конструкций ЛА авиационной и ракетно-космической техники.

В сложившихся условиях для обеспечения гарантированных требований к надежности и безотказности конструкций ЛА, включающих ЭКС, требуется актуализация существующих и разработка новых методов оценки работоспособности ЭКС, а также совершенствование применяемых для оценки технических испытательных средств, что обуславливает актуальность диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов и совершенствование технических испытательных средств оценки работоспособности ЭКС для повышения надежности и достоверности результатов наземной лабораторно-стендовой отработки конструкций ЛА.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработать методы оценки работоспособности ЭКС конструкций ЛА, подвергающихся экстремальным продолжительным теплосиловым воздействиям, с учетом свойств механического поведения эластомерных материалов.

2. Разработать новые и усовершенствовать существующие технические испытательные средства, позволяющие проводить оценку работоспособности

ЭКС в условиях, приближенных к эксплуатационным (при продолжительном теплосиловом и комплексном термовибрационном воздействиях).

3. Выполнить экспериментальную проверку предложенных методов оценки работоспособности ЭКС при повышенных температурах (до 340 °С) на образцах конкретного клеевого соединения, использующегося в реальных конструкциях ЛА.

4. Разработать и провести экспериментальную отработку методики определения долговечности ЭКС конструкции ЛА в условиях статического теплосилового воздействия.

5. Провести апробацию разработанных методов и технических средств оценки работоспособности ЭКС на реальных конструкциях летательных аппаратов.

**Методология и методы исследования** оценки работоспособности ЭКС включают расчетные и экспериментальные методы анализа механических свойств эластомерных материалов и клеевых соединений на их основе. Предлагаемые методы и подходы основаны на положениях механики деформируемого твердого тела, включая нелинейную теорию упругости, теорию ползучести, элементы теории вязкоупругости и общей теории прочности и надежности машин, а также на методах планирования научного эксперимента.

**Научная новизна** работы заключается в обосновании предложенных методов оценки работоспособности ЭКС конструкций летательных аппаратов, а также:

1. Разработке метода и получении критериальных соотношений для прогнозирования долговечности ЭКС в условиях продолжительного теплосилового воздействия.

2. Разработке математической модели деформирования ЭКС с учетом ползучести эластомерного адгезива, эксплуатируемого в условиях продолжительного теплосилового воздействия.

3. Разработке и создании оригинальных испытательных средств и их научно-методического обеспечения для оценки работоспособности ЭКС при наземной лабораторно-стендовой отработке конструкций ЛА.

4. Планировании, проведении и получении экспериментальных данных о работоспособности ЭКС на основе кремнийорганического герметика ВИКСИНТ У-2-28 в условиях продолжительного нагружения при повышенных температурах (свыше 250 °С).

**Достоверность** полученных в работе результатов подтверждается строгим математическим обоснованием полученных аналитических соотношений, непротиворечивостью принятых положений, а также сопоставлением расчетных значений с экспериментальными, полученными для большого количества образцов и реальных конструкций ЛА.

**Практическую значимость** работы обосновывают:

1. Разработанная методика и критерий оценки долговечности ЭКС конструкций ЛА при продолжительном статическом теплосиловом воздействии.

2. Разработанный индукционный способ теплового нагружения элементов конструкций ЛА и разработанная методика оценки параметров индукционного нагревателя.

3. Оригинальные результаты комплексных экспериментальных исследований работоспособности ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28 в условиях кратковременного и продолжительного теплосилового воздействия.

4. Результаты экспериментальной отработки разработанного научно-методического обеспечения для созданных технических испытательных средств оценки работоспособности ЭКС конструкций ЛА.

5. Разработанные способы демонтажа узлов ЭКС конструкций ЛА, позволяющие предотвратить повреждения дорогостоящих деталей в процессе разборки.

Результаты работы внедрены и использованы в ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина», а также в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Разработанные методы оценки работоспособности ЭКС, эксплуатирующихся в условиях продолжительного теплосилового воздействия, с учетом свойств механического поведения эластомерных материалов.

2. Созданные технические испытательные средства и научно-методическое обеспечение для лабораторно-стендовой оценки работоспособности ЭКС конструкций ЛА в условиях, приближенных к эксплуатационным.

3. Методики проведения и анализ результатов экспериментальных исследований работоспособности ЭКС конструкций ЛА в условиях продолжительных статических теплосиловых и комплексных термовибрационных воздействий.

4. Методику определения и критериальные соотношения для прогнозирования долговечности ЭКС в условиях продолжительного статического теплосилового воздействия.

5. Оригинальные результаты апробации и экспериментальной отработки разработанных методов и технических средств оценки работоспособности ЭКС на реальных конструкциях ЛА.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждались на IV Международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» (Москва, 2013), XIX и XX Международных научно-технических конференциях «Конструкции и технологии неметаллических материалов» (Обнинск, 2010, 2013), Международной научной конференции «Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел - научное наследие Ю.Н. Работнова» (Москва, 2014), II Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (Москва, 2014), Международной конференции «Деформирование и разрушение

композиционных материалов и конструкций» (Москва, 2014), Научной конференции «Материалы и технологии герметизации» (Москва, ВИАМ, 2015), а также на научном семинаре кафедры теории пластичности механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, 2016), научных семинарах МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2015, 2016), ученых и научно-технических советах ГНЦ РФ ОА «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина» (Обнинск, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 работы в журналах, рекомендуемых ВАК РФ общим объемом 3,8125 п.л./2,24 п.л., получены 2 патента на изобретение.

#### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 212 страниц, включающие 71 рисунок и 11 таблиц. Список литературы содержит 181 наименование.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена краткая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, определен объект и предмет исследования, обоснована научная новизна работы и ее практическая значимость.

**В первой главе** приведены результаты выполненного литературного обзора отечественных и зарубежных работ, а также патентного поиска по тематике исследования. Рассмотрены особенности физического строения и механического поведения эластомерных материалов. На основании работ Л.Трелоара, В.В.Новожилова, Г.М.Бартенева, Р.С.Ривлина, А.Грина, Дж.Адкинса, К.Ф.Черных, А.А.Адамова, Ю.А.Гамлицкого, В.А.Левина, А.А.Аскадского, Ю.П.Зезина, В.И.Дырды, R.Lin, H.Xiao и других, определены методы расчета и прогнозирования деформирования и разрушения эластомеров.

Приведено описание основных типов, конструкционных схем и режимов эксплуатации клеевых соединений на основе эластомерных адгезивов, применяемых в конструкциях ЛА авиационной и ракетно-космической техники. Выполнен обзор методов и технических испытательных средств, использующихся при оценке работоспособности клеевых соединений конструкций ЛА. Вопросам, связанным с анализом конструкционных особенностей эластомерных клеевых соединений, областью применения, методами расчета и оценки их работоспособности, посвящены работы А.А.Берлина, И.А.Новакова, А.В.Поциуса, Г.В.Малышевой, А.П.Петровой, Ж.-Ж. Вильнава, Н.К.Ивченко, Н.И.Бауровой и других. В области существующих методов и технических испытательных средств оценки работоспособности эластомерных клеевых соединений конструкций ЛА необходимо отметить научные труды М.Ю.Русина, Ю.В.Липовцева,

Е.И.Суздальцева, Г.В.Малышевой, Н.И.Бауровой, А.А.Дудченко, О.В.Татарникова, В.И.Неповинных, В.С.Райляна и других.

Проведенный обзор и анализ публикаций показал, что, несмотря на разнообразие имеющихся стандартизированных методов оценки работоспособности клеевых соединений конструкции ЛА и используемых для их реализации технических испытательных средств, некоторые вопросы, связанные с прогнозированием работоспособности эластомерных клеевых соединений конструкций ЛА, остаются недостаточно исследованными. Существующие методы не позволяют в полной мере учесть релаксационные свойства механического поведения эластомерных адгезивов, особенно ярко проявляющиеся при жестких и продолжительных эксплуатационных режимах теплосиловых нагрузок, характерных современным высокоскоростным ЛА. В главе обозначены основные проблемы, решение которых позволит более достоверно прогнозировать надежность и безотказность узлов эластомерных клеевых соединений конструкций высокоскоростных ЛА при их наземной лабораторно-стендовой отработке.

**Во второй главе** приводятся основные соотношения, используемые и полученные в работе для оценки работоспособности эластомерных клеевых соединений конструкций ЛА.

Для прогнозирования потери работоспособности ЭКС, возникающей по причине развития предельных деформации клеевого соединения вследствие высокоэластичности эластомерного адгезива, использовался метод анализа упругой энергии деформации эластомера с помощью плотности энергии деформации или упругого потенциала как функции от инвариантов тензора деформации:  $W(I_1, I_2, I_3)$ . В качестве упругого потенциала  $W$  использовались однопараметрический потенциал Трелоара и двухпараметрический потенциал Муни-Ривлина соответственно:

$$W = \frac{1}{2} \mu (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3); \quad W = \frac{\mu_1}{2} (I_1 - 3) + \frac{\mu_2}{2} (I_2 - 3), \quad (1)$$

где  $\lambda_i = (\varepsilon_i + 1)$ ,  $\varepsilon_i$  - относительная деформация,  $\mu$ ,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - параметры материала.

Определяющие соотношения, для одноосного растяжения усилием  $N$  эластомерного образца с площадью поперечного сечения  $S$  в исходном состоянии для двух используемых упругих потенциалов имеют следующий вид соответственно:

$$N = S \mu \left( \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right); \quad N = S \left( \lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) + \left( \mu_1 - \frac{\mu_2}{\lambda_1} \right). \quad (2)$$

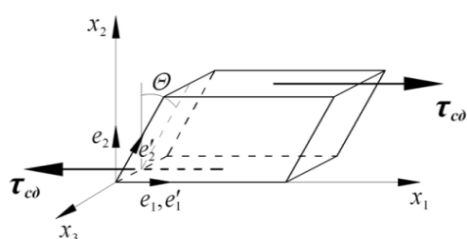


Рис. 1. Деформация эластомерного адгезива при простом сдвиге

Для анализа деформации сдвига использовалась упрощенная схема простого сдвига, на практике реализуемая путем смещения одной из параллельных плоскостей субстрата клеевого соединения относительно другого на величину, пропорциональную толщине клеевого слоя (Рис. 1).



Компоненты тензора напряжения при простом сдвиге определяются согласно следующему соотношению:

$$T = -p \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \begin{pmatrix} 1+k^2 & k & 0 \\ k & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \begin{pmatrix} 1 & -k & 0 \\ -k & 1+k^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $k = \operatorname{tg} \theta$  – угол сдвига (Рис.1).

Соотношение (3) позволяет построить зависимости касательного напряжения  $\tau_{cd}$  от величины сдвига  $k$  для упругих потенциалов Трелоара и Муни-Ривлина соответственно:

$$\tau_{cd} = \mu \cdot k; \quad \tau_{cd} = (\mu_1 + \mu_2) \cdot k. \quad (4)$$

Для прогнозирования потери работоспособности ЭКС, возникающей по причине достижения предельного значения деформации клеевого соединения вследствие ползучести эластомерного адгезива, использовалась наследственная теория и соотношение Больцмана-Вольтерра. При этом процесс ползучести эластомерного адгезива представлен в виде непрерывной во времени последовательности состояний  $\Psi^0, \dots, \Psi', \dots, \Psi'', \dots, \Psi^\tau, \dots$  (Рис. 2), где  $\Psi^0$  – начальное состояние адгезива, соответствующее моменту приложения сдвиговой нагрузки  $\tau_{cd}$  ( $t = t_0$ ),  $\Psi'$  – состояние адгезива на момент окончания приложения сдвиговой нагрузки  $\tau_{cd}$  ( $t = t_p$ ),  $\Psi''$  – состояние адгезива в промежуточный момент времени развития ползучести ( $t = t_n$ ),  $\Psi^\tau$  – состояние адгезива в момент определения деформации ползучести ( $t = \tau$ ).

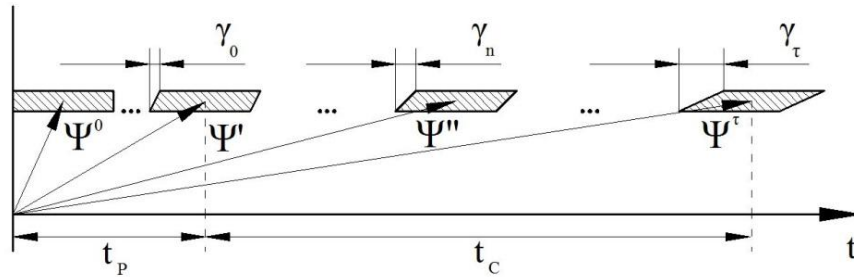


Рис. 2. Схема состояний эластомерного адгезива в процессе ползучести

Сдвиговая деформация ползучести эластомерного адгезива описывается соотношением:

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \int_0^{t_p} \varphi(t_p + t_c - \tau) \tau_{cd}(\tau) d\tau + \int_{t_p}^{t_c} \varphi(t_p + t_c - \tau) \tau_{cd} d\tau, \quad (5)$$

где  $\gamma_0$  – начальная деформация сдвига,  $\varphi(t - \tau)$  – функция памяти или ядро интегрального уравнения,  $t_c$  – время с момента окончания приложения сдвиговой нагрузки до текущего момента.

Для аппроксимации экспериментальных кривых ползучести в качестве ядра  $\varphi(t - \tau)$  интегрального уравнения (5) использовалось ядро Бронского, при этом ползучесть эластомерного адгезива при сдвиге (при условии  $t_p \ll t_c$ ) описывается соотношением:



$$\gamma(t) = \gamma_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right)^m \right] + \frac{\tau_{cd}}{\eta} t, \quad (6)$$

где  $m$ ,  $\eta$  и  $\theta$  – параметры материала.

Описание ползучести эластомерного адгезива позволяет прогнозировать работоспособность ЭКС до момента наступления третьей стадии ползучести и разрушения адгезива. Однако для прогнозирования разрушения ЭКС во времени необходимо установление зависимости долговечности ЭКС от параметров теплосилового воздействия. Для этого использовалось степенное соотношение вида:

$$t_* = C(T) \tau_{cd}^{-\alpha(T)}, \quad (7)$$

где  $\tau_{cd}$  – величина напряжения сдвига;  $C(T)$  и  $\alpha(T)$  – параметры материала, зависящие от температуры  $T$ .

Параметры  $C$  и  $\alpha$  для каждого значения температуры  $T$  определяются по экспериментальным данным с помощью системы уравнений:

$$(A) \cdot \{X\} = \{b\}, \quad (8)$$

где

$$(A) = \begin{Bmatrix} 1 & -\lg \tau_{cd1} \\ 1 & -\lg \tau_{cd1} \\ 1 & \dots \\ 1 & -\lg \tau_{cdi} \end{Bmatrix}, \quad \{b\} = \begin{Bmatrix} \lg t_{*1} \\ \lg t_{*2} \\ \dots \\ \lg t_{*i} \end{Bmatrix}, \quad \{X\} = \begin{Bmatrix} \lg C \\ \alpha \end{Bmatrix}.$$

Для этого вектор-столбец неизвестных параметров  $\{X\}$  определяется методом минимизации квадратичной невязки расчетных и экспериментальных данных с помощью псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза  $(A)^+ = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A)^T$ :

$$\{X\} = (A)^+ \cdot \{b\}. \quad (9)$$

Для построения обобщенной модели долговечности ЭКС используется принцип температурно-временной аналогии (ТВА), основанный на суперпозиции релаксационных свойств полимерных материалов. Обобщенная модель имеет следующий вид:

$$\lg t_* = \lg a_T + Q \lg \tau_{cd} - P, \quad (10)$$

где  $a_T$  – коэффициент температурно-временной редукции,  $Q$ ,  $P$  – параметры, определяемые методом линейной регрессии по экспериментальной обобщенной кривой долговечности.

Коэффициент  $a_T$  определяется по формуле Вильямса – Ланделла – Ферри (WLF):

$$\lg a_T = \frac{-c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}, \quad (11)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные коэффициенты,  $T_0$  – базовая температура приведения.

**Третья глава** посвящена вопросам совершенствования технических испытательных средств оценки работоспособности клеевых соединений конструкций ЛА и разработке их научно-методического обеспечения.

Приведено описание индукционного способа теплового нагружения элементов конструкций высокоскоростных ЛА, позволяющего осуществлять

локальный равномерный нагрев элемента (Патент РФ №2534362). Способ реализуется путем зонного нагрева элемента или узла 3 конструкции 2 посредством промежуточного нагревательного элемента 1, выполненного из ферромагнитного материала и расположенного на нагреваемой поверхности и нагреваемого с помощью переменного электромагнитного поля средней частоты, генерируемого индуктором 4 (Рис. 3).

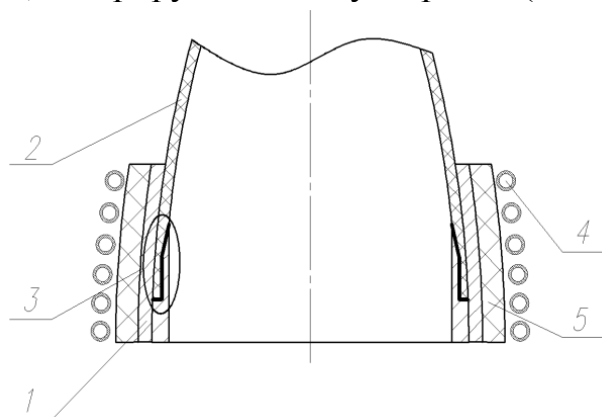
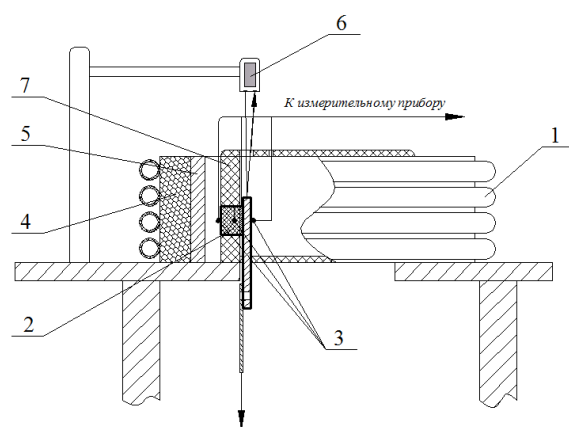


Рис. 3. Схема индукционного способа теплового нагружения элементов конструкций ЛА: 1-промежуточный нагревательный элемент; 2-конструкция ЛА; 3-узел ЭКС конструкции ЛА; 4-индуктор; 5-теплоизолятор

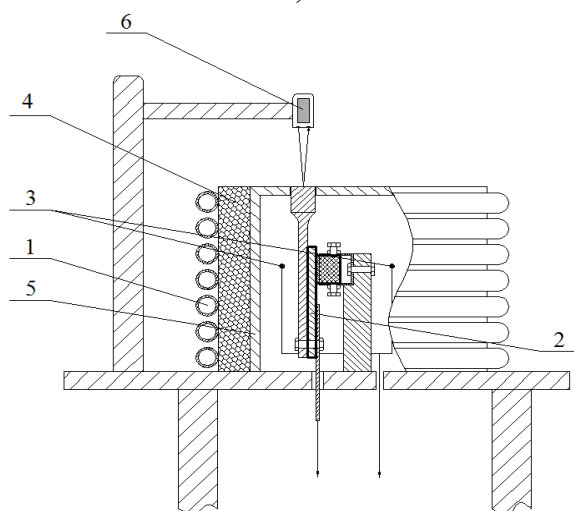
Для практической реализации предложенного способа теплового нагружения в главе приводится разработанная инженерная методика расчета параметров индукционного нагревателя, позволяющая на этапе проектирования нагревателя по заданным параметрам и условиям нагрева установить его основные технические характеристики.

Для проведения экспериментальных исследований работоспособности ЭКС в условиях комплексного теплосилового воздействия разработана и создана оригинальная лабораторная испытательная установка, схемы исполнения которой представлены на Рис. 4. Установка позволяет проводить испытания на долговечность образцов ЭКС в условиях статической сдвиговой нагрузки и скоростного одностороннего нагрева (Рис.4,а), а также в условиях статического теплосилового воздействия (Рис.4,б). Испытуемый образец ЭКС (Рис. 5) представляет собой клеевое соединение металлической пластины и керамической призмы, изготовленных из материалов идентичных материалам элементов реальных конструкций ЛА. Площадь склейки составляет 3 см<sup>2</sup>.

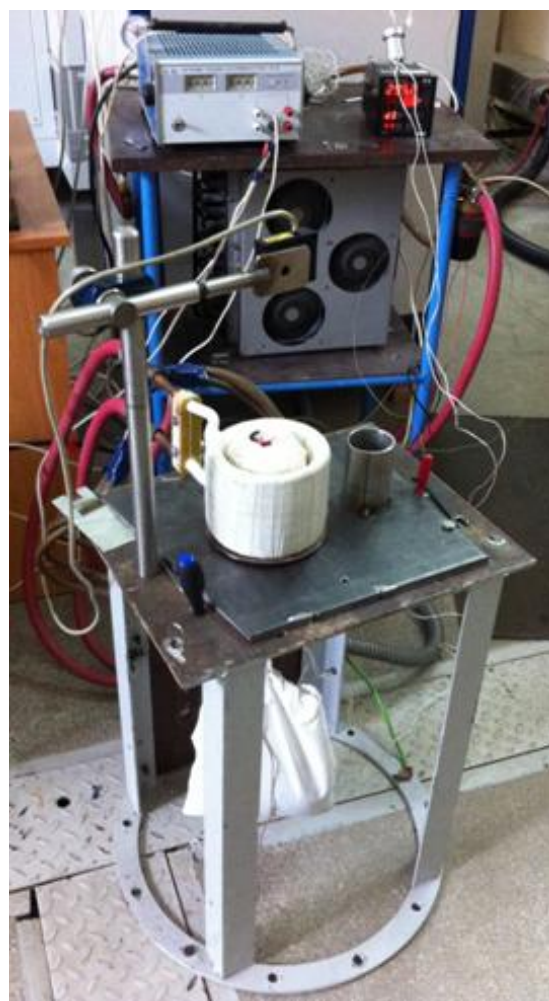
Для оценки работоспособности ЭКС конструкций ЛА, подвергающихся в процессе эксплуатации комплексному термовибрационному воздействию разработан и создан лабораторный испытательный комплекс, структурная схема которого приведена на Рис. 6. В состав комплекса входит электродинамический вибрационный стенд с цифровой системой управления и накатная климатическая камера, а также контрольно-измерительное и измерительно-вычислительное оборудование. Для осуществления теплового воздействия на узел ЭКС конструкции ЛА, выходящего за пределы технических возможностей климатической камеры в состав комплекса введено дополнительное индукционное устройство нагрева.



а)



б)



в)

Рис. 4. Схемы (а, б) и внешний вид (в) лабораторной испытательной установки: 1-индуктор; 2-образец; 3-термопары; 4-футеровка индуктора; 5-нагревательный элемент; 6-лазерный датчик; 7-теплоизолятор

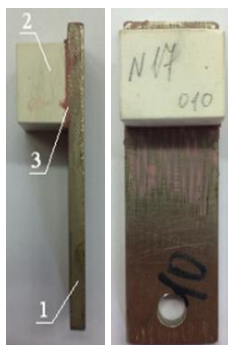
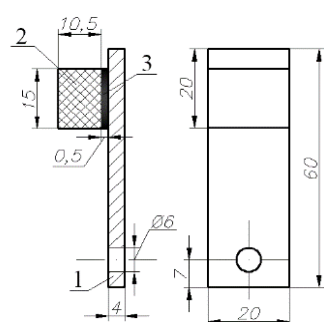


Рис. 5. Стандартный образец для испытаний ЭКС на прочность при сдвиге: 1-металлическая пластина; 2-керамическая призма; 3-адгезионный слой

Созданный испытательный комплекс и разработанная методика позволяют осуществлять комплексное термовибрационное воздействие на узел клеевого соединения конструкции ЛА во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок и, одновременно с этим, проводить исследования динамических характеристик испытываемой конструкции.

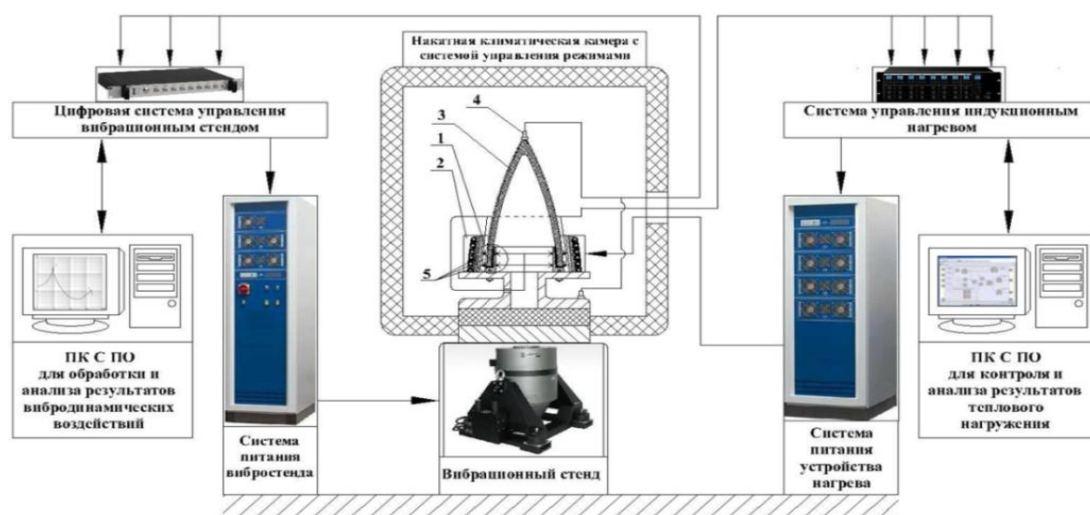


Рис. 6. Структурная схема лабораторного испытательного комплекса: 1-испытуемый узел ЭКС; 2-дополнительное нагревательное устройство; 3-конструкция ЛА; 4-акселерометры; 5-термопреобразователи.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальной отработки предложенных методов оценки работоспособности ЭКС и проверка полученных соотношений на примере клеевого соединения «металл-керамика», осуществленного с помощью кремнийорганического эластомерного клея-герметика ВИКСИНТ У-2-28 (далее – герметик).

Проведены испытания нескольких партий плоских образцов («лопаток») герметика на растяжение, по результатам которых определены параметры материала  $\mu$ ,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  соотношений (2), равные соответственно: 1,04 МПа; 0,88 МПа и 0,25 МПа. На Рис. 7,а приведено сравнение расчетных и экспериментальных диаграмм растяжения. Полученные параметры материала и соотношения (4) использовались для построения расчетных зависимостей деформации сдвига клеевого соединения на основе исследуемого герметика. Сравнение расчетных зависимостей с результатами экспериментов по деформированию ЭКС при сдвиге представлено на Рис. 7,б.

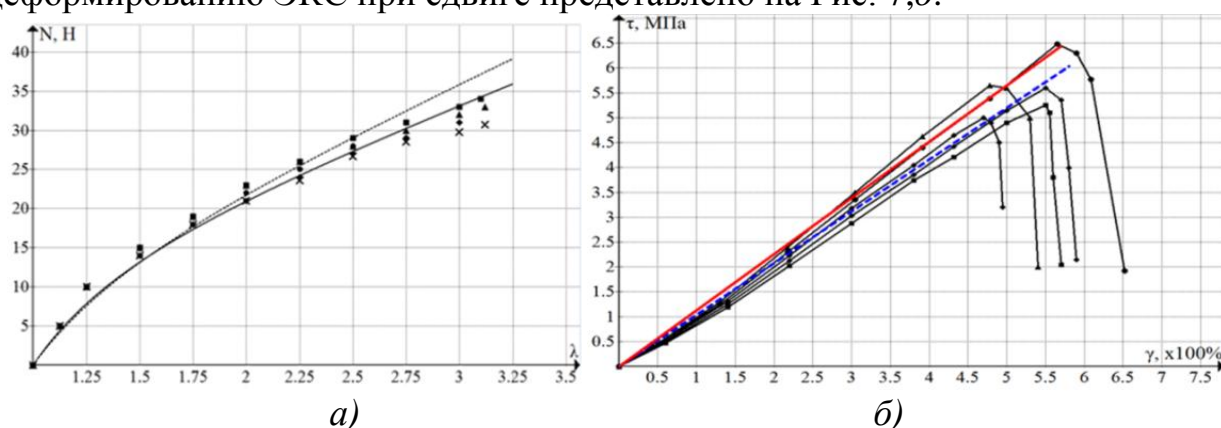


Рис. 7. Экспериментальные (обозначены символами) диаграммы растяжения (а), сдвига (б) и расчетные зависимости (штриховая линия – потенциал Трелоара, сплошная линия – потенциал Муни-Ривлина)

Из Рис. 7 видно, что расчетные и экспериментальные данные согласуются. Предложенный метод позволяет по результатам испытаний

плоских образцов адгезива на растяжение прогнозировать механическое поведение адгезива при сдвиге в клеевом соединении до проведения дорогостоящего этапа склейки, что имеет существенное практическое значение.

На созданной лабораторной установке по разработанной методике проведены испытания ЭКС на ползучесть при статическом теплосиловом воздействии. Испытания проводились в температурном диапазоне  $[200-340]^{\circ}\text{C}$  с шагом  $20^{\circ}\text{C}$ . Выбор указанного температурного диапазона обусловлен температурой эксплуатации ЭКС в конструкциях ЛА. Полученные экспериментальные кривые ползучести использовались для определения параметров  $m$ ,  $\eta$ ,  $\theta$  в соотношении (6). На Рис. 8 приведены полученные расчетные и экспериментальные кривые ползучести для некоторых значений температуры.

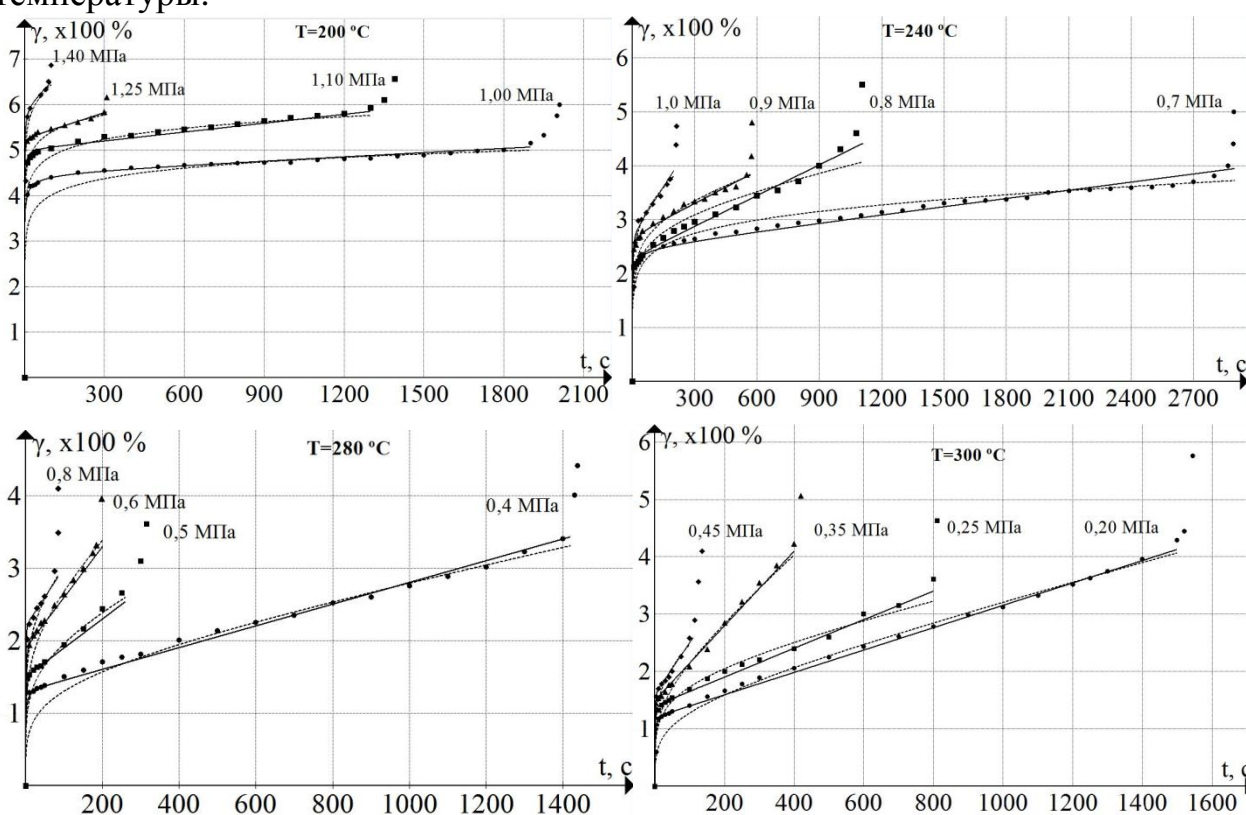


Рис.8. Экспериментальные (символы) и расчетные (сплошные линии) кривые ползучести

В рамках экспериментальной отработки методики испытаний ЭКС на долговечность в условиях статического теплосилового воздействия проведены испытания образцов ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28 при температурах  $[200-340]^{\circ}\text{C}$  с шагом  $20^{\circ}\text{C}$  при различных значениях сдвигового напряжения. Внешний вид образцов после разрушения представлен на Рис. 9. Из Рис.9 видно, что разрушение образцов имеет когезионный характер, что свидетельствует о соблюдении необходимых требований, предъявляемых к качеству подготовки склеиваемых поверхностей. Полученные экспериментальные и расчетные зависимости долговечности ЭКС от



напряжения сдвига для каждого значения температуры представлены на Рис. 10.



Рис.9. Фотографии образцов после испытаний на долговечность

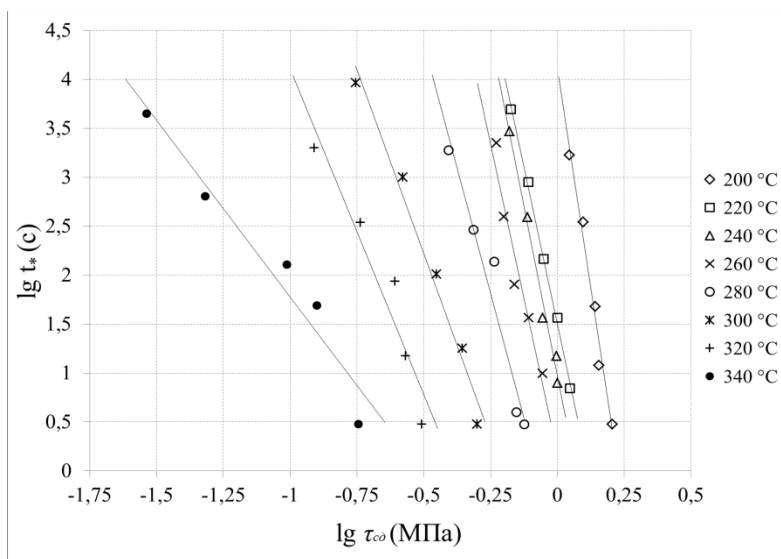
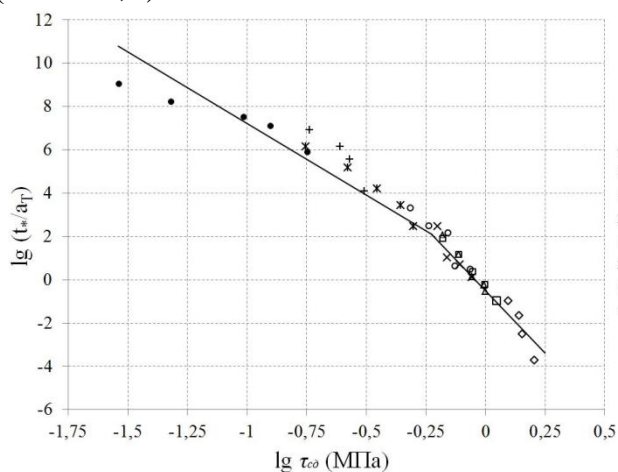
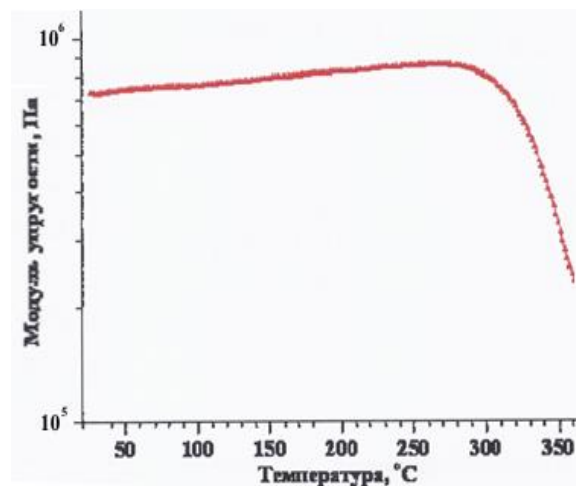


Рис. 10. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) зависимости долговечности ЭКС

На основании построенных расчетных зависимостей долговечности согласно принципу ТВА методом параллельных переносов построена обобщенная зависимость долговечности ЭКС (Рис. 11,а). Из рис. 11,а видно, что обобщенная кривая долговечности в окрестности температуры 280 °C имеет характерный перегиб. Это связано с наличием релаксационного перехода герметика при данной температуре ( $\lambda$ -переход), что подтверждается результатами проведенного динамического механического анализа (ДМА) (Рис. 11,б).



а)



б)

Рис. 11. Обобщенная зависимость долговечности ЭКС на основе герметика ВКСИНТ У-2-28 (а), результат ДМА герметика ВКСИНТ У-2-28 (б)

Из рассматриваемого температурного диапазона выделены два поддиапазона (до и после температуры релаксационного перехода). Для

каждого поддиапазона определены коэффициенты  $c_1$  и  $c_2$  в соотношении WLF (11), после чего из соотношения (10) получена обобщенная модель долговечности ЭКС, имеющая вид:

$$\begin{cases} \lg t_* = \lg a_T - 11,52 \cdot \lg \tau_{co} - 0,51; & \text{при } T \in [200; 280], \\ \lg t_* = \lg a_T - 6,61 \cdot \lg \tau_{co} + 0,61; & \text{при } T \in (280; 340]. \end{cases} \quad (12)$$

**В пятой главе** представлены результаты исследований работоспособности узлов эластомерных клеевых соединений реальных конструкций ЛА, проведенных посредством созданных в работе технических испытательных средств и разработанного научно-методического обеспечения.

Приводятся результаты испытаний на долговечность при статическом теплосиловом воздействии ЭКС двух типов конструкций ЛА: малогабаритной и крупногабаритной. В обоих случаях узел ЭКС конструкции ЛА представляет собой коническое клеевое соединение телескопического типа двух элементов, изготовленных из разнородных материалов (соединения системы «металл-керамика», Рис. 12), выполненное с помощью эластомерного герметика ВИКСИНТ У-2-28.

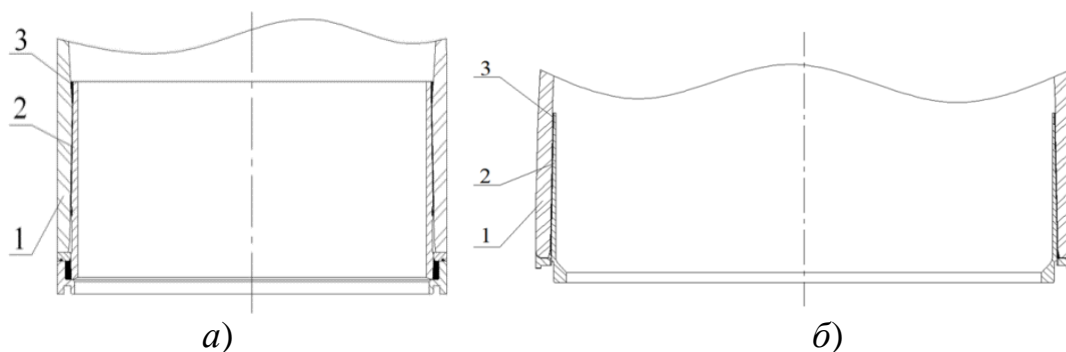


Рис.12. Конструкционные схемы узла ЭКС малогабаритной (а) и крупногабаритной (б) конструкции ЛА

Для оценки величины дополнительного сдвигового напряжения, возникающего в клеевом слое в процессе нагрева вследствие разности тепловых коэффициентов линейного расширения (ТКЛР), построены конечно-элементные модели клеевого слоя ЭКС двух типов конструкций ЛА (Рис. 13)

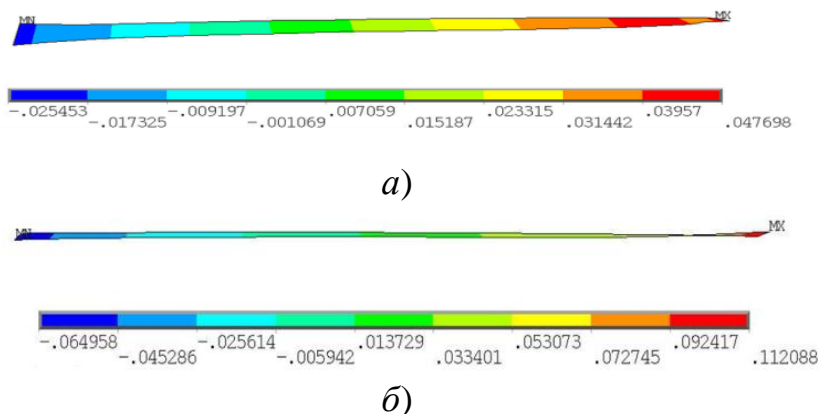


Рис.13. Распределение дополнительного сдвигового напряжения по клеевому слою ЭКС малогабаритной (а) и крупногабаритной (б) конструкций ЛА



Испытания на долговечность узлов ЭКС проводились на созданной лабораторной установке. В Таблице 1 приведены значения долговечности, полученные расчетным путем с помощью соотношений (12) и экспериментально.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения долговечности узлов ЭКС

Тип конструкции ЛА	Температура испытаний $T, ^\circ\text{C}$	Расчетное значение долговечности $t_{*P}, \text{с}$	Среднее экспериментальное значение долговечности ЭКС $\overline{t_{*Э}}, \text{с}$	Отклонение расчетной долговечности ЭКС от экспериментальной, %
Малогабаритная	250	1072	834	28,5
		3467	2886	20,1
		8128	6992	14,0
Крупногабаритная	300	870	648	34,3
		1622	1302	24,6
		4786	5844	18,1

Приведены результаты экспериментальных исследований работоспособности клеевых соединений конструкций ЛА при комплексных термовибрационных воздействиях, в результате которых получены экспериментальные зависимости частоты резонанса конструкции ЛА и коэффициента динамического усиления на соответствующих резонансных частотах от температуры узла ЭКС (Рис.14).

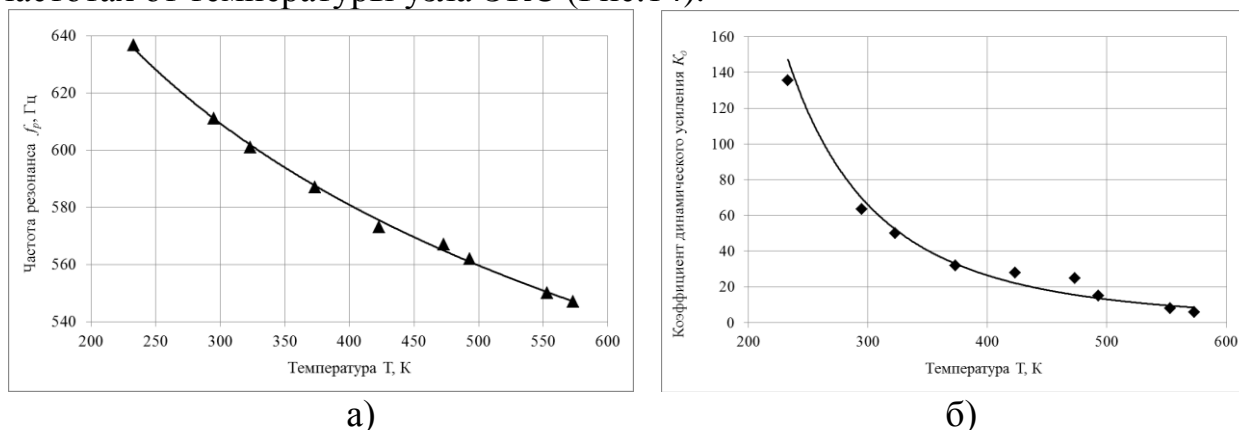


Рис. 14. Экспериментальные зависимости от температуры узла эластомерного клеевого соединения ЛА: а) частоты резонанса конструкции; б) коэффициента динамического усиления на резонансах

Приведено описание разработанных способов демонтажа эластомерных клеевых соединений конструкций ЛА (способ продолжительного теплосилового воздействия и способ разборки клеємеханического байонетного соединения), позволяющие осуществить разборку узла соединения без повреждения его деталей и элементов. Использование предложенных способов позволяет повторно использовать дорогостоящие элементы конструкций ЛА.

**В заключении** сформулированы следующие основные результаты и выводы по диссертационной работе:

1. Получен критерий оценки долговечности ЭКС, основанный на принципе температурно-временной суперпозиции релаксационных свойств эластомеров, позволяющий прогнозировать разрушение ЭКС в условиях теплосилового воздействия. Разработана методика определения параметров критерия долговечности.

2. Разработана методика определения долговечности ЭКС в условиях статического теплосилового воздействия, позволяющая по результатам испытаний образцов получать обобщенную зависимость долговечности ЭКС от сдвигового напряжения и температуры для реальных конструкций ЛА. Результаты апробации показали, что отклонения расчетных значений долговечности ЭКС, полученных согласно разработанной методике, от средних экспериментальных значений долговечности не превышают 28,5 % для малогабаритных конструкций ЛА и 34,3 % для крупногабаритных соответственно.

3. Созданы оригинальные технические средства и разработано их научно-методическое обеспечение, позволяющие обеспечить в наземных условиях комплексное исследование работоспособности и экспериментальную отработку ЭКС как на образцах, так и на реальных конструкциях высокоскоростных ЛА. Испытательные средства позволяют проводить оценку работоспособности ЭКС в условиях комплексного теплосилового, а также термовибрационного воздействия.

4. Установлена возможность использования соотношений нелинейной теории упругости с применением упругих потенциалов Трелоара и Муни-Ривлина для описания механического поведения клеевого соединения на основе эластомерного адгезива типа ВИКСИНТ при сдвиге. Предложена методика прогнозирования деформирования адгезива при сдвиге в клеевом соединении по результатам испытания плоских образцов адгезива на растяжение.

5. Выполнена экспериментальная проверка предложенных методов оценки работоспособности ЭКС на основе широкоиспользуемого в реальных конструкциях эластомерного герметика ВИКСИНТ У-2-28 и получены оригинальные экспериментальные данные о процессах деформирования и разрушения герметика в условиях продолжительного теплосилового нагружения при повышенных температурах (свыше 250 °С).

6. Разработаны и внедрены в практику способы демонтажа ЭКС конструкций ЛА, позволяющие предотвратить механические повреждения дорогостоящих деталей узлов соединения и допускающие возможность их повторного использования. От использования предложенных методов демонтажа получен существенный экономический эффект.

**Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:**

1. Терехин А.В., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Думанский А.М. Работоспособность эластомерных клеевых соединений конструкций

летательных аппаратов в условиях продолжительного теплосилового воздействия // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. №4. Т.21. С. 599-609. (0.6875 п.л. / 0.5 п.л.)

2. Терехин А.В., Неповинных В.И., Русин М.Ю., Думанский А.М. Исследование долговечности эластомерных клеевых соединений в конструкциях летательных аппаратов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. №5. Т.81. С. 44-48. (0.3125 п.л. / 0.25 п.л.)

3. Думанский А.М., Неповинных В.И., Русин М.Ю., Терехин А.В. Оценка предельного состояния герметиков в конструкциях летательных аппаратов // Клеи.Герметики.Технологии. 2014. №2. С.31-38. (0.5 п.л. / 0.15 п.л.)

4. Неповинных В.И., Русин М.Ю., Хитрик В.Л., Терехин А.В., Цварава В.Г., Воробьев С.Б. Исследование влияния комплексного воздействия вибрации и высоких температур на прочность клеевого соединения керамической оболочки обтекателя с металлическим шпангоутом // Клеи.Герметики. Технологии. 2011. №8. С.27-32. (0.375 п.л. / 0.25 п.л.)

5. Пат. № 2534362 Российская Федерация. Способ теплового нагружения конструкций летательных аппаратов из неметаллических материалов / В.И. Неповинных, В.С. Райлян, А.В. Терехин, С.Б. Воробьев.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология». – № заявки 2013132731/28; заявл. 15.07.13; опубл. 29.09.14. (0.375 п.л. / 0.25 п.л.)

6. Пат. № 2541371 Российская Федерация. Способ испытания на прочность оболочки типа тела вращения / В.С. Райлян, В.И. Неповинных, А.В. Терехин, В.Л. Хитрик.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология». – № заявки 2013146080; заявл. 15.10.13; опубл. 29.12.14. (0.3125 п.л. / 0.12 п.л.)

7. Dumanskii A.M., Nepovinnikh V.I., Rusin M.Yu., Terehin A.V. Estimating the limit state of sealants in aircraft structure // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. Vol.7. №3. pp. 201-207. (0.4375 п.л. / 0.14 п.л.)

8. Русин М.Ю., Неповинных В.И., Терехин А.В. Исследование стойкости головных антенных обтекателей ЛА к термовибрационным воздействиям // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №7. С.34-39. (0.375 п.л. / 0.25 п.л.)

9. Терехин А.В., Думанский А.М., Неповинных В.И. Экспериментальное исследование длительной прочности и ползучести высокоэластических полимерных адгезивов в конструкциях летательных аппаратов // Труды международной конф. Наследственная механика деформирования и разрушения твердых тел – научное наследие Ю.Н. Работнова. М.: Изд-во ИМАШ РАН. 2014. С.191-195. (0.3125 п.л. / 0.23 п.л.)

10. Неповинных В.И., Терехин А.В., Думанский А.М. Исследование реологических свойств герметиков, используемых в клеевых соединениях летательных аппаратов // XX-я Международная научно-техническая конф. Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов. Обнинск, 2013. С. 295-296. (0.125 п.л. / 0.1 п.л.)