



УДК 620.1:666.11/.28

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-12-12

**ОСОБЕННОСТИ СПАДА ВЫСОКОЭЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ В ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ В
ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗГРУЗКИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ,
БЛИЗКИХ К ТЕМПЕРАТУРЕ РАЗМЯГЧЕНИЯ**

Н.О. Яковлев

кандидат технических наук

Е.Г. Сентюрин

кандидат технических наук

Г.М. Харитонов

Сентябрь 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Н.О. Яковлев¹, Е.Г. Сентюрин¹, Г.М. Харитонов²

**ОСОБЕННОСТИ СПАДА ВЫСОКОЭЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
В ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ В ПРОЦЕССЕ ИХ РАЗГРУЗКИ
ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ, БЛИЗКИХ К ТЕМПЕРАТУРЕ РАЗМЯГЧЕНИЯ**

Представлены результаты исследований развития и спада высокоэластической (ВЭ) деформации в органических стеклах марок ВОС-2 (сополимер с редко сшитой структурой) и СО-120 (полимер с линейной структурой) при «мгновенном» и «принудительном» снятии нагрузки в диапазоне рабочих температур. Выявленные в экспериментах особенности спада ВЭ деформации в органических стеклах в процессе их разгрузки при температурах, близких к температуре размягчения, показывают целесообразность учета такой деформации при проектировании фонарей кабин перспективных самолетов.

Ключевые слова: высокоэластическая деформация, органическое стекло.

N.O. Yakovlev, E.G. Sentyurin, G.M. Haritonov

**RUBBER-LIKE ELASTIC STRAIN FEATURES IN ORGANIC GLASS DURING
UNLOADING AT TEMPERATURES NEAR TO THE SOFTENING TEMPERATURE**

Results of the rubber-like elastic strain increase and recovery research for BOC-2 (copolymer with rarely crosslinked structure) and CO-120 (polymer with linear structure) organic glasses marks during «instant» and «forced» unloading at operating temperatures. The strain recover features that experimental determined at unloading the organic glasses at near the softening temperature demonstrate the need their accounting in the design of future aircraft glassing.

Keywords: rubber-like elastic strain, organic glass.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State

Введение

Авиационные органические стекла являются важными конструкционными неметаллическими материалами [1–6]. Наряду с металлическими материалами внешнего контура самолета они призваны обеспечить необходимые прочностные характеристики изделия, обладая при этом высокими оптическими свойствами. В остеклении современных самолетов органические стекла являются основным материалом, занимая от 80 до 100% всей площади остекления.

С развитием авиации, ростом скоростей и высоты полетов требования к прочностным характеристикам стекол постоянно возрастали. Это требовало создания и освоения промышленностью новых материалов [7–10]. Для дозвуковых (число Маха $M < 1$) и кратковременных (3–15 мин) сверхзвуковых ($M \leq 2,1$) полетов требовались оргстекла, способные эксплуатироваться в интервале температур от -60 до $+100^\circ\text{C}$. При появлении самолетов, способных к полетам со скоростью $M \geq 2,5$, максимальные температуры на поверхности стекол достигли $\geq 200^\circ\text{C}$.

Материалы и методы

В данной работе в качестве объектов исследования выбраны органические стекла марок СО-120 и ВОС-2 [11, 12]. Стекло СО-120 – полимер линейного строения на основе непластифицированного полиметилметакрилата (ПММА), которое до настоящего времени является одним из основных материалов остекления. Ранее в неориентированном состоянии стекло СО-120 пытались применить на самолетах с температурой на поверхности до 135°C . Стекло ВОС-2 – сополимер частично сшитой структуры на основе метилметакрилата и метакриловой кислоты – является новым теплостойким оргстеклом, рекомендованным для применения в деталях остекления с температурой на поверхности от аэродинамического нагрева до 200°C .

Опыт эксплуатации показал, что наиболее опасными температурными условиями в полетах являются температуры внешних слоев остекления, близкие к температуре размягчения T_p .

При оценке прочности авиационного остекления на основе органических стекол считается, что они работают в области упругих деформаций. В расчетах и прочностных испытаниях обычно определяют напряжения, создаваемые аэродинамическими нагрузками, избыточным давлением в кабине и неравномерным распределением температуры по толщине остекления.

В реальности изделия остекления работают в области упруго-высокоэластических деформаций и в них возникают остаточные напряжения [13–15],

причем в остеклении не только сверхзвуковых самолетов, но и самолетов, летающих на дозвуковых скоростях. Значительные остаточные напряжения замечены в остеклении из стекла марки СО-120 ($T_p=120^\circ\text{C}$) самолетов, летающих со скоростью до $M<2,3$, а также в остеклении из стекла марки Э-2 ($T_p=180^\circ\text{C}$) на самолетах, выполнявших полеты при $M\geq 2,6$. В деталях остекления наблюдались значительные остаточные деформации, а в отдельных случаях даже происходило их растрескивание.

Причины возникновения на поверхности остекления остаточных напряжений связаны с релаксацией температурных напряжений сжатия при нагреве остекления, либо усадочных деформаций, связанных с технологией изготовления стекол. С усовершенствованием технологии усадочные деформации были устранены, но остаточные температурные напряжения, вызванные релаксацией, сохранились [16–20].

Ранее [13, 15] при исследовании закономерностей деформирования органических стекол марок СО-120 и ВОС-2 при знакопеременных нагружениях установлено, что при температурах, близких к T_p , начальная общая деформация (ϵ_0) практически полностью переходит в высокоэластическую (ВЭ) деформацию ($\epsilon_{ВЭ}$). При разгрузке образцов полнота спада ВЭ деформации определяется как

$$\Pi = \frac{\epsilon_{ВЭ} - \epsilon_{ост}}{\epsilon_{ВЭ}},$$

где $\epsilon_{ост}$ – остаточная ВЭ деформация достигала максимума ($\sim 50\%$) при температуре $\sim (T_p - 45)^\circ\text{C}$ и с дальнейшим повышением температуры до T_p ее значение снижалось почти до нуля.

Приведенная на рис. 1 диаграмма растяжения органического стекла марки ВОС-2 до $\epsilon_0=0,8\%$ при 140°C показывает, что при смене полуцикла нагружения нерелаксировавшая часть ВЭ деформации переходит в качестве остаточной деформации $\epsilon_{ост}$ во второй полуцикл нагружения. С повышением температуры величина остаточной деформации приближается к величине общей деформации, поскольку наклон нагрузочной ветви уменьшается и сокращается время разгрузки.

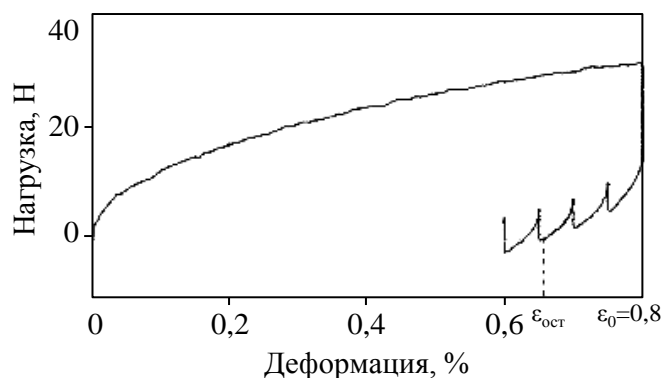


Рисунок 1. Диаграмма деформирования образца оргстекла ВОС-2 при температуре 140°C с выдержкой 300 с при постоянной деформации и последующей ступенчатой разгрузкой

В полете самолета возможны случаи, когда температура слоев стекла у внешней поверхности остекления достигает температур $\leq(T_p+30)^\circ\text{C}$ и на режиме торможения разгрузка (снижение общей деформации) этих слоев из-за изменения температуры по толщине остекления начинается при температуре, превышающей T_p . Смена полуцикла нагружения произойдет в слоях при температуре $\leq T_p$ при возникновении напряжений растяжения.

При моделировании температурных напряжений с учетом их релаксации возникает вопрос, какая часть ВЭ деформации, развившаяся в первом полуцикле нагружения, не успевает за время разгрузки спасть и переходит как остаточная деформация во второй полуцикл нагружения.

Из приведенного выше предполагается, что вся ВЭ деформация, возникшая в первом полуцикле и равная общей деформации ϵ_0 , перейдет в виде остаточной во второй полуцикл. Однако в работе [21] на основании экспериментов с образцами полиметилметакрилата (ПММА), в которых они подвергались растяжению до $\epsilon_0=30\%$, отмечается, что при температурах, близких к T_p , наблюдалось полное и почти мгновенное, судя по кривым $\epsilon(\tau)$, восстановление (спад ВЭ деформации) деформированных образцов. С учетом больших деформаций, в ~ 30 раз превышающих максимально возможные в остеклении самолетов, и масштаба приведенных графиков (10 мм соответствуют 20 ч), в то время как в полете процесс разгрузки слоев стекла у внешней поверхности длится от 60 до 90 с, потребовалось проверить, как протекает спад ВЭ деформации при разгрузке авиационных органических стекол в условиях, близких к условиям полета по величинам ϵ_0 , скорости деформирования, времени разгрузки.

Для этого проведены два эксперимента (рис. 2). В эксперименте 1 образцы оргстекла марки СО-120 нагревали до температур 90, 105, 120 и 131°C , а оргстекла марки ВОС-2 – до температур 105, 130, 145 и 151°C . После достижения заданной температуры нагрева каждый образец подвергали растяжению до $\epsilon_0=0,9\%$, выдерживали при $\epsilon_0=\text{const}$ в течение 5 мин, после чего нижний конец образца освобождали из захвата и происходило «мгновенное» снятие нагрузки.

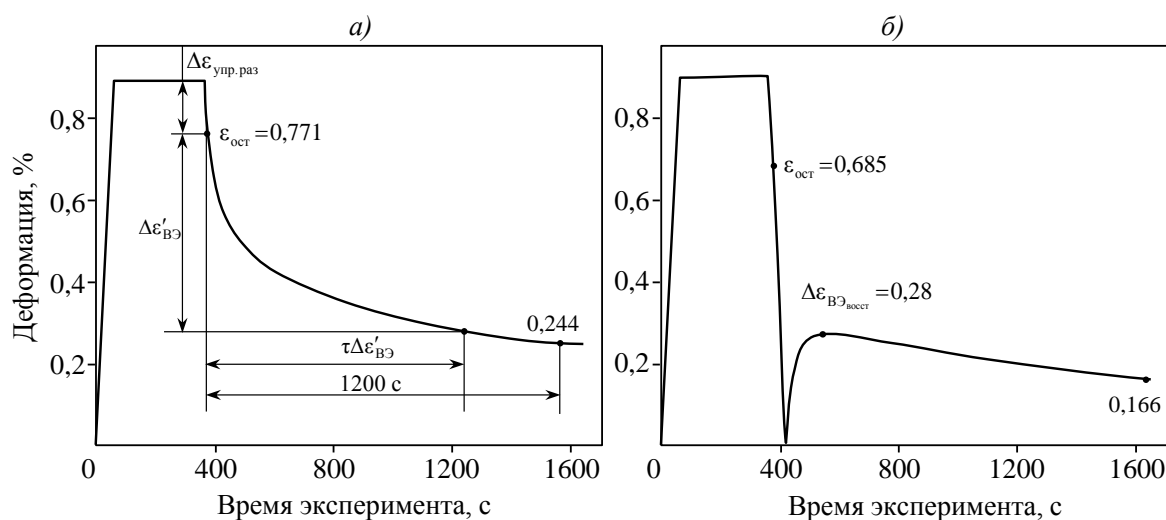


Рисунок 2. Диаграммы «деформация–время эксперимента» для оргстекла марки ВОС-2 при температуре 130°C в эксперименте 1 (а) и 2 (б):

$\Delta\epsilon_{\text{упр.раз}}$ – упругая деформация, снимающаяся при «мгновенной» разгрузке образца; $\epsilon_{\text{ост}}$ – высокоэластическая (ВЭ) деформация, оставшаяся после снятия упругой деформации; $\Delta\epsilon'_{\text{ВЭ}}$ – величина снижения деформации, равная величине ВЭ деформации, развившейся за время нагружения; $\tau_{\Delta\epsilon'_{\text{ВЭ}}}$ – время, за которое деформация снижается на величину, равную величине ВЭ деформации, развившейся за время нагружения; $\Delta\epsilon_{\text{ВЭ}_{\text{восст}}}$ – величина восстановления ВЭ деформации после снятия нагрузки с образца

В эксперименте 2 каждый образец также подвергали нагреву до указанных температур, нагружали до $\epsilon_0=0,9\%$, выдерживали в течение 5 мин при $\epsilon_0=\text{const}$, а затем разгружали до $\epsilon_0=0$ с приложением сжимающей нагрузки P – «принудительное» снятие нагрузки со скоростью, превышающей равновесную, и освобождали его из захвата. Такой эксперимент имитирует условия деформирования слоя остекления в полете, возникающие из-за распределения температуры по толщине. Скорость деформирования при нагружении и разгрузке составляла $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и соответствовала средней скорости деформирования остекления в полете. Во всех экспериментах записывали диаграммы «нагрузка–деформация» и «деформация–время эксперимента».

Результаты

Из полученных данных видно, что в эксперименте 1 после освобождения образца деформация снижалась на упругую составляющую $\Delta\epsilon_{\text{упр.раз}}$ и далее происходил спад ВЭ деформации.

В эксперименте 2 с «принудительной» разгрузкой до $\epsilon_0=0$ после освобождения образца восстанавливалась упругая деформация сжатия, соответствовавшая нагрузке P , и не успевшая спасти часть ВЭ деформации растяжения $\Delta\epsilon_{\text{ВЭ}_{\text{восст}}}$. Далее ВЭ деформация продолжала спадать с уменьшенным темпом.

Результаты экспериментов представлены в виде графиков спада ВЭ деформации при различных температурах после «мгновенного» (рис. 3) и «принудительного» (рис. 4) снятия нагрузки. В таблице приведены данные, определенные

по диаграммам «нагрузка–деформация»:

– величины ВЭ деформации, развивающейся за время нагружения $\varepsilon'_{ВЭ}$, и полной деформации $\varepsilon_{ВЭ} = \varepsilon'_{ВЭ} + \varepsilon''_{ВЭ}$, где $\Delta\varepsilon''_{ВЭ}$ – ВЭ деформация, развивающаяся за время выдержки при $\varepsilon_0 = \text{const}$;

– величины остаточной ВЭ деформации $\varepsilon_{ост}$ при нагрузке $P=0$;

по диаграммам «деформация–время эксперимента»:

– деформации упругой разгрузки $\Delta\varepsilon_{упр.раз} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{ВЭ}$ в эксперименте 1;

– продолжительность спада ВЭ деформации $\tau_{\Delta\varepsilon'_{ВЭ}}$ после освобождения образца в эксперименте 1 на величину, равную $\varepsilon'_{ВЭ}$;

– величины остаточной ВЭ деформации $\varepsilon_{ост}$ через 20 мин после освобождения образца в экспериментах 1 и 2;

– величины восстановления ВЭ деформации $\Delta\varepsilon_{ВЭ \text{ восст}}$ после освобождения образцов в эксперименте 2.

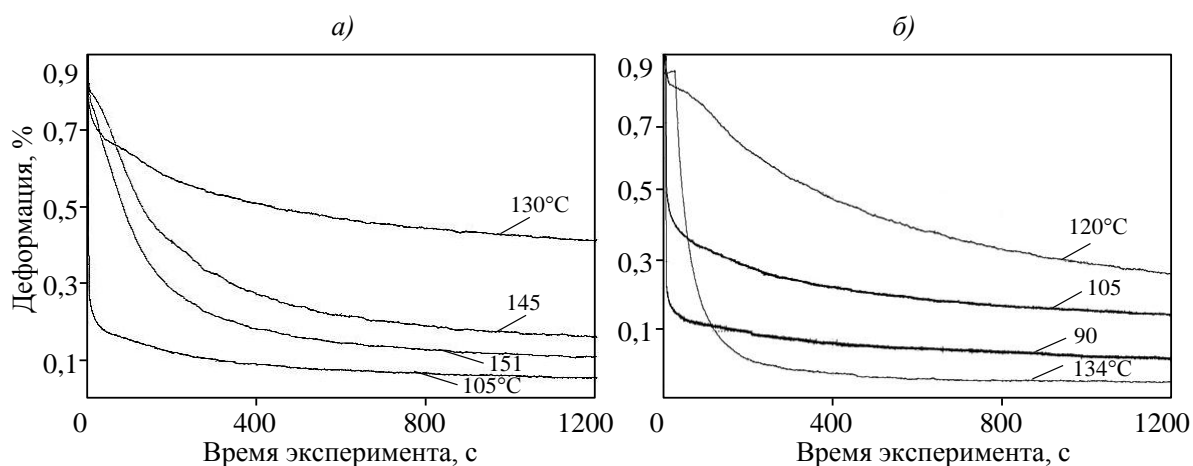


Рисунок 3. Спад ВЭ деформации после «мгновенного» снятия нагрузки в оргстеклах марок ВОС-2 (а) и СО-120 (б)

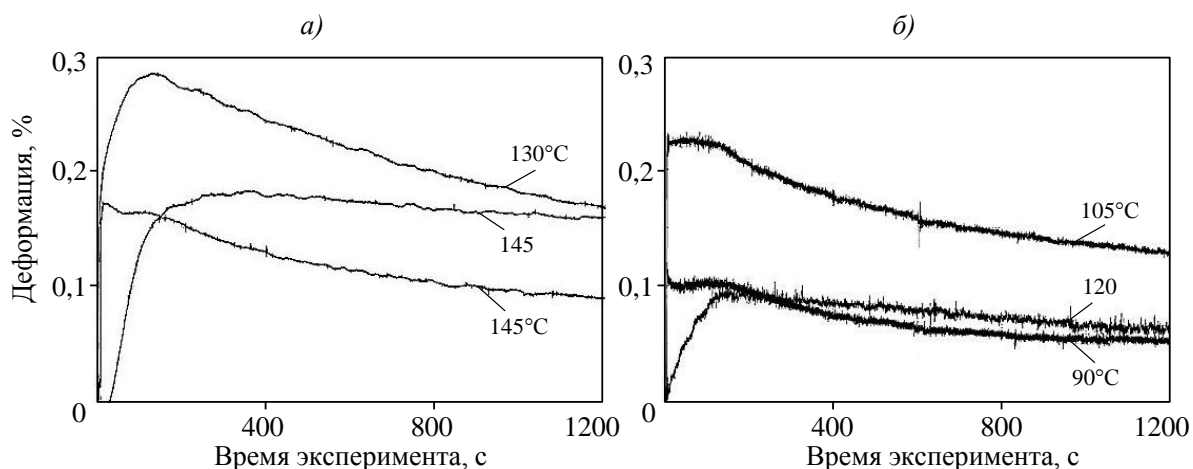


Рисунок 4. Спад ВЭ деформации после «принудительного» снятия нагрузки в оргстеклах марок ВОС-2 (а) и СО-120 (б)

**Данные экспериментов для случаев «мгновенного» (1)
и «принудительного» (2) снятия нагрузки**

Органическое стекло	Условный номер эксперимента	Температура испытаний, °С	$\varepsilon_{ВЭ} \cdot 10^3$	$\Delta \varepsilon'_{ВЭ} \cdot 10^3$	$\tau_{\Delta \varepsilon'_{ВЭ}}, \text{ с}$	$\Delta \varepsilon_{упр.раз} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{ост} \cdot 10^3$		$\Delta \varepsilon_{ВЭ \text{ восст}} \cdot 10^3$
							при $P=0$	через 1200 с	
СО-120	1	90	4,6	3,6	205	5,9	3,1	0,2	–
		105	5,5	2,6	218	3,8	5,2	1,5	–
		120	8,8	7,0	1361	0,2	8,8	2,6	–
		131	9,00	–	–	–	–	0	–
	2	90	3,3	2,1	–	–	2,0	0,5	1,1
		105	4,5	1,7	–	–	4,0	1,6	2,3
ВОС-2	1	105	4,7	2,2	188	4,4	3,0	0,6	–
		130	7,7	4,9	856	1,3	8,1	5,3	–
		145	8,9	8,0	1773	0,1	8,6	1,6	–
		151	9,0	–	–	–	–	1,1	–
	2	105	4,6	2,9	–	–	2,9	0,9	1,7
		130	7,8	5,6	–	–	6,9	1,7	2,8
		145	–	–	–	–	8,8	1,6	1,8
		–	–	–	–	–	–	–	–

На основании полученных данных следует отметить некоторые особенности спада ВЭ деформации при повышении температуры испытаний органических стекол до T_p :

- в процессе спада деформации выделяются две стадии, отмеченные в работе [21], – начальная, сравнительно быстрая и замедленная;
- продолжительность спада величины ВЭ деформации $\tau_{\Delta \varepsilon'_{ВЭ}}$, равной развившейся за время нагружения, увеличивается для обеих марок оргстекол;
- остаточная ВЭ деформация, определенная через 20 мин после освобождения образцов, имела довольно значительные величины, причем для обеих марок оргстекол с повышением температуры до 0,9–1,0 от T_p ее значения возрастали, а при температурах, превышающих T_p , снова снижались.

При температурах выше T_p в эксперименте 1 спад ВЭ деформации ускоряется, но не становится мгновенным. Через 100 с после освобождения образцов ВЭ деформация уменьшалась с 0,9 до 0,15% у оргстекла марки СО-120 и до 0,45% у оргстекла марки ВОС-2. Полный спад ВЭ деформации произошел у оргстекла марки СО-120 через 240 с, а у оргстекла марки ВОС-2 – через 600 с спад ВЭ деформации замедлился, и через 20 мин остаточная деформация составила 0,11%.

Обсуждение и заключения

Материалы экспериментов позволяют сделать следующие выводы, касающиеся определения температурных напряжений с учетом процессов спада ВЭ деформации в органическом остеклении при его нагреве выше температуры T_p :

– при нагреве внешних слоев остекления в полете до температуры $\geq T_p$ общие деформации в них, определяемые распределением температуры по толщине, переходят в ВЭ деформации;

– при режиме торможения самолета и охлаждения остекления до температуры T_p будет происходить с замедляющимся темпом спад ВЭ деформаций сжатия, возникших в слоях стекла при нагреве;

– при температуре слоев $\leq T_p$ (в момент смены полуцикла нагружения) остаточные ВЭ деформации в слоях равны общим деформациям в этих слоях, соответствующим распределению температуры по толщине остекления в момент смены полуцикла в данном слое.

Выявленные в экспериментах особенности спада ВЭ деформации в органических стеклах в процессе их разгрузки при температурах, близких к T_p , показывают целесообразность их учета при проектировании фонарей кабины перспективных самолетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП «ВИАМ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
2. Яковлев Н.О. Исследование и описание релаксационного поведения полимерных материалов (обзор) //Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 50–54.
3. Состав для получения органического стекла: пат. №2340630 Рос. Федерация; опубл. 01.08.2007.
4. Ткачук А.И., Гребенева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 07 (viam-works.ru).
5. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
6. Петров А.А., Климова С.Ф., Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Новые акрилатные органические стекла частично сшитой структуры //Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. 26. №4. С. 70–72.

7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
8. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Климова С.Ф., Богатов В.А. Новые «серебростойкие» органические стекла //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 45–48.
9. Состав для получения органического стекла: пат. №2277105 Рос. Федерация; опубл. 13.05.2005.
10. Петров А.А., Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Исследование особенностей изготовления деталей остекления из частично сшитых органических стекол //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 32–34.
11. Горелов Ю.П., Чмыхова Т.Г., Шалагинова И.А. Новые органические стекла для авиастроения //Пластические массы. 2009. №12. С. 20–22.
12. Мекалина И.В., Богатов В.А., Тригуб Т.С., Сентюрин Е.Г. Авиационные органические стекла //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 04 (viam-works.ru).
13. Яковлев Н.О., Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г. Особенности упруго-высокоэластического деформирования органических стекол линейной и редко сшитой структур //Материаловедение. 2015. №3. С. 16–22.
14. Яковлев Н.О. Влияние высокоэластической деформации на напряженно-деформированное состояние авиационных органических стекол: Автореф. дис. к.т.н. М. 2013. 24 с.
15. Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. Закономерности поведения ВЭ деформаций в авиационных стеклах из линейных и поперечносшитых полимеров при знакопеременных нагружениях //Авиационная промышленность. 2011. №3. С. 28–32.
16. Яковлев Н.О. Релаксационное поведение органического стекла на основе полиметилметакрилата //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. №5. Т. 81. С. 57–60.
17. Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Ерасов В.С., Сентюрин Е.Г., Тригуб Т.С. и др. Влияние эксплуатационных условий нагружения на упругопластические характеристики авиационного органического остекления //Авиационная промышленность. 2006. №2. С. 43–48.
18. Яковлев Н.О. Оценка границ области релаксационного поведения органического стекла на основе полиметилметакрилата //Пластические массы. 2015. №1–2. С. 36–39.

19. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Сентюрин Е.Г., Харитонов Г.М. Релаксация остаточных напряжений в авиационных органических стеклах при послеполетной стоянке самолета //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2 (23). С. 66–69.
20. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Сентюрин Е.Г., Харитонов Г.М. Комплекс методик оценки физико-механических характеристик органических стекол с учетом влияния высокоэластической деформации //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №10. С. 6–11.
21. Аржаков М.С. Обобщенное описание механических и релаксационных свойств полимерного стекла: Автореф. дис. д.х.н. М. 2004. 48 с.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies for aviation engineering] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530.
2. Jakovlev N.O. Issledovanie i opisanie relaksacionnogo povedenija polimernyh materialov (obzor) [Research and description of relaxation behavior of polymeric materials (review)] //Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 50–54.
3. Sostav dlja poluchenija organicheskogo stekla [Structure for receiving organic glass]: pat. №2340630 Ros. Federacija; opubl. 01.08.2007.
4. Tkachuk A.I., Grebeneva T.A., Chursova L.V., Panina N.N. Termoplastichnye svjazujushhie. Nastojashhee i budushhee [The thermoflexible binding. Present and future] //Trudy VIAM. 2013. №11. St. 07 (viam-works.ru).
5. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
6. Petrov A.A., Klimova S.F., Mekalina I.V., Sentjurin E.G., Bogatov V.A. Novye akrilatnye organicheskie stekla chastichno sshitoj struktury [New acrylate organic glasses of partially sewed structure] //Uspehi v himii i himicheskij tehnologii. 2012. T. 26. №4. S. 70–72.
7. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskij napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). S. 3–33.

8. Mekalina I.V., Sentjurin E.G., Klimova S.F., Bogatov V.A. Novye «serebrostojkie» organicheskie stekla [New «silver resistant» organic glasses] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 45–48.
9. Sostav dlja poluchenija organicheskogo stekla [Structure for receiving organic glass]: pat. №2277105 Ros. Federacija; opubl. 13.05.2005.
10. Petrov A.A., Mekalina I.V., Sentjurin E.G., Bogatov V.A. Issledovanie osobennostej izgotovlenija detalej osteklenija iz chastichno sshityh organicheskikh stekol [Research of features of manufacturing of details of glazing from partially sewed organic glasses] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 32–34.
11. Gorelov Ju.P., Chmyhova T.G., Shalaginova I.A. Novye organicheskie stekla dlja aviastroenija [New organic glasses for aircraft industry] //Plasticheskie massy. 2009. №12. C. 20–22.
12. Mekalina I.V., Bogatov V.A., Trigub T.S., Sentjurin E.G. Aviacionnye organicheskie stekla [Aviation organic glasses] //Trudy VIAM. 2013. №11. St. 04 (viam-works.ru).
13. Jakovlev N.O., Mekalina I.V., Sentjurin E.G. Osobennosti uprugo-vysokojelasticheskogo deformirovanija organicheskikh stekol linejnoj i redko sshitoj struktur [Features of elastic and high-elastic deformation of organic glasses of the linear and seldom sewed structures] //Materialovedenie. 2015. №3. S. 16–22.
14. Jakovlev N.O. Vlijanie vysokojelasticheskoj deformacii na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie aviacionnyh organicheskikh stekol [Influence of high-elastic deformation on intense the deformed condition of aviation organic glasses]: Avtoref. dis. k.t.n. M. 2013. 24 s.
15. Haritonov G.M., Hitrova O.I., Jakovlev N.O., Erasov V.S. Zakonomernosti povedenija VJe deformacij v aviacionnyh steklah iz linejnyh i poperechnosshityh polimerov pri znakoperemennyh nagruzhenijah [Patterns of behavior of VE of deformations in aviation glasses from linear and poperechnosshity polymers at sign-variable loadings] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2011. №3. S. 28–32.
16. Jakovlev N.O. Relaksacionnoe povedenie organicheskogo stekla na osnove polimetilmetakrilata [Relaxation behavior of organic glass on basis polimetilmetakrilata] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2015. №5. T. 81. S. 57–60.
17. Haritonov G.M., Hitrova O.I., Erasov V.S., Sentjurin E.G., Trigub T.S. i dr. Vlijanie jekspluatacionnyh uslovij nagruzhenija na uprugoplasticheskie harakteristiki aviacionnogo organicheskogo osteklenija [Influence of operational conditions of loading on elasto-

- plastic characteristics of aviation organic glazing] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2006. №2. S. 43–48.
18. Jakovlev N.O. Ocenka granic oblasti relaksacionnogo povedenija organicheskogo stekla na osnove polimetilmetakrilata [Assessment of borders of area of relaxation behavior of organic glass on basis polimetilmetakrilata] //Plasticheskie massy. 2015. №1–2. S. 36–39.
 19. Jakovlev N.O., Erasov V.S., Sentjurin E.G., Haritonov G.M. Relaksacija ostatochnyh naprjazhenij v aviacionnyh organicheskikh steklah pri poslepoletnoj stojanke samoleta [Relaxation of residual stresses in aviation organic glasses at postflight parking of airplane] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2 (23). S. 66–69.
 20. Jakovlev N.O., Erasov V.S., Sentjurin E.G., Haritonov G.M. Kompleks metodik ocenki fiziko-mehaničeskikh harakteristik organicheskikh stekol s uchetom vlijanija vysokojelasticheskoj deformacii [Complex of techniques of assessment of physico-mechanical characteristics of organic glasses taking into account high-elastic deformation influence] //Vse materialy. Jenciklopedičeskij spravocnik. 2013. №10. S. 6–11.
 21. Arzhakov M.S. Obobshhenoe opisanie mehaničeskikh i relaksacionnyh svojstv polimernogo stekla [The generalized description of mechanical and relaxation properties of polymeric glass]: Avtoref. dis. d.h.n. M. 2004. 48 c.