

УДК 620.172.251.226:539.376

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО ТЕПЛОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Терехин А.В., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Думанский А.М.\*

*ГНЦ «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»  
им. А.Г.Ромашина», г. Обнинск, Россия*

*\*ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва,  
Россия*

### РЕЗЮМЕ

В работе представлены результаты испытаний на долговечность при повышенных температурах образцов эластомерных клеевых соединений (ЭКС), полученных с помощью специально созданной оригинальной лабораторной установки. Приведены расчетные и экспериментальные кривые сдвиговой ползучести ЭКС на основе герметика типа ВИКСИНТ при различных уровнях теплосилового воздействия. Предложены аналитические соотношения для прогнозирования работоспособности ЭКС, показавшие удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** работоспособность; долговечность; ползучесть; эластомерный герметик; клеевое соединение; герметик ВИКСИНТ

## SERVICEABILITY OF ELASTOMERIC ADHESIVE JOINTS OF AIRCRAFT STRUCTURES UNDER EXTENDED THERMAL LOAD-BEARING EFFECTS

Terekhin A.V., Rusin M.Yu., Nepovinnykh V.I., Dumansky A.M.\*

*State research center of Russian Federation ORPE "Technology" named  
after A.G.Romashin, Obninsk, Russia*

*\*Institute of machine science named after A.A. Blagonravov  
of the Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

### SUMMARY

The tests results on the durability of elastomeric adhesive joints (EAJ) of aircraft structures obtained with the aid of specially created laboratory setup are presented. Calculated and experimental curves of the EAJ shear creep based on sealant VIKSINT at various modes of heat exposure were presented. Analytical relations for predicting the performance EAJ having a satisfactory agreement with the experimental data were proposed.

**Key words:** serviceability; durability; creep; elastomeric sealant; adhesive joint; sealing VIKSINT

## ВВЕДЕНИЕ

Эластомерные клеевые соединения как элементы конструкций находят широкое применение во многих отраслях промышленности, благодаря уникальным физико-механическим свойствам высокоэластичных полимерных адгезивов, способных к большим обратимым деформациям при относительно низких значениях модуля упругости и обладающих демпфирующими и вибропоглощающими свойствами [1-4].

В авиационной технике ЭКС используются в высокоответственных конструкциях летательных аппаратов (ЛА) для соединения элементов, изготовленных из разнородных материалов (соединения типа «металл-композит», «металл-керамика» или «металл-стекло») и эксплуатирующихся при повышенных температурах, вызывающих тепловые напряжения в узлах соединений. При этом применение ЭКС в конструкции ЛА позволяет компенсировать возникающие тепловые напряжения, повысить выносливость и технический ресурс ЛА [5].

В настоящее время при наземной отработке конструкций ЛА для оценки качества и работоспособности ЭКС, как правило, используют результаты кратковременных испытаний образцов-спутников на прочность при сдвиге. Испытания проводят посредством разрывной машины путем сдвигового смещения одной части образца клеевого соединения относительно другой с постоянной скоростью (~1,5 мм/мин). При этом клеевое соединение испытывает непрерывно возрастающую сдвиговую нагрузку при постоянном значении температуры. Время нагружения в зависимости от толщины ЭКС и свойств адгезива составляет от 30 до 80 секунд.

Однако постоянное совершенствование и повышение тактико-технических характеристик современных и перспективных ЛА приводит к существенному увеличению длительности эксплуатации их конструкций, при этом ЭКС конструкции ЛА подвергается более продолжительному теплосиловому воздействию в течение нескольких десятков минут [6]. Анализ эксплуатационных режимов современных ЛА показывает, что при выходе на расчетную траекторию полета узел ЭКС конструкции ЛА подвергается продолжительной статической нагрузке с изменением температуры. Эксплуатация ЭКС в условиях продолжительного теплосилового воздействия приводит к проявлению свойственных эластомерам реологических свойств (ползучести, релаксации напряжений и др.), а также к разрушению эластомера при нагрузках, значительно меньших, чем установленные при кратковременных испытаниях. Преждевременная потеря работоспособности ЭКС возможна вследствие достижения недопустимого уровня деформации эластомерного адгезива или же его разрушения.

В данной ситуации для создания современных склеенных конструкций ЛА с гарантированной несущей способностью и надежностью необходима разработка методов оценки работоспособности ЭКС в условиях продолжительного теплосилового воздействия.

## 1. ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе проводилось комплексное расчетно-экспериментальное исследование, направленное на выявление зависимостей деформирования и разрушения эластомерного адгезива в условиях продолжительного теплосилового воздействия с целью прогнозирования работоспособности ЭКС конструкций ЛА.

Исследования проводились на ЭКС типа «металл-керамика» в условиях воздействия продолжительной сдвиговой нагрузки при повышенных температурах в диапазоне (200÷340°C). Выбор данного температурного диапазона обусловлен эксплуатационным режимом теплового воздействия на узел ЭКС конструкции ЛА.

Эксперименты проводились на образцах, представляющих собой клеевое соединение керамической призмы и металлической пластины, осуществленное с помощью эластомерного кремнийорганического герметика ВИКСИНТ У-2-28. ВИКСИНТ У-2-28 является трехкомпонентным термостойким самовулканизирующимся герметиком на основе низкомолекулярного каучука имеющего линейное строение с боковыми звеньями и концевыми гидроксильными группами, по которым осуществляется его вулканизация путем каталитической поликонденсации полиорганосилоксандиолов с полифункциональными силанами [7,8]. Герметик ВИКСИНТ У-2-28 предназначен для внутришовной герметизации и широко используется при производстве конструкций ЛА различного класса. Схема образца ЭКС приведена на рис.1.

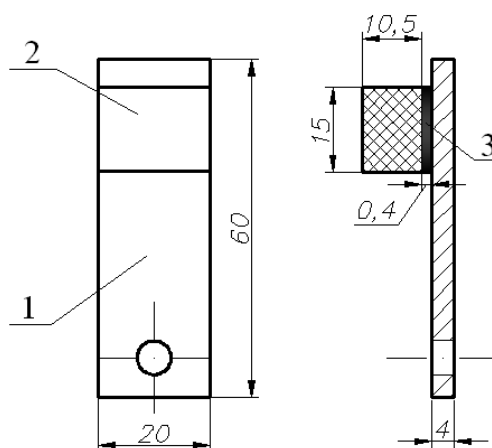


Рис.1. Схема образца: 1 – металлическая пластина, 2 – керамическая призма, 3 – герметик.

Сборка всех образцов осуществлялась с использованием одной партии герметика по единой технологии и в одинаковых условиях окружающей среды. Толщина клеевого слоя собранных образцов находилась в диапазоне  $0,40 \pm 0,01$  мм.

В процессе проведения экспериментальных работ часть образцов была испытана на кратковременную прочность при сдвиге в температурном диапазоне 200÷340°C с шагом 20°C. Испытания проводились на стандартной разрывной машине типа LFM-50 при скорости сдвига равной 1,5 мм/мин по методике, разработанной в соответствии с требованиями ГОСТ 14759-69. При каждом значении температуры испытывались 6 образцов. Зависимость осредненных значений кратковременной прочности ЭКС при сдвиге  $\tau_k$  от температуры  $T$  приведена на рис.2.

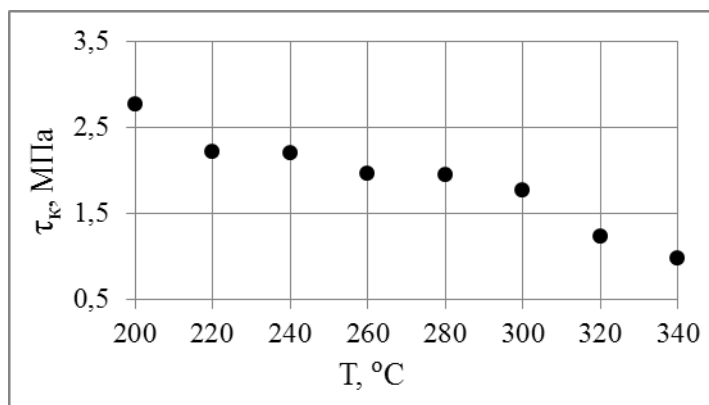


Рис.2. Экспериментальные значения зависимости кратковременной прочности ЭКС от температуры.

Полученные данные кратковременной прочности ЭКС использовались для определения максимального уровня сдвигового напряжения при проведении испытания на длительную прочность и долговечность ЭКС при тех же значениях температуры.

Для испытаний образцов ЭКС на длительную прочность и долговечность была разработана и создана оригинальная лабораторная испытательная установка, принципиальная схема которой приведена на рис.3.

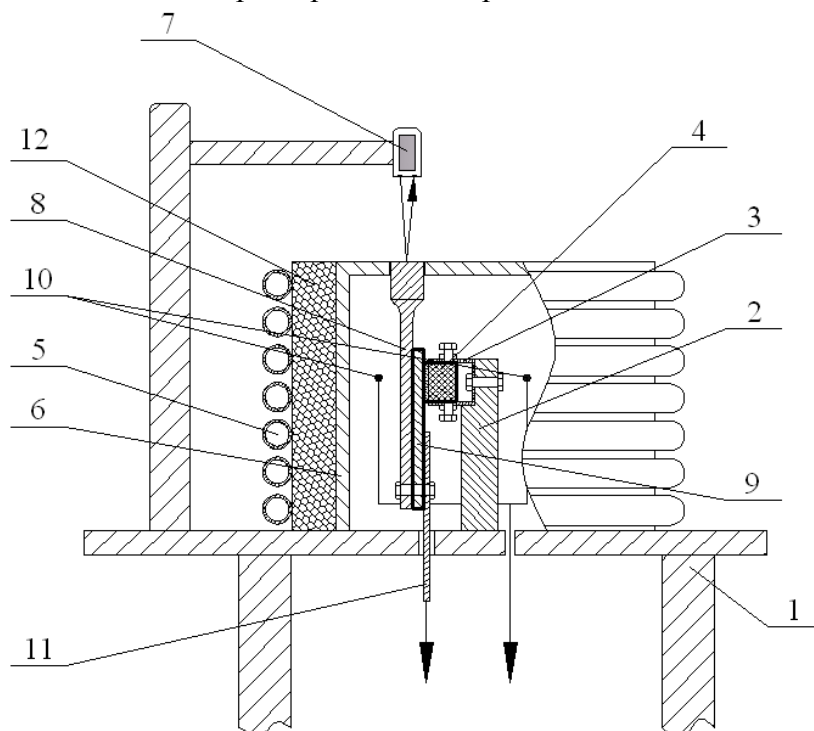


Рис.3. Принципиальная схема лабораторной испытательной установки.

Установка включает в себя металлическую опору 1, на которой расположена стойка 2, предназначенная для крепления фиксатора 3 с установленным испытуемым образцом 4. Тепловое воздействие на образец осуществляется с помощью специального индукционного нагревателя 5 через промежуточный нагревательный элемент 6, изготовленный в виде цилиндра из стали с крышкой. По внешней поверхности промежуточный нагревательный элемент изолирован

теплоизоляционным матом 12, изготовленным из кремнезёмного материала. В крышке цилиндра располагается специальное отверстие для фокусировки луча триангуляционного лазерного датчика перемещения 7 на пластине 8, закрепленной к металлической пластине 9 испытуемого образца 4. Режим нагрева контролируется с помощью трех термодатчиков 10, размещенных во внутреннем объеме промежуточного нагревательного элемента 6. Сдвиговая нагрузка на клеевое соединение образца 4 прикладывается через пластину 11, закрепленную к металлической пластине 8 путем подвешивания груза заданной массы. Толщина пластины 11 устанавливается таким образом, чтобы плоскость приложения нагрузки лежала в плоскости сечения клеевого шва в середине его толщины, что требуется для исключения отрывающих и раздирающих напряжений в ЭКС, 12 – теплоизоляционный кремнезёмный мат.

Созданная лабораторная установка позволяет проводить испытания на длительную прочность и долговечность ЭКС в условиях статического теплосилового воздействия при температурах до 500°C и выше с одновременным измерением и регистрацией значения сдвигового перемещения одной детали клеевого соединения (металлической пластины) относительно жестко закреплённой другой детали (керамической призмы).

В результате экспериментальных исследований проведены испытания образцов ЭКС на долговечность при различных уровнях сдвиговой нагрузки и следующих температурах: 200°C, 220°C, 240°C, 260°C, 280°C, 300°C, 320°C, 340°C. В процессе проведения испытаний осуществлялось измерение и регистрация величины сдвигового перемещения эластомерного адгезива.

Экспериментальные исследования для высокоэластических материалов, в том числе и эластомеров, показывают, что долговечность может быть аппроксимирована с помощью следующего выражения [9-12]

$$t_* = C(T) \cdot \sigma^{-\alpha(T)}, \quad (1)$$

где  $C(T)$  и  $\alpha(T)$  – параметры материала, зависящие от температуры  $T$ .

При этом в работе [13] отмечается, что чем более эластичен исследуемый материал, тем более точно временная зависимость его прочности описывается соотношением вида (1).

Для описания длительной прочности была сделана попытка использования известного уравнения термофлуктуационной теории С.Н.Журкова, однако решение полученной системы линейных уравнений не позволило получить устойчивые значения параметров. Проблемы, возникающие при использовании экспоненциального уравнения длительной прочности для высокоэластических материалов отмечена в [11]; там же предложено степенное соотношение получившее название уравнения Бартенева.

Исходя из этого, в данной работе для описания зависимости долговечности  $t_*$  (времени до разрушения) ЭКС от параметров теплосилового воздействия при сдвиге при постоянном значении температуры использовалось соотношение следующего вида:

$$t_* = C \cdot \tau_{12}^{-\alpha} \quad (2)$$

где  $\tau_{12}$  – сдвиговое напряжение;  $T$  – температура, °C;  $C(T)$  и  $\alpha(T)$  – параметры материала.

Результаты испытаний на длительную прочность при сдвиге приведены в таблице. 1.

Таблица 1.

Температура, град С	Напряжение, МПа	Время до разрушения, сек
200	1,600	3
	1,385	48
	1,247	350
	1,110	1692
220	1,11	7
	1,00	37
	0,89	147
	0,78	900
	0,67	5000
240	1,00	8
	0,99	15
	0,88	37
	0,77	395
	0,66	2965
260	0,88	10
	0,78	37
	0,69	81
	0,59	2244
280	0,87	1
	0,75	3
	0,70	4
	0,56	139
	0,49	294
	0,39	1907
300	0,50	3
	0,45	18
	0,35	103
	0,25	1010
	0,20	9240
320	0,31	3
	0,25	87
	0,18	348
	0,12	2003
340	0,18	3
	0,13	49
	0,097	128
	0,048	640
	0,029	4500

Значения параметров  $C$  и  $\alpha$  определялись отдельно для каждого значения температуры методом линейной регрессии после логарифмирования соотношения (2)

$$\lg t_* = \lg C - \alpha \lg \tau_{12}$$

По результатам обработки и анализа экспериментальных данных для каждого значения температуры построены уравнения регрессии, приведенные в таблице 2.

Таблица 2.

Температура, °С	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
200	$\lg t_* = -17,39 \cdot \lg \tau_{12} + 21,49$	0,996
220	$\lg t_* = -12,81 \cdot \lg \tau_{12} + 14,31$	0,998
240	$\lg t_* = -13,86 \cdot \lg \tau_{12} + 14,83$	0,994
260	$\lg t_* = -13,08 \cdot \lg \tau_{12} + 13,23$	0,970
280	$\lg t_* = -11,54 \cdot \lg \tau_{12} + 11,28$	0,982
300	$\lg t_* = -7,51 \cdot \lg \tau_{12} + 5,99$	0,990
320	$\lg t_* = -6,58 \cdot \lg \tau_{12} + 4,10$	0,953
340	$\lg t_* = -3,61 \cdot \lg \tau_{12} + 1,78$	0,972

Полученные значения коэффициента корреляции показывают достаточно близкую к линейной зависимость между логарифмом сдвигового напряжения и логарифмом долговечности ЭКС.

На рис.4 представлены экспериментальные и расчетные зависимости долговечности ЭКС для каждого значения температуры.

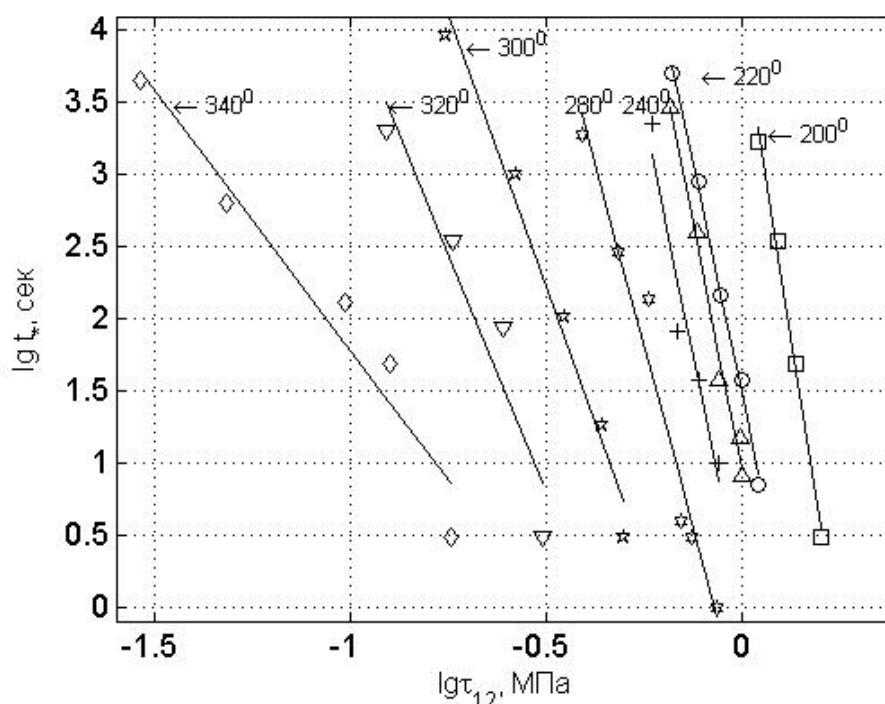


Рис.4. Экспериментальные и расчетные зависимости долговечности ЭКС от сдвигового напряжения и температуры.

Анализ полученных расчетных зависимостей показывает, что для построения обобщенной кривой долговечности ЭКС при теплосиловом нагружении в рассматриваемом температурном диапазоне может быть использован метод обобщенных координат [14,15], в основе которого лежит температурно-временная суперпозиция механических свойств полимерных материалов.

Графическое построение обобщенной кривой долговечности осуществляется путем параллельного переноса расчетных зависимостей вдоль оси логарифма времени к расчетной кривой, полученной при температуре приведения  $T_s$ .

Величины отрезков, на которые осуществляется параллельный перенос, определяются согласно соотношению Вильямса-Ландела-Ферри

$$\lg a_T = \frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + T - T_s}, \quad (3)$$

где  $a_T$  – коэффициент температурно-временной редукции.

В качестве характеристической температуры была установлена температура  $T_s=280^\circ\text{C}$ . Обработка расчетных данных показала, что зависимость коэффициента температурно-временной редукции может быть представлена следующей функцией

$$\lg a_T = \frac{-5,96 \cdot (T - 280)}{-111 + T - 280}$$

На рис.5 приведены полученная обобщенная кривая долговечности ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28 и экспериментальные данные.

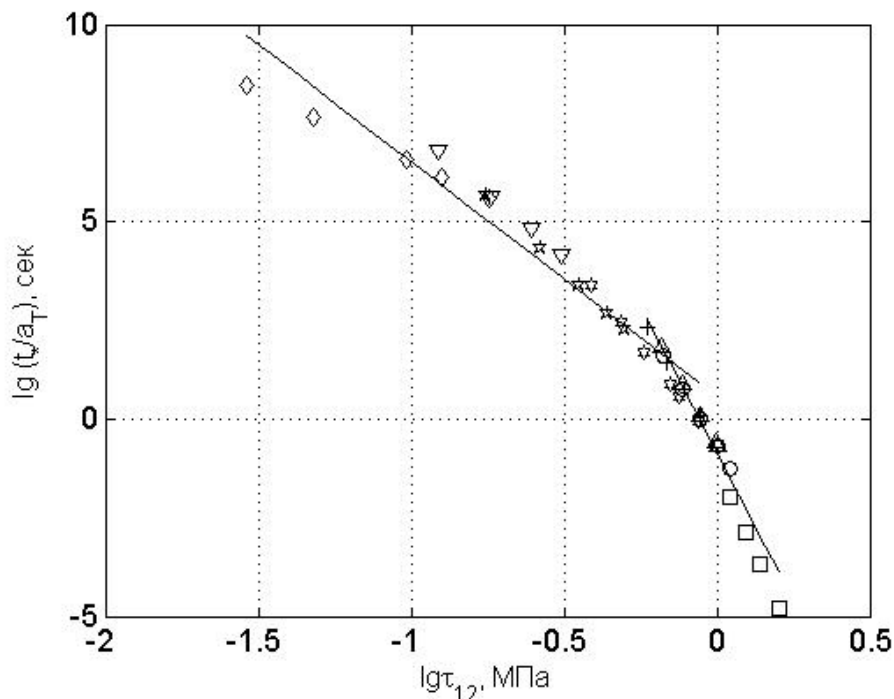


Рис.5. Обобщенная кривая долговечности ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28 (сплошная линия) и экспериментальные данные (символы).

Из рис.5 видно, что обобщенная кривая имеет характерный перегиб в окрестности температуры  $280^\circ\text{C}$ . Это связано с множественностью релаксационных переходов в эластомерных материалах, что обуславливает наличие различных релаксационных механизмов. Релаксационный процесс, наблюдающийся в эластомерном герметике ВИКСИНТ У-2-28 при температуре  $280^\circ\text{C}$ , связан с переходом герметика из высокоэластического в вязкотекучее состояние и в классификации релаксационных механизмов обозначается как L-максимум или  $\lambda$ -переход [16]. Релаксационный  $\lambda$ -переход герметика ВИКСИНТ У-2-28 при температуре  $280^\circ\text{C}$  подтверждается результатами динамического



механического анализа (ДМА) и согласуется с ранее проведенными данными в работах [17,18].

Выражение для обобщенной кривой долговечности в этом случае принимает следующий вид

$$\lg \frac{t_*}{a_T} = A \lg \tau_{12} - B \quad (4)$$

После определения значений параметров  $A$  и  $B$  для каждого температурного поддиапазона  $(200-280)^\circ\text{C}$  и  $(280-340)^\circ\text{C}$  критерий долговечности ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28, позволяющий прогнозировать его разрушение по заданным значениям сдвигового напряжения и температуры в диапазоне  $(200\div 340)^\circ\text{C}$  может быть представлен в виде следующего выражения

$$\lg \frac{t_*}{a_T} = -11,824 \lg \tau_{12} - 1,144; T \in [200; 280] \quad (5)$$

$$\lg \frac{t_*}{a_T} = -5,941 \lg \tau_{12} + 0,586; T \in [280; 340]$$

В процессе проведения испытаний на долговечность ЭКС технические возможности созданной испытательной установки обеспечивают возможность измерения и регистрации сдвиговой ползучести ЭКС, что позволяет использовать полученные экспериментальные данные для построения экспериментальных кривых сдвиговой ползучести ЭКС. Сдвиг при построении кривых ползучести определялся как отношение сдвигового смещения клеевого слоя к его толщине. Толщина клеевого слоя для каждого образца измерялась в трех сечениях толщины образца до и после склеивания и осреднением результатов.

На рис.6 приведены экспериментальные кривые ползучести ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28 при температуре  $T=300^\circ\text{C}$  и напряжениях сдвига 0,45 МПа, 0,35 МПа, 0,25 МПа, и 0,20 МПа.

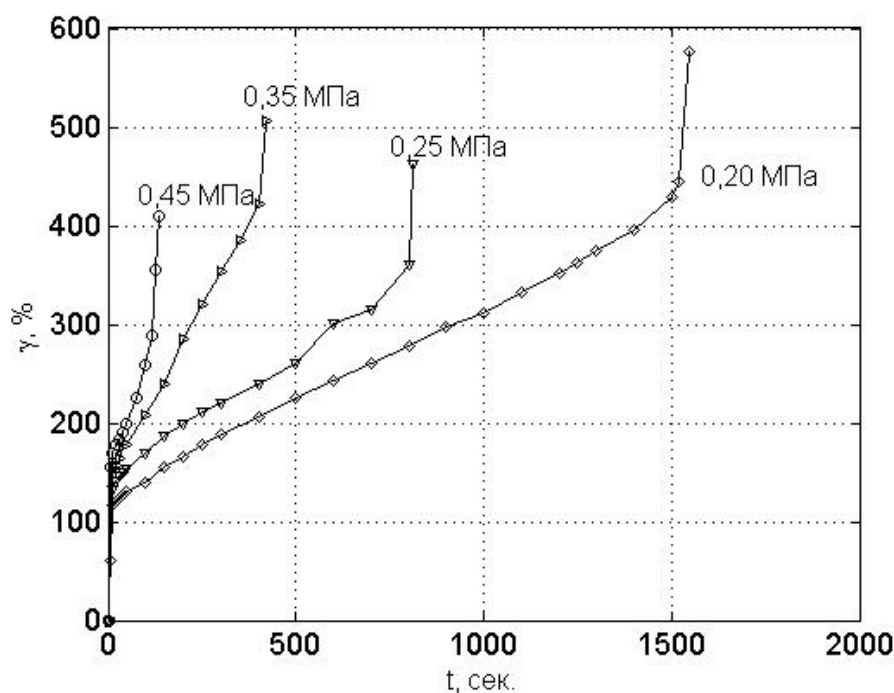


Рис.6. Экспериментальные кривые ползучести ЭКС.

В результате проведения экспериментальных исследований ползучести ЭКС на основе герметика ВИКСИНТ У-2-28 были выявлены три характерные стадии ползучести адгезива. Момент наступления третьей стадии ползучести определяет потерю работоспособности ЭКС вследствие развития недопустимого уровня деформации. Для описания закономерностей ползучести ЭКС и получения расчетно-экспериментальных зависимостей требуется проведение дополнительных исследований.

Проведены комплексные расчетно-экспериментальные исследования работоспособности ЭКС на основе эластомерного герметика ВИКСИНТ У-2-28 в условиях статического продолжительного теплосилового воздействия. С помощью созданной оригинальной испытательной установки в температурном диапазоне 200÷340°С, соответствующем эксплуатационному, выявлены закономерности деформирования и разрушения эластомерного адгезива, позволяющие прогнозировать работоспособность ЭКС конструкций ЛА по заданным параметрам и длительности теплосилового воздействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Wozzkowska A.* Advanced Elastomers. Technology, Properties and Applications. – InTech Prepress, Novi Sad, 2012. – 400 p.
2. *Аверко-Антонович Л.А. и др.* Химия и технология синтетического каучука. – М.: Химия, КолосС, 2008. – 357 с.
3. *Вильнав Ж.–Ж.* Клеевые соединения. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
4. *Поццус А.В.* Клеи, адгезия, технология склеивания. – СПб.: Профессия, 2007. – 376 с.
5. *Русин М.Ю.* Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: Учебное пособие – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2005. – 64 с.
6. *Архангельский И.И., Афанасьев П.П. и др.* Проектирование зенитных управляемых ракет. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 732 с.
7. Большой справочник резинщика. Ч.2. Резины и резинотехнические изделия. – М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. – 648 с.
8. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2002: Юбилейный научно-технический сборник. – М.: ВИАМ, 2002. – 424 с.
9. *Дырда В.И.* Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. – Киев.: Наук. думка, 1988. – 232 с.
10. *Гольдман А.Я.* Прочность конструкционных пластмасс. – Л.: Машиностроение, 1979. – 320 с.
11. *Бартнев Г.М., Зуев Ю.С.* Прочность и разрушение высокоэластических материалов. – М.-Л.: Химия, 1964. – 388 с.
12. *Терехин А.В., Неповинных В.И., Русин М.Ю., Думанский А.М.* Исследование долговечности эластомерных клеевых соединения в конструкциях летательных аппаратов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Том 81. – №5.– С.44-48.
13. *Фрейдин А.С.* Прочность и долговечность клеевых соединений. – М.: Химия, 1981 г. – 272 с.
14. *Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д.* Прогностика деформативности полимерных материалов. – Рига: Зинатне, 1975. – 416 с.
15. *Бокшицкий М.Н.* Длительная прочность полимеров. – М.: Химия, 1978. – 308 с.

16. *Бартенев Г.М.* Структура и релаксационные свойства эластомеров. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
17. *Цверава В.Г., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Вережка В.Г., Бородай С.П., Хамицаев А.С.* Влияние высокотемпературной тепловой обработки на свойства герметика Виксинт У-2-28 / Клеи. Герметики. Технологии. – 2006. – №3. – С.26-31.
18. *Русин М.Ю., Неповинных В.И., Терехин А.В.* Исследования стойкости головных антенных обтекателей ЛА к термовибрационным воздействиям / Все материалы: Энциклопедический справочник. – 2012. – №7. – С.34-39.

*Поступила в редакцию 11 сентября 2015 года.*

---

Сведения об авторах:

Терехин Александр Васильевич – инж. 2-й категории, ГНЦ Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина, г.Обнинск, Россия; e-mail: [aterehin@list.ru](mailto:aterehin@list.ru)

Неповинных Виктор Иванович – к.т.н., нач.лаб., ГНЦ Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина, г.Обнинск, Россия; e-mail: [info@technologiya.ru](mailto:info@technologiya.ru)

Русин Михаил Юрьевич – д.т.н., проф., директор научно-производственного комплекса, ГНЦ Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина, г.Обнинск, Россия; e-mail: [info@technologiya.ru](mailto:info@technologiya.ru)

Думанский Александр Митрофанович – д.ф.-м.н., зав. лаб. Механики композиционных материалов, зам.дир. по научной работе, ФГБУН Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия; e-mail: [alduman@rambler.ru](mailto:alduman@rambler.ru)