

УДК 620.1:629.4.023.18

Н.О. Яковлев¹, И.В. Мекалина¹, Г.М. Харитонов², О.И. Хитрова²**ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ
В ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ
В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-10-10

Экспериментально исследованы особенности развития деформаций и напряжений в органическом стекле линейной структуры (СО-120, температура размягчения $T_g=120^\circ\text{C}$) и сополимерном органическом стекле частично-сшитой структуры (ВОС-2, $T_g=148^\circ\text{C}$), а также в их ориентированных модификациях – АО-120 (степень ориентации 60 и 79%) и ВОС-2АО (степень ориентации 50%) соответственно, в условиях неравномерного нагрева по толщине. Показано, что величины высокоэластической деформации при нагреве, термоупругих и остаточных температурных напряжений в органическом остеклении в значительной степени зависят от значений модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) стекла. Стеснение ориентированного стекла, аналогичное стеснению элементарных слоев остекления при его неравномерном нагреве, оказывает значительное влияние на развитие усадочных деформаций в слоях. Эти деформации вызывают увеличение напряжений растяжения при охлаждении и остаточных температурных напряжений.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: органическое стекло, полиметилметакрилат, релаксационное поведение, высокоэластическая деформация.

The strain and stress evolution characteristics of the organic glass with linear (SO-120, $T_g=120^\circ\text{C}$) and copolymer rarely cross-linked structures (VOS-2, $T_g=148^\circ\text{C}$) and oriented versions thereof – AO-120 (orientation degree 60 and 79%) and VOS-2AO (orientation degree 50%), accordingly, at a non-uniform heating across the thickness, were investigated. It was shown that the rubber-like elastic strain by heating, thermoelastic and residual temperature stress in organic glazing in a large extent depend on the modulus of elasticity and coefficient of linear expansion of the glass. The oriented glass tightness similar to the tightness of the elementary layers of glazing at non-uniform heating has a significant impact on the development of shrinkage strain in the layers. These deformations cause an increase in tensile stresses during cooling and residual temperature stress.

This work was performed as part of the comprehensive scientific areas 2.2. «Qualification and materials research» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: organic glass, polymethylmethacrylate, relaxation behavior, rubber-like elastic strain.

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 research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Акционерное общество «Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова» [Joint Stock Company «Flight Research Institute named after M.M. Gromov»]; e-mail: info@lii.ru

Введение

Знание особенностей упруго-высокоэластического поведения органических стекол при нагружении в условиях полета необходимо для объективной оценки прочностной надежности органического остекления при эксплуатации [2–6]. Эти особенности и их влияние на физико-механические характеристики должны учитываться при разработке новых стекол для высокоскоростных самолетов [7–13].

Как известно, наружный поверхностный слой остекления в сверхзвуковом полете подвергается циклическому нагружению – сжатию при нагреве и растяжению при охлаждении [13–15]. Возникающие в стекле деформации и напряжения определяются в основном неравномерностью распределения температуры по толщине. На режиме разгона и полета с максимальным числом Маха (рис. 1, а) максимальны деформации сжатия и минимальны напряжения (возникают максимальные отрицательные напряжения), в свою очередь на режиме торможения (рис. 1, б) деформации сравнительно невелики при наибольших положительных напряжениях.

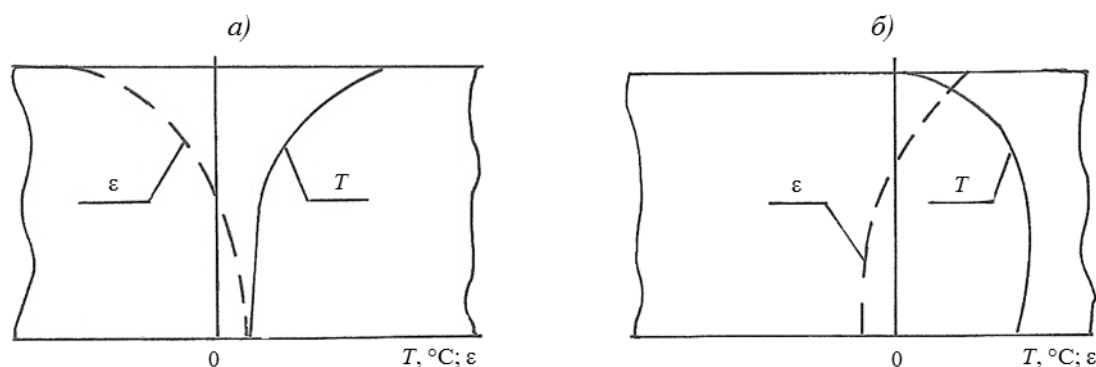


Рис. 1. Распределение температуры и деформации по толщине остекления на режиме разгона и полета (а), а также на режиме торможения (б)

В процессе нагружения в поверхностном слое развиваются:

- термоупругая деформация $\varepsilon_{\text{упр}}^T$ – квазилинейные участки диаграммы в первом и втором полуциклах нагружения [13];
- высокоэластическая деформация, соответствующая релаксировавшим температурным напряжениям $\Delta\sigma'_{\text{ВЭ},2}$ за время нагружения и $\Delta\sigma''_{\text{ВЭ},2}$ при выдержке при заданной постоянной деформации $\varepsilon(0)_{1,2}=\text{const}$.

Полная деформация слоя в первом полуцикле определяется как

$$-\varepsilon(0)_1 = -\varepsilon_{\text{упр}}^T - \Delta\varepsilon'_{\text{ВЭ}} - \Delta\varepsilon''_{\text{ВЭ}} = -\varepsilon_{\text{упр}}^T - \varepsilon_{\text{ВЭ}}.$$

Аналогично – во втором полуцикле.

Высокоэластическая (ВЭ) деформация, развивающаяся за время нагружения ($\Delta\varepsilon'_{\text{ВЭ}}$), является функцией полной деформации в полуцикле и температуры слоя. При температуре $\geq T_g$ термоупругая деформация полностью переходит в ВЭ за время нагружения. Поскольку первый цикл нагружения происходит при высоких температурах, то в нем возникают наибольшие высокоэластические и остаточные температурные деформации сжатия $\varepsilon_{\text{ост1}}$. Величина $\varepsilon_{\text{ост1}}$ определяет в основном величину остаточных температурных напряжений растяжения на наружной поверхности остекления. На остаточные напряжения, как и на термоупругие, значительное влияние оказывают физико-механические характеристики стекла, особенно температурный коэффициент линейного расширения α (ТКЛР) и модуль упругости E , которым при разработке стекол не

всегда уделяется должное внимание. Для сравнения на рис. 2 показаны зависимости указанных характеристик от температуры для стекол СО-120, Э-2 и ВОС-2. Видно, что у стекла ВОС-2 при температурах 20–70°С, при которых обычно возникают максимальные термоупругие напряжения ($\sigma_{\text{упр.мах}}^T$), модуль упругости почти на 30% больше, чем у стекол СО-120 и Э-2; ТКЛР при температурах >100°С, при которых резко возрастает интенсивность развития ВЭ деформаций, также оказывается значительно больше, чем у стекол Э-2 и СО-120. Это приводит к значительному увеличению напряжений.

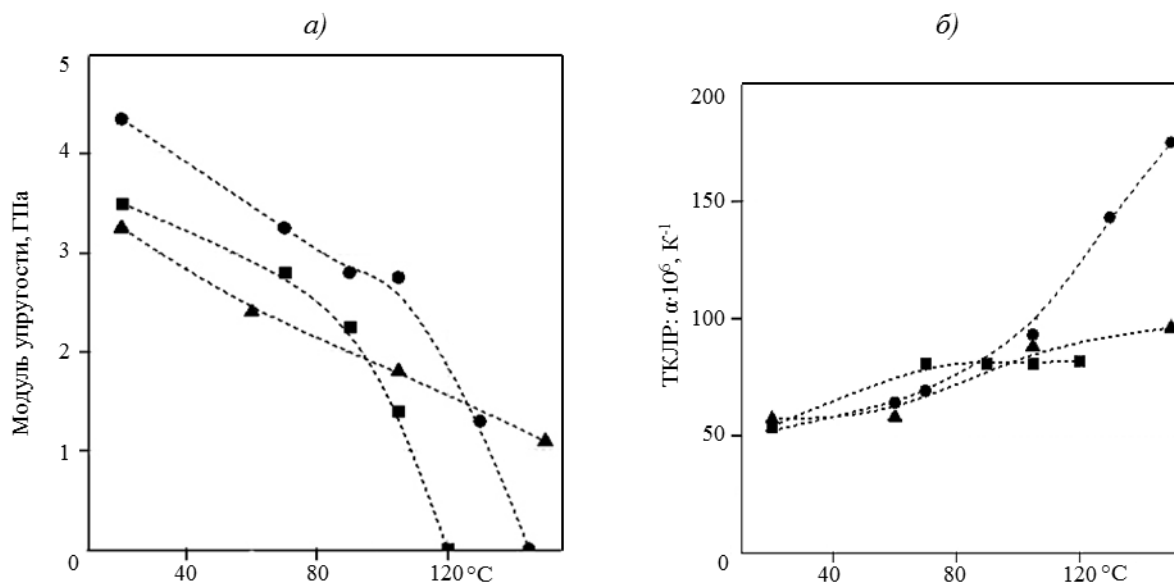


Рис. 2. Температурные зависимости модулей упругости (а) и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) (б) для органических стекол СО-120А (■), ВОС-2 (●) и Э-2 (▲)

В табл. 1 приведены в качестве примера величины максимальных термоупругих, результирующих и остаточных температурных напряжений на наружных поверхностях бокового стекла козырька из Э-2 и остекления откидной части фонаря из ВОС-2, полученные с помощью моделирования при условиях реального полета скоростного самолета. Приведены также температуры размягчения T_g и максимальные наружные температуры $T_{\text{нар.мах}}$ стекол в полете. При приблизительно одинаковом превышении значения $T_{\text{нар.мах}}$ над значениями T_g значительное увеличение результирующих напряжений $\sigma_{\text{рез.мах}}^T$ у стекла ВОС-2 связано как с большим модулем упругости, так и особенно с существенно большими значениями ВЭ деформации в первом полуцикле и остаточными температурными напряжениями. При таких же значениях ТКЛР у стекла ВОС-2 как у стекла Э-2 напряжения $\sigma_{\text{рез.мах}}^T$ снизились бы на 27 МПа [15].

Таблица 1

Результаты моделирования термоупругих, результирующих и остаточных температурных напряжений в стеклах ВОС-2 и Э-2

Стекло	$T_g, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{нар.мах}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{упр.мах}}^T, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{ост}}^T, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{рез.мах}}^T, \text{ МПа}$
Э-2	180	182,6	23,5	22,2	56,0
ВОС-2	148	148,4	30,3	37,8	76,3

У остекления из ориентированного стекла в дополнение к термоупругим и ВЭ деформациям добавляются еще и усадочные деформации $\epsilon_{\text{ус}}$. С использованием

тензометрии установлено, что незначительные усадочные деформации $\varepsilon_{yc} \leq 0,1 \cdot 10^{-3}$ возникают в свободных стеклах марок: АО-120 – при температуре $\sim 75^\circ\text{C}$, ВОС-2АО – при температуре $\sim 100^\circ\text{C}$. Резкое увеличение значений ε_{yc} происходит у стекла АО-120 при температуре $\sim 95^\circ\text{C}$, у стекла ВОС-2АО со степенью ориентации 50% – при температуре $\sim 105^\circ\text{C}$, а со степенью ориентации 15% – при температуре $\sim 125^\circ\text{C}$. Изменение усадочных деформаций с ростом температуры показано на рис. 3.

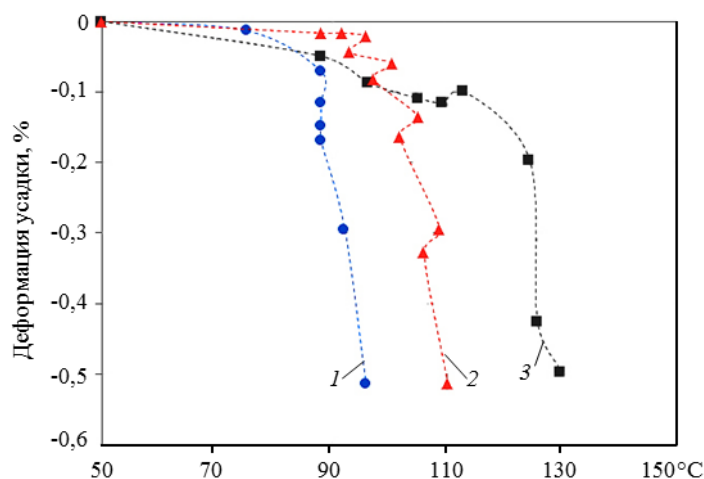


Рис. 3. Изменение усадочных деформаций с ростом температуры в стеклах марок АО-120 (1) и ВОС-2АО со степенью ориентации 50 (2) и 15% (3)

При возникновении усадочных деформаций появляется ряд вопросов об их влиянии на напряженно-деформированное состояние ориентированного остекления в полете, а именно:

- каковы величины усадочных напряжений при различных температурах и происходит ли их релаксация;
- влияют ли усадочные деформации растяжения, возникающие при неравномерном по толщине нагреве остекления, на снижение ВЭ деформаций сжатия в первом полупереме и, соответственно, на $\sigma_{ост}^T$ растяжения в остеклении после полета.

Предполагалось, что развитие ВЭ деформации за время нагружения будет нейтрализоваться усадочной деформацией. Но поскольку величина последней значительно больше, чем ВЭ деформация, развивающаяся за время нагружения, то потребовалось проверить – не повышает ли она напряжения растяжения на поверхности остекления при его охлаждении, что является негативным эффектом.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования – органические стекла на основе полиметилметакрилата марок СО-120 (линейная структура, $T_g=120^\circ\text{C}$) и ВОС-2 (частично-сшитая структура, $T_g=148^\circ\text{C}$), а также их ориентированные модификации – марок АО-120 (степени ориентации 60 и 79%) и ВОС-2АО (степень ориентации 50%) соответственно.

Все испытания проводили на универсальной электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z050 с номинальной нагрузкой 50 кН, оснащенной воздушным термокриокабинетом.

Для контроля продольной деформации использовали макродатчик деформации с классом точности 1,0 по EN ISO 9513. Ножи датчика прижимались к поверхностям образца с усилием не более 1 Н. База замера деформации составляла 70 мм. Образцы имели форму полосы шириной 50 мм и длиной 230 мм. Толщина образцов составляла 4 мм –

для стекол СО-120 и АО-120 (60%), 5 мм – для стекла АО-120 (79%), 10 мм – для стекол ВОС-2 и ВОС-2АО (50%).

Контроль температуры осуществляли по показаниям термопар. Одна из них была закреплена на образце и изолирована от окружающего воздушного пространства, другая устанавливалась в объеме термокриокабинета на расстоянии 50 мм от центра образца.

Эксперименты со всеми образцами проводили по следующей схеме. Образец зажимали в захватах испытательной машины. Одновременно с началом нагрева с постоянной скоростью 2°C/мин до заданной температуры (115°C – для стекол СО-120 и АО-120; 130°C – для стекол ВОС-2 и ВОС-2АО) начинали нагружение образца растяжением с постоянной скоростью деформирования, связанной с изменением температуры, до заданной деформации $\varepsilon'_{\text{зад}}$. По достижении заданной температуры нагрев и нагружение останавливали и выдерживали образец при постоянной деформации в течение 5 мин. Затем образец интенсивно охлаждали до комнатной температуры и одновременно разгружали до нулевой деформации со скоростью, также связанной с изменением температуры. После выдержки в течение 60 мин при нулевой деформации образец разгружали до нулевого значения по нагрузке и выдерживали не менее 60 мин.

В экспериментах измеряли: температуру образца, величины деформации $\varepsilon^{1,2}$ и напряжений $\sigma^{1,2}$ в процессе нагрева и охлаждения до начальной температуры (индекс 1 – образец из ориентированного стекла, индекс 2 – из неориентированного стекла), остаточные напряжения $\sigma^{1,2}_{\text{ост}}$ сразу после снижения деформации $\varepsilon'_{\text{зад}}$ до нуля и после снижения температуры образца до исходной, а также остаточные деформации $\varepsilon^{1,2}_{\text{ост}}$ после освобождения образцов из захватов, соответствующие

$$\varepsilon^{1,2}_{\text{ост}} = -(\varepsilon^{1,2}_{\text{ост}} - \varepsilon^{1,2}_{\text{ус}}).$$

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов со свободными образцами ориентированных стекол показали, что с уменьшением степени ориентации интенсивность развития усадочных деформаций снижается. Если при высокой степени ориентации развитие этой деформации происходит на режимах нагрева и выдержки при постоянной температуре, а также при повторных нагревах, то при малой степени ориентации ее развитие происходит при первом нагреве и в основном на режиме повышения температуры.

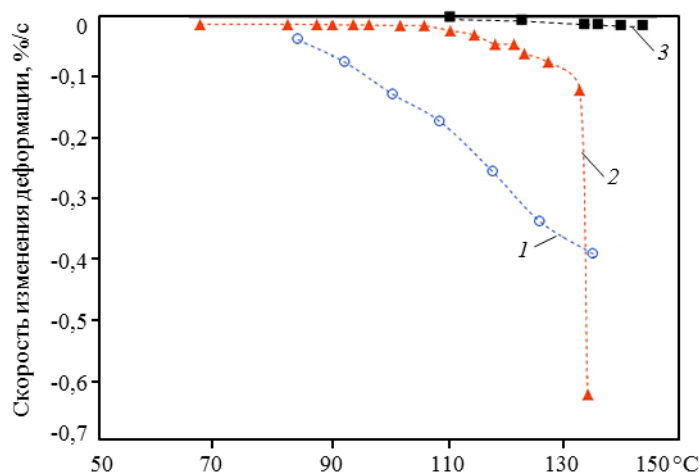


Рис. 4. Изменение скорости развития высокоэластической деформации за время нагружения (1) с ростом температуры и скорости развития усадочных деформаций в стекле марки ВОС-2АО со степенью ориентации 50% (2) и 15% (3)

При нагреве стекол до температуры $<T_g$ скорость развития усадочной деформации ниже скорости развития ВЭ деформации, развивающейся за время нагружения (рис. 4). При малой степени ориентации, например, для стекла ВОС-2АО (15%), скорость развития усадочной деформации становится еще меньше.

При температуре $>T_g$ скорость развития усадочной деформации повышается и при высокой степени ориентации, вероятно, превысит скорость развития ВЭ деформации, развивающейся за время нагружения.

Таким образом, можно полагать, что при нагреве до температуры $\leq T_g$ в ориентированном остеклении общие и развивающиеся за время нагружения ВЭ деформации сжатия в полете успеют достичь значительных величин до появления существенных усадочных деформаций и последние не могут заметно снизить остаточные температурные напряжения растяжения в поверхностном слое остекления.

Предполагалось, что в процессе нагрева стесненного поверхностного слоя ориентированного остекления, при неравномерном распределении температуры по его толщине, усадочные напряжения будут определяться величинами усадочной деформации, которые будут такими же, как и в свободном стекле при той же температуре, и модулем упругости в этом слое.

Для определения этих напряжений свободные образцы из стекла ВОС-2АО (50%) нагревали до заданных температур (115, 125 и 135°C), после чего фиксировали в захватах и выдерживали длительное время при постоянной температуре и деформации с измерением возникающей нагрузки, вызванной усадочной деформацией. Усадочные деформации, возникающие в процессе нагрева образцов до их фиксации в захватах, не учитывали, что снижало величины усадочных напряжений σ_{yc} . В начале выдержки σ_{yc} росли сравнительно быстро, а затем их рост замедлялся. В табл. 2 представлены величины $\sigma_{yc,max}$, полученные после выдержки в течение 5,5 ч, и соответствующие им (при одноосном нагружении) деформации. Приведены также величины усадочных деформаций, полученные после 40 мин выдержки такого же, но свободного образца при тех же температурах.

Таблица 2

**Величина усадочной деформации в стекле ВОС-2АО
при его испытании в стесненном и свободном состояниях**

$T_{зад}, ^\circ C$	$E, МПа$	$\sigma_{yc}, МПа$ (выдержка ~20000 с)	$\varepsilon_{yc} \cdot 10^3$, соответствующая σ_{yc}	
			в стесненном образце	в свободном образце (выдержка 2400 с)
115	2150	1,16	0,54	0,5
125	1600	1,06	0,66	2,85
135	760	1,07	1,4	>6

Полученные результаты показали, что в зажатом (стесненном) ориентированном стекле развитие ε_{yc} отличается от их развития при нагреве свободного стекла – оно происходит медленнее и величины ε_{yc} (при одинаковой температуре и времени выдержки) при постоянной заданной температуре оказываются меньше, чем у свободного стекла. С ростом температуры – это различие увеличивается.

Полученные при выдержке и после охлаждения напряжения σ_{yc} оказались весьма малыми, их релаксация за время выдержки не была отмечена. Если учесть усадочные деформации, возникшие на режиме нагрева, то суммарная величина усадочных напряжений вряд ли превысит напряжения от избыточного давления в кабине самолета.

Поскольку после фиксации образца в захватах, в нем возникала только ε_{yc} , то для уточнения влияния стеснения ориентированного стекла на их развитие и на уменьшение в стекле остаточных температурных напряжений проводили эксперименты, более полно воспроизводящие условия деформирования элементарного слоя остекления в полете.

При неравномерном нагреве ориентированного остекления в полете полная деформация i -го элементарного слоя включает составляющие

$$\varepsilon_{рез}^i = -\varepsilon_{упр}^i + \varepsilon_p^i - \varepsilon_{ср.р}^i + \varepsilon_{ус} = -\alpha_c(t)\Delta t_i + \varepsilon_{ср.упр}^i + \varepsilon_p^i - \varepsilon_{ср.р}^i + \varepsilon_{ус},$$

где $\varepsilon_{упр}^i$ – термоупругая деформация i -го слоя; $\varepsilon_{ср.упр}^i$ – температурная деформация остекления; ε_p^i – ВЭ деформация в i -м слое; $\varepsilon_{ср.р}^i$ – величина, на которую уменьшится деформация $\varepsilon_{ср.упр}^i$ вследствие релаксации напряжений в i -м слое при нагреве.

Для образцов из неориентированных стекол в уравнении будут те же составляющие деформаций, что и в уравнении для элементарного слоя ориентированного остекления за исключением $\varepsilon_{ус}$.

Сравнение величин напряжений σ^1 и σ^2 при одинаковых температурах образцов каждой пары при нагреве и охлаждении дает возможность оценить влияние $\varepsilon_{ус}$ на общие ВЭ деформации в первом полуцикле и на остаточные напряжения после охлаждения образцов.

На рис. 5 показано изменение температуры и напряжений в образцах из стекол АО-120 (79%) и СО-120 при их нагреве, выдержке и охлаждении. Видно, что у образца из стекла СО-120 с ростом температуры снижаются напряжения сжатия вследствие их релаксации и уменьшается модуль упругости стекла, а при охлаждении происходит смена их знака и образование остаточных температурных напряжений.

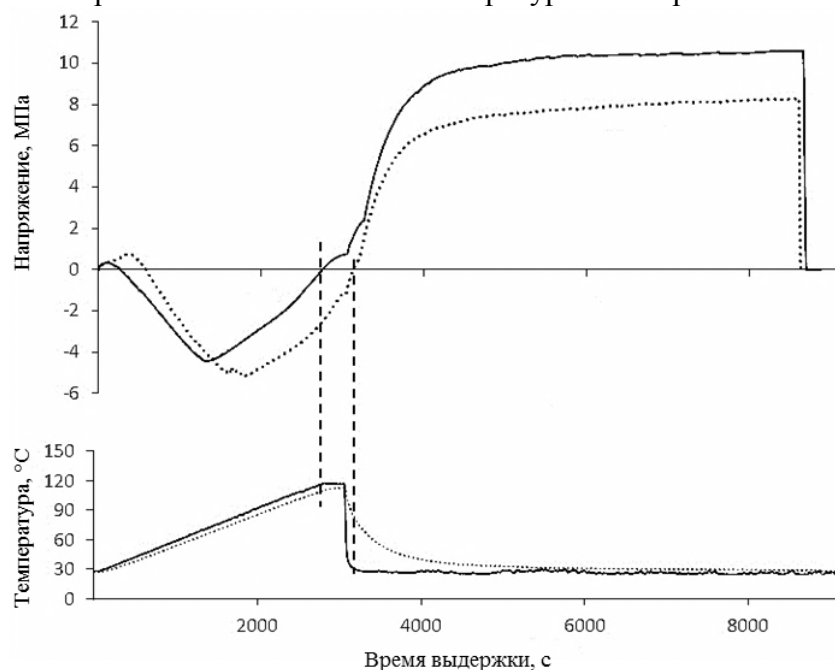


Рис. 5. Изменение во времени температуры и напряжения в образцах из стекол СО-120 (.....) и АО-120 (—) при их нагреве в условиях, воспроизводящих развитие температурных деформаций в элементарном слое остекления в полете

У образца из стекла АО-120 при нагреве напряжения сжатия оказываются меньше, чем у образца из стекла СО-120, вследствие развития усадочных напряжений растяжения, влияние которых сказалось на более ранней смене знака, на увеличении напряжений растяжения при охлаждении образца и остаточных напряжений, представлявших собой сумму:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{ост}^t + \sigma_{ус.ост}$$

Аналогичное изменение напряжений (рис. 6) происходит и в эксперименте с образцами из стекол ВОС-2АО (50%) и ВОС-2, условия нагрева и охлаждения которых также совпадали. Можно заметить, что у стекла ВОС-2АО несколько позже, чем у стекла АО-120, начинается снижение напряжений сжатия, позже происходит смена знака напряжений и они имеют меньшие величины, в том числе и остаточных напряжений. Это связано с различием температур нагрева обоих пар образцов, у стекол АО-120 и СО-120 максимальная температура нагрева составляла 113°C при $T_g=120^\circ\text{C}$, а у стекол ВОС-2АО и ВОС-2: 121°C при $T_g=148^\circ\text{C}$. У второй пары образцов происходило менее интенсивное развитие как ВЭ деформаций, так и усадочных деформаций.

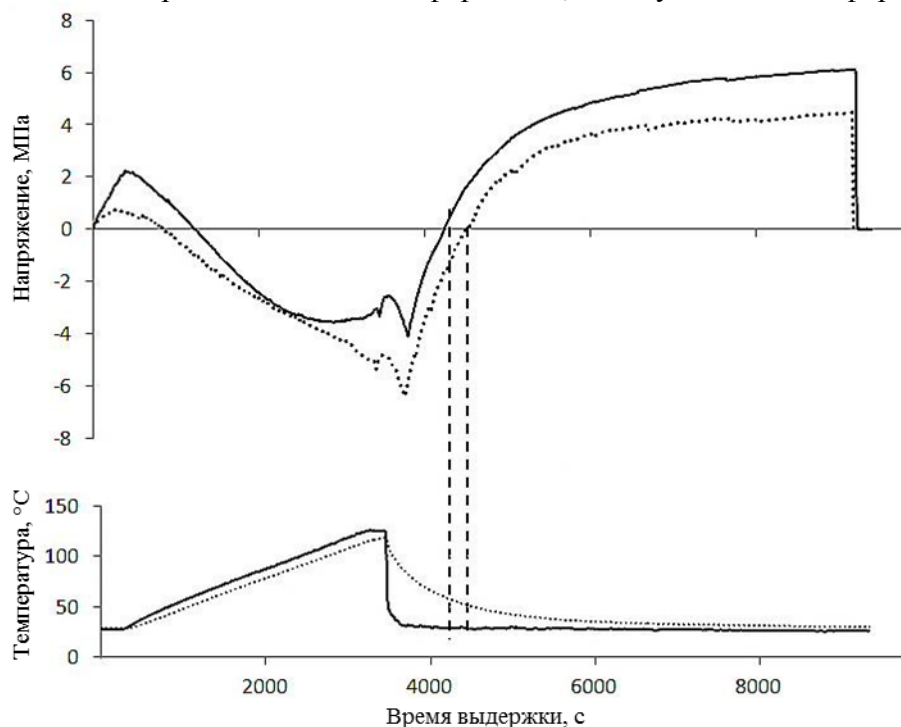


Рис. 6. Изменение во времени температуры и напряжения в образцах из стекол ВОС-2 (·····) и ВОС-2АО (—) при их нагреве в условиях, воспроизводящих развитие температурных деформаций в элементарном слое остекления в полете

В табл. 3 приведены величины максимальных температур образцов при их нагреве, остаточных напряжений, остаточных и усадочных деформаций, полученных после охлаждения образцов.

Таблица 3

Экспериментально определенные величины остаточных деформаций и напряжений для стекол СО-120 и ВОС-2 и их ориентированных модификаций

Стекло	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{ост}}^{1,2}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{\text{ост}}^{1,2} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{\text{ус}} \cdot 10^3$
АО-120 (79%)	112,7	10,6	4,1	~0,8
СО-120	108,7	8,2	3,3	—
Соотношение величин $\sigma_{\text{ост}}^{1,2}$	—	$\sigma_{\text{ост}}^1 > \sigma_{\text{ост}}^2$	$\varepsilon_{\text{ост}}^1 > \varepsilon_{\text{ост}}^2$	—
ВОС-2АО (50%)	118,7	6,1	1,9	~0,5
ВОС-2	121,2	4,4	1,4	—
Соотношение величин $\sigma_{\text{ост}}^{1,2}$	—	$\sigma_{\text{ост}}^1 > \sigma_{\text{ост}}^2$	$\varepsilon_{\text{ост}}^1 > \varepsilon_{\text{ост}}^2$	—

Сравнение величин напряжений в образцах из ориентированных и неориентированных стекол при нагреве и охлаждении показывает, что возникновение усадочных деформаций растяжения в ориентированных стеклах хотя и снижает напряжения сжатия при нагреве, но при этом вызывает увеличение напряжений растяжения при охлаждении и остаточных напряжений того же знака. Полученные результаты также подтвердили, что наличие стеснения ориентированного стекла снижает интенсивность развития и величину усадочных деформаций.

Как известно, прочностная надежность органического остекления определяется его несущей способностью по напряжениям и деформациям. Основной проблемой в настоящее время являются высокие эксплуатационные напряжения растяжения. Однако следует заметить, что для ориентированных стекол высокие напряжения не являются критичными вследствие больших величин деформации до их разрушения по сравнению с неориентированными стеклами. Максимальные температурные напряжения в поверхностном слое остекления возникают на режиме торможения, когда температура этого слоя составляет $\sim 30^{\circ}\text{C}$. Разрушение ориентированных стекол АО-120 и ВОС-2АО при комнатной температуре происходит при деформациях $>15\%$ [8], что в несколько раз превышает деформацию, при которой происходит разрушение неориентированных стекол СО-120А и ВОС-2. Такие деформации могут возникнуть в стекле только от избыточного давления в кабине при очень высокой температуре остекления, но это уже будет относиться к обеспечению несущей способности остекления по деформациям, а не по напряжениям, что и является основной проблемой для ориентированных стекол. При этом следует учитывать, что приведенную величину деформации для ориентированных стекол определяли при скоростях нагружения больших, чем те, которые реализуются при эксплуатации. Хотя для термопластов снижение скорости нагружения обычно приводит к росту величины деформации до разрушения, тем не менее данный вопрос требует отдельного внимания.

Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- величины ВЭ деформаций при нагреве, термоупругих и остаточных температурных напряжений в органическом остеклении в значительной степени зависят от температурных зависимостей значений модуля упругости и ТКЛР стекла;
- стеснение ориентированного стекла, аналогичное стеснению элементарных слоев остекления при его неравномерном нагреве, оказывает значительное влияние на развитие усадочных деформаций в слоях, которые вызывают увеличение напряжений растяжения при охлаждении и остаточных температурных напряжений;
- при разработке теплостойких органических стекол для обеспечения прочностной надежности остекления, наряду с повышением температуры размягчения, необходимо также стремиться к снижению величин модуля упругости и ТКЛР в диапазоне рабочих температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Яковлев Н.О. Исследование и описание релаксационного поведения полимерных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С. 50–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-50-54.

3. Яковлев Н.О. Оценка границ области релаксационного поведения органического стекла на основе полиметилметакрилата // Пластические массы. 2015. №1–2. С. 36–39.
4. 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.
5. Яковлев Н.О., Сентюрин Е.Г., Харитонов Г.М. Особенности спада высокоэластической деформации в органических стеклах в процессе их разгрузки при температурах, близких к температуре размягчения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-12-12.
6. Харитонов Г.М., Яковлев Н.О., Мекалина И.В. Влияние физико-механических характеристик оргстеклол на напряжения в самолетном остеклении при аэродинамическом нагреве // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S1. С. 56–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-56-60.
7. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
8. Мекалина И.В., Богатов В.А., Тригуб Т.С., Сентюрин Е.Г. Авиационные органические стекла // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №11. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2016).
9. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
10. 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.
11. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
12. Яковлев Н.О. Описание деформационных кривых полимерных стекол // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2017. Т. 59. №3. С. 1–6.
13. 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. 7.
14. Yakovlev N.O., Mekalina I.V., Sentyurin E.G. Peculiarities of resilient highly elastic deformation of organic glasses with linear and rarely cross-linked structure // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. Vol. 6. No. 4. P. 336–342. DOI: 10.1134/S2075113315040267.
15. Каблов Е.Н., Яковлев Н.О., Харитонов Г.М., Мекалина И.В. Особенности релаксационного поведения полимерных стекол на основе полиметилметакрилата и их учет при прочностном расчете авиационного остекления // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №9. С. 2–9.