

УДК 629.735.33.023.26.015.4.

Г.М. Харитонов¹, Н.О. Яковлев², И.В. Мекалина²

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГСТЕКЛОЛ НА НАПРЯЖЕНИЯ В САМОЛЕТНОМ ОСТЕКЛЕНИИ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-56-60

Приведен анализ влияния физико-механических характеристик органических стекол: модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) – на величину напряжений в самолетном остеклении при аэродинамическом нагреве. Предложен вариант оптимальных температурных зависимостей величин модуля упругости и ТКЛР для минимизации остаточных и результирующих температурных напряжений.

Ключевые слова: самолетное остекление, органическое стекло, физико-механические характеристики, высокоэластическая деформация.

The influence of physical-mechanical properties of organic glasses, such as the elastic modulus and linear thermal expansion coefficient (LTEC), on the values of stress in aircraft glazing at aerodynamic heating is analyzed. The optimal temperature dependences of elastic modulus and LTEC to minimize the residual and resulting thermal stresses are proposed.

Keywords: aircraft glazing, organic glass, physical-mechanical properties, rubber-like elastic strain.

¹Открытое акционерное общество «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова» [Open Joint Stock Company «Flight Research Institute named after M.M. Gromov»] E-mail: info@lii.ru

²Федеральное 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 research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

В последние годы возникли определенные трудности с остеклением фонарей самолетов [1–9], выполняющих полеты с числами Маха $M > 2,25$. Существующие оргстекла имеют сравнительно низкую температуру размягчения t_p по сравнению со стеклами марок Э-2 и СО-200, выпуск которых прекратился. При эксплуатации изделий из силикатного стекла имеются свои проблемы, требующие решения, хотя и достигнут успех в увеличении предела их прочности в несколько раз.

Для органического остекления одной из основных проблем (с позиций прочности) являются большие эксплуатационные напряжения [10–14], выражаемые суммой

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\Gamma} + \sigma_{\kappa} + \sigma_{\Delta P} + \sigma_q + \sigma_{\text{рез}}^t, \quad (1)$$

где σ_{Γ} – напряжения, создаваемые давлением гермошланга; σ_{κ} – напряжения, создаваемые деформациями каркаса; $\sigma_{\Delta P}$ – напряжения, создаваемые избыточным давлением воздуха в кабине; σ_q – напряжения, создаваемые аэродинамической нагрузкой; $\sigma_{\text{рез}}^t$ – результирующие температурные напряжения.

В свою очередь, $\sigma_{\text{рез}}^t$ в i -м элементарном слое остекления в k -й момент N -го полета определяется суммой

$$\begin{aligned} (\sigma_{i,k}^t)_{\text{рез}}^N &= (\sigma_{i,k}^t)_{\text{упр}}^N + (\sigma_{i,k}^t)_{\text{ВЭ}}^N + (\sigma_{i,k}^t)_{\text{ост.т.м}}^{N-1} = \\ &= \frac{E_{i,k}}{1-\mu} \left[(\varepsilon_{i,k}^N)_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{ВЭ},i,k}^N + (\varepsilon_{i,k}^{N-1})_{\text{ост.т.м}} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

где $(\sigma_{i,k}^t)_{\text{упр}}^N$ – термоупругие напряжения в k -й момент N -го полета; $(\sigma_{i,k}^t)_{\text{ВЭ}}^N$ – напряжения, релаксировавшие к k -му моменту N -го полета; $(\sigma_{i,k}^t)_{\text{ост.т.м}}^{N-1}$ – остаточные температурные напряжения после предыдущего полета; $E_{i,k}$ – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; $(\varepsilon_{i,k}^N)_{\text{упр}}$ – термоупругая деформация; $\varepsilon_{\text{ВЭ},i,k}^N$ – суммарная высокоэластическая деформация, возникшая в i -м слое в полувцикле сжатия при нагреве остекления и полувцикле растяжения при его охлаждении; $(\varepsilon_{i,k}^{N-1})_{\text{ост.т.м}}$ – остаточная деформация после предыдущего полета.

Как показывает опыт, первые четыре слагаемых в выражении (1) обычно не превышают в сумме 4–6 МПа, т. е. 80–90% от $\sigma_{\Sigma, \text{max}}$ приходится на результирующие температурные напряжения.

Материалы и методы

Обеспечение прочностной надежности органического остекления должно решаться комплексно – как за счет повышения температуры t_p , имеющей прямое отношение к величине напряжений, и предела прочности стекол, так и путем снижения результирующих температурных напряжений. Если не вводить ограничения на режимы полета, как это было сделано в свое время для самолета МиГ-25, то для снижения остаточных и температурных напряжений остаются возможности, создаваемые физико-механическими характеристиками оргстекла. Из данных рис. 1, на котором приведены зависимости модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) от температуры, видно, что у различных марок стекол имеются существенные различия – особенно в области высоких температур, близких к температуре размягчения t_p .

Результаты

Выполнено моделирование результирующих температурных напряжений на наружных поверхностях бокового остекления из оргстекла марки Э-2 козырька самолета МиГ-25 (в одном из полетов с $M_{max} \geq 2,7$ при летных испытаниях остекления) и остекления откидной части фонаря из оргстекла марки ВОС-2 при тех же условиях полета, но число M_{max} было ограничено величиной 2,6. Результаты моделирования оказались весьма показательными (табл. 1).

При незначительном различии в превышении наружной температурой $t_{нар\max}$ температуры t_p в

остеклении откидной части фонаря из оргстекла марки ВОС-2 все напряжения оказались значительно больше, чем в остеклении козырька из оргстекла марки Э-2, и в основном из-за большей величины остаточных напряжений. Наибольшие остаточные температурные напряжения образуются в слое остекления у наружной поверхности толщиной до ~1,5 мм. На рис. 2 показано распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ по толщине лобового стекла козырька самолета МиГ-25 после выполнения 8 полетов с $M > 2,6$ при летных испытаниях, определенных экспериментально способом узких прорезей, и остаточных температурных напряжений $\sigma'_{ост,т_m}$, полученных с помощью моделирования. Следует заметить, что остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ определялись как средние величины сначала для слоев стекла толщиной 4 мм, затем 2 мм, а при моделировании они определялись для слоев толщиной 0,5 мм, а у поверхности – в слое толщиной 0,25 мм.

Указанное распределение остаточных напряжений объясняется повышенной активностью релаксационных процессов в стекле у наружной поверхности.

Рассмотрение результирующих температурных напряжений, выраженных через составляющие деформации (2), показывает, что их снижение может быть достигнуто путем уменьшения величины модуля упругости.

Термоупругая деформация $(\epsilon_{i,k}^N)_{упр}$ определяется неравномерностью распределения температуры по толщине остекления и ТКЛР стекла. Неравномерность распределения температуры может быть уменьшена путем снижения толщины стекла, повы-

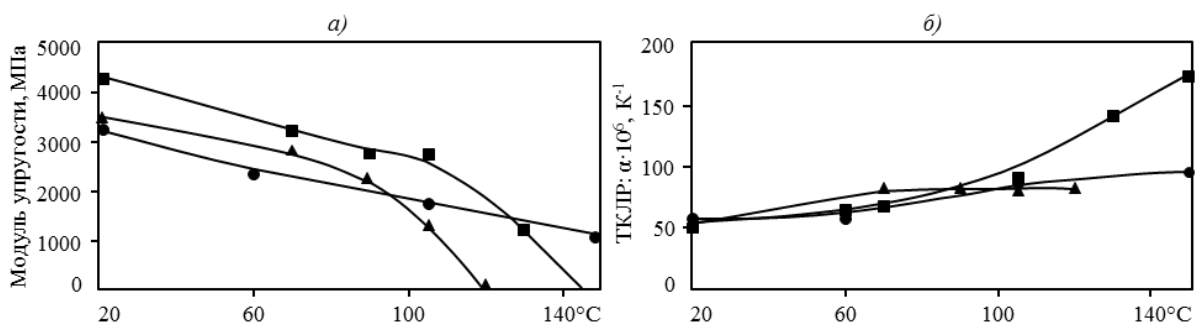


Рис. 1. Температурные зависимости модуля упругости (а) и температурного коэффициента линейного расширения – ТКЛР (б) для органических стекол марок СО-120 (▲), Э-2 (●) и ВОС-2 (■)

Таблица 1

Результаты моделирования термоупругих и остаточных напряжений в элементе остекления из органических стекол

Оргстекло (элемент остекления)	t_p	$t_{нар\max}$	$\sigma'_{упр\max}$	$\sigma'_{ост,т_m}$	$\sigma'_{рез\max}$
	°C		МПа		
Э-2 (боковой козырек)	180	182,6	23,5	22,2	56,0
ВОС-2 (откидная часть фонаря)	145	148,4	30,3	37,8	76,3

Рис. 2. Распределение по толщине лобового стекла из оргстекла марки Э-2 козырька самолета МиГ-25 остаточных напряжений, полученных экспериментально ($\sigma_{ост}$) и с помощью моделирования ($\sigma'_{ост.т.м}$)

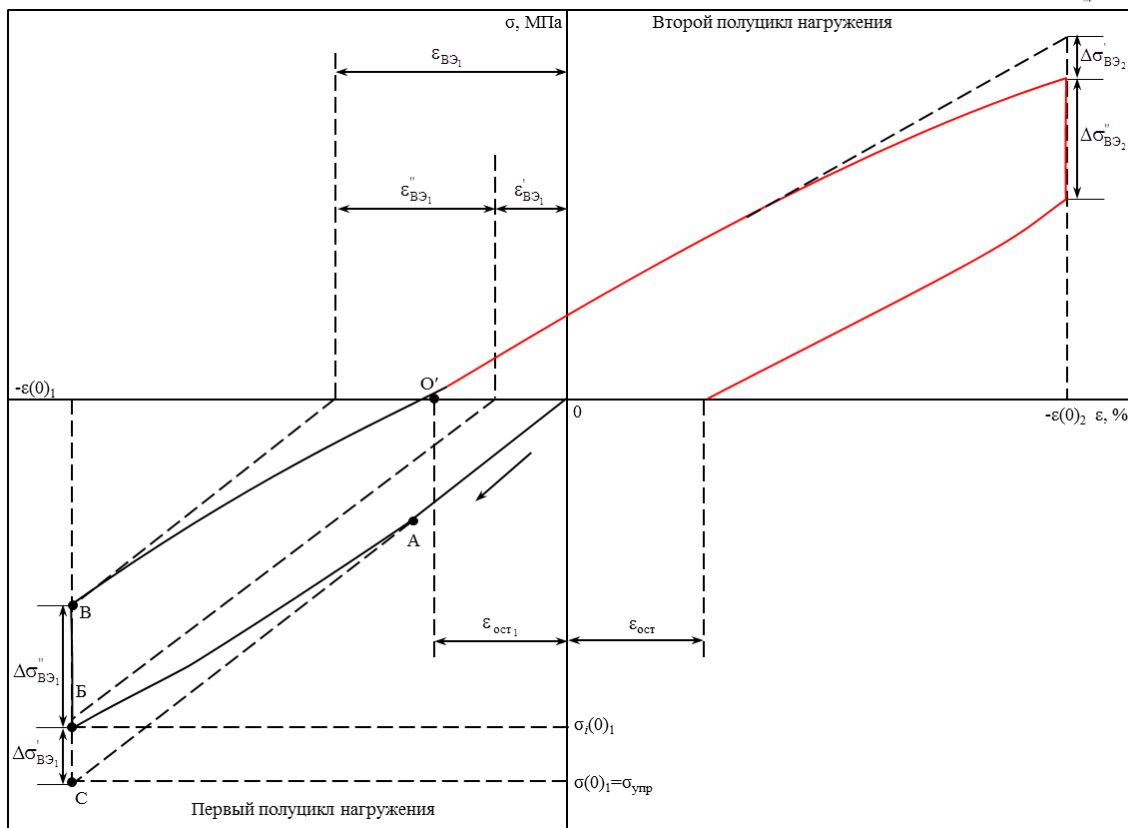
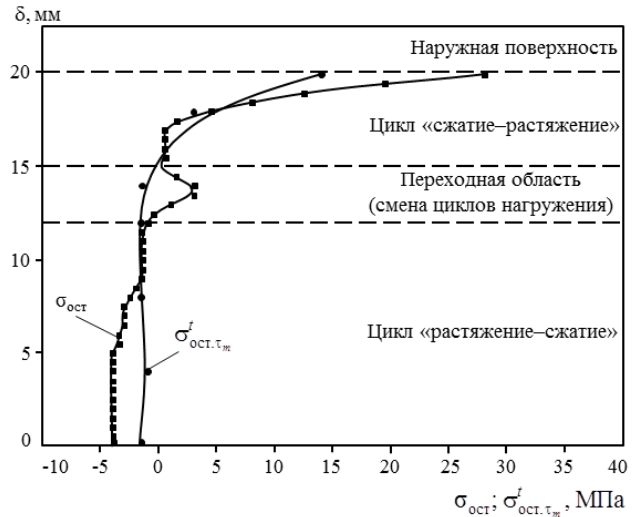


Рис. 3. Типовая диаграмма деформирования оргстекла в цикле нагружения при постоянной температуре

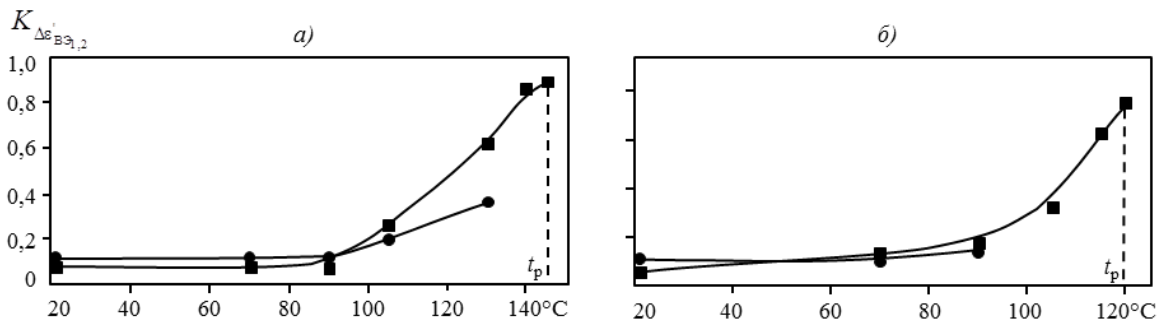


Рис. 4. Температурные зависимости угловых коэффициентов для первого (■) и второго (●) полуциклов нагружения для органических стекол марок ВОС-2 (а) и СО-120 (б)

пением его теплопроводности, но и то, и другое приведет к повышению температуры внутренней поверхности остекления и к снижению его жесткости при растяжении, что нежелательно. Наиболее реальной является возможность снижения величин ТКЛР.

Деформация $\varepsilon_{BЭ,i,k}^N$ является суммой высокоэластических (ВЭ) деформаций остекления, возникших в i -м слое в первом полуцикле нагружения при нагреве остекления и во втором полуцикле – при его охлаждении. Последнее видно при анализе типовой диаграммы деформирования органического стекла (рис. 3), полученной при постоянной температуре $t < (t_p - 30)^\circ\text{C}$ [15–19]. На нелинейном участке АБ в процессе нагружения развивается ВЭ деформация $\Delta\varepsilon'_{BЭ_1}$ и соответствующее ей релаксировавшие напряжения $\Delta\sigma'_{BЭ_1}$. При постоянной величине $\varepsilon(0)_1$ развивается ВЭ деформация $\Delta\varepsilon''_{BЭ_1}$, которой соответствуют релаксировавшие напряжения $\Delta\sigma''_{BЭ_1}$. При разгрузке стекла происходит частичный спад ВЭ деформации, однако он происходит существенно медленней, чем ее развитие при нагружении. В результате при разгрузке в стекле образуется остаточная деформация после первого полуцикла нагружения:

$$\varepsilon_{ост1} = \varepsilon_{BЭ_1} \cdot K_{\varepsilon_{ост1}} = (\Delta\varepsilon'_{BЭ_1} + \Delta\varepsilon''_{BЭ_1}) \cdot K_{\varepsilon_{ост1}}, \quad (3)$$

где $K_{\varepsilon_{ост1}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий частичный спад ВЭ деформации при разгрузке в первом полуцикле.

Второй полуцикл нагружения начинается в точке O' и в нем также возникает ВЭ деформация $\varepsilon_{BЭ_2} = \Delta\varepsilon'_{BЭ_2} + \Delta\varepsilon''_{BЭ_2}$, которая суммируется с остаточной ВЭ деформацией после первого полуцикла.

Аналогичным циклам нагружения «сжатие–растяжение» в полете подвергаются и слои остекления у наружной поверхности, с той лишь разницей, что первые полуциклы нагружения происходят при высокой температуре на режиме разгона и полета с M_{max} , а вторые полуциклы – при охлаждении остекления на режиме торможения. При понижении температуры развитие и спад ВЭ деформации замедляется, и поэтому для условий эксплуатации авиационной техники выполняются условия

$$|\varepsilon_{BЭ_1}| > |\varepsilon_{BЭ_2}| \quad \text{и} \quad |\varepsilon_{ост1}| > |\varepsilon_{ост2}|, \quad (4)$$

что и определяет величины результирующих температурных напряжений на режиме торможения и остаточных напряжений после полета.

Отметим одну особенность развития ВЭ деформации за время нагружения, которую можно представить линейной зависимостью для первого и второго полуциклов

$$\Delta\varepsilon'_{BЭ_{1,2}} = a_{1,2} + K_{\Delta\varepsilon'_{BЭ_{1,2}}} \cdot \varepsilon(0)_{1,2}, \quad (5)$$

где $a_{1,2}$ – коэффициенты для первого и второго полуциклов соответственно (малые величины); $K_{\Delta\varepsilon'_{BЭ_{1,2}}}$ – угловые коэффициенты для постоянной температуры для первого и второго полуциклов соответственно; $\varepsilon(0)_{1,2}$ – общая деформация для первого и второго полуциклов соответственно.

На рис. 4 показано изменение указанных коэффициентов в первом и втором полуциклах в стеклах марок СО-120 и ВОС-2 в зависимости от температуры. Видно, что при повышении температуры интенсивность развития ВЭ деформации при нагружении возрастает медленно, но при $t \geq (t_p - 30)^\circ\text{C}$ резко повышается и при $t < (t_p - 5)^\circ\text{C}$ почти вся общая деформация переходит в ВЭ за время нагружения. При $t > t_p$ ВЭ деформация соответствует общей деформации, а при разгрузке стекла и снижении температуры ВЭ деформация следует за общей деформацией, но с некоторым отставанием. При понижении температуры слоя ниже t_p происходит смена полуцикла и ВЭ деформация переходит во второй полуцикл в качестве остаточной деформации $\varepsilon_{ост1}$ с положительным знаком. Понятно, что в случае превышения температуры t_p существенно возрастает остаточная деформация $\varepsilon_{ост1}$, ее величина зависит от величины общей деформации $\varepsilon(0)_1$, которая, как отмечалось ранее, зависит от значений ТКЛР стекла.

Последняя составляющая результирующей температурной деформации – остаточная деформация $(\varepsilon_{i,k}^{N-1})_{ост,t_m}$, которая определяется в основном величиной остаточной деформации $\varepsilon_{ост1}$, возникшей в i -м слое после первых полуциклов в предыдущих полетах. Она также зависит от температуры i -го слоя, температуры t_p и от значений ТКЛР стекла.

В итоге кроме температуры t_p установлены две характеристики стекла – значения модуля упругости $E(t)$ и ТКЛР: $\alpha(t)$, при уменьшении которых могут быть снижены остаточные и результирующие температурные напряжения в самолетном остеклении.

Для оценки степени влияния характеристик $E(t)$ и $\alpha(t)$ на напряжения в остеклении, кроме уже приведенного выше расчета напряжений на поверхности остекления откидной части фонаря из стекла марки ВОС-2, выполнены еще два варианта расчета для тех же условий полета:

- с уменьшенными величинами $E(t)$ на 20% по сравнению с исходным вариантом;
- с использованием таких же значений ТКЛР, как у стекла марки Э-2 (см. рис. 1, б).

Величина $t_{нарmax}$ для всех случаев расчета принята $148,4^\circ\text{C}$. По результатам расчетов видно, что (табл. 2):

- снижение модуля упругости на 20% привело к уменьшению на 22–24% величины термоупругих, остаточных и результирующих температурных напряжений, но остаточные ВЭ деформации после первого полуцикла $\varepsilon_{ост1}$ и в конце цикла $\varepsilon_{BЭ}$ практически не изменились;
- уменьшение величины ТКЛР при $t > 105^\circ\text{C}$ до значений $\alpha(t)$ как у стекла марки Э-2 оказалось более эффективным, хотя термоупругие напряжения не изменились, но остаточные напряжения снизились на 59% и результирующие – на 35%. Такое снижение объясняется значительным уменьшением общей деформации, соответствен-

Таблица 2

Результаты моделирования напряжений и деформаций в элементе остекления из органического стекла

Вариант	$\sigma_{упрmax}^t$	$\sigma_{ост.т.н}^t$	$\sigma_{резmax}^t$	$\varepsilon_{ост1} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{вэ} \cdot 10^3$
	МПа				
Исходные значения	30,3	37,8	76,3	10,3	6,54
Значения $E(t)$ снижены на 20%	23,8	29,6	57,8	10,0	6,40
Значения $\alpha(t)$ как у оргстекла марки Э-2	29,7	15,6	49,3	4,2	2,70

но ВЭ и остаточной деформации $\varepsilon_{ост1}$ после первого полупериода, а также суммарной, по существу «пластической», деформации $\varepsilon_{вэ}$ в конце полета ($\varepsilon_{вэ}$ включает $\varepsilon_{ост1}$ и величину $\varepsilon_{ост2}$ в конце второго полупериода).

Обсуждение и заключения

Таким образом, наряду с повышением температуры размягчения и предела прочности при растяжении значительный эффект в обеспечении несущей способности органического остекления по напряжениям может быть достигнут снижением остаточных $\sigma_{ост}$ и результирующих температурных напряжений $\sigma_{резmax}^t$ за счет уменьшения величин ТКЛР, особенно при $t > (t_p - 30)^\circ\text{C}$, и значений модуля упругости при $t \leq 50^\circ\text{C}$, при которых возникают максимальные напряжения на режиме торможения самолета.

Однако следует учесть, что значительное

уменьшение модуля упругости (как и теплопроводности стекла) нежелательно, поскольку снижается жесткость стекла при растяжении, что может привести к возникновению чрезмерных остаточных деформаций вытяжки вследствие развития в остеклении деформаций ползучести под воздействием избыточного давления в кабине при повышенной температуре. Вероятно, оптимальной при температуре 20°C может быть величина модуля упругости 3300–3500 МПа как у оргстекла марок СО-120 и Э-2, но этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

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

- Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Климова С.Ф., Богатов В.А. Новые «серебистой» органические стекла //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 45–48.
- Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Тригуб Т.С., Климова С.Ф. Модифицированные органические стекла для перспективной авиационной техники //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №2. С. 2–4.
- Состав для получения органического стекла: пат. 2340630 Рос. Федерация; опубл. 01.08.2007.
- Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
- 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.
- Состав для получения органического стекла: пат. 2277105 Рос. Федерация; опубл. 13.05.2005.
- Богатов В.А., Тригуб Т.С., Мекалина И.В., Айзатулина М.К. Оценка эксплуатационных характеристик новых теплостойких органических стекол ВОС-1 и ВОС-2 //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 21–26.
- Мекалина И.В., Богатов В.А., Тригуб Т.С., Сентюрин Е.Г. Авиационные органические стекла //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 04 (viam-works.ru).
- Горелов Ю.П., Чмыхова Т.Г., Шалагинова И.А. Новые органические стекла для авиационной техники //Пластические массы. 2009. №12. С. 20–22.
- 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.
- 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. С. 66–69.
- Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Сальников Н.Д. и др. Температурные напряжения в авиационном органическом остеклении, работающем в области упругопластических деформаций //Авиационная промышленность. 2007. №4. С. 53–57.
- Яковлев Н.О. Влияние высокоэластической деформации на напряженно-деформированное состояние авиационных органических стекол: автореф. дис. ... к.т.н. М.: ВИАМ. 2013. 24 с.
- Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Ерасов В.С. и др. Влияние эксплуатационных условий нагружения на упругопластические характеристики авиационного органического стекла //Авиационная промышленность. 2006. №2. С. 43–48.
- Яковлев Н.О. Исследование и описание релаксационного поведения полимерных материалов (обзор) //Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 50–54.
- Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. Закономерности поведения ВЭ деформаций в авиационных стеклах из линейных и поперечно сшитых полимеров при знакопеременных нагружениях //Авиационная промышленность. 2011. №3. С. 28–32.
- Яковлев Н.О. Оценка границ области релаксационного поведения органического стекла на основе полиметилметакрилата //Пластические массы. 2015. №1–2. С. 36–39.
- Яковлев Н.О. Релаксационное поведение органического стекла на основе полиметилметакрилата //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. №5. С. 57–60.
- 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.