

Н.О. Яковлев¹, В.С. Ерасов¹, Е.Г. Сентюрин¹, Г.М. Харитонов²

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В АВИАЦИОННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ ПРИ ПОСЛЕПОЛЕТНОЙ СТОЯНКЕ САМОЛЕТА

Для органических стекол марок СО-120 и ВОС-2 экспериментально исследован процесс релаксации напряжений растяжения путем развития высокоэластической (ВЭ) деформации и процесс релаксации остаточных напряжений при послеполетной стоянке самолета, связанный с исчезновением ВЭ деформации. Установлено, что процессы релаксации остаточных напряжений в стеклах различной структуры существенных различий не имеют, а закономерность релаксации остаточных напряжений, полученных при температурах эксплуатации, близких к температуре размягчения стекла, близка к закономерности релаксации напряжений растяжения при комнатной температуре.

Ключевые слова: высокоэластическая деформация, остаточные напряжения, релаксация, органическое стекло.

N.O. Yakovlev¹, V.S. Erasov¹, E.G. Sentyurin¹, G.M. Kharitonov²

RESIDUAL STRESS RELAXATION IN AIRCRAFT ORGANIC GLASSES AT THE POST-FLIGHT

The tensile stress relaxation process was experimentally studied by developing the high-elastic deformation (HED) for CO-120 and VOS-2 organic glasses along with the residual stress relaxation process associated with the HED disappearance during the aircraft post-flight rest. It was stated, that the significant differences were not observed during the residual stress relaxation processes in glasses of various structures and the relaxation regularity of residual stresses, produced at the service temperature close to the glass softening one was closely approximating to the regularity of the tensile stress relaxation at the room temperature.

Keywords: high-elastic deformation, residual stresses, relaxation, organic glass.

¹ Федеральное 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

² Открытое акционерное общество «Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова» [Open Joint Stock Company «Flight Research Institute named after MM Gromov»] E-mail: gromov@ntsi.mtu-net.ru.

Известно, что условия эксплуатации высокоскоростных самолетов могут приводить к возникновению на внешней поверхности остекления остаточных напряжений, возникающих вследствие деформирования при нагреве остекления [1]. Экспериментально подтверждено [2], что остаточные напряжения растяжения в остеклении фонаря могут достигать 17 МПа после нескольких нагревов. Их появление связано с тем, что релаксационные процессы при нагреве стекла проходят интенсивнее, чем восстановительные при охлаждении на режиме торможения самолета.

За время стоянки самолета остаточные напряжения будут релаксировать вследствие исчезновения оставшейся после полета части высокоэластической (ВЭ) деформации. Возникают вопросы: одинаковы ли при одной и той же температуре процессы релаксации остаточных напряжений растяжения и напряжений сжатия, возникших при нагружении органического стекла, полностью ли релаксируют остаточные напряжения в органических стеклах на основе линейных и частично-сшитых полимеров за ограниченное время или процесс релаксации затухает при достижении определенных величин напряжения.

Предложенная ранее методика [3, 4] циклического знакопеременного нагружения по жесткому режиму (с управлением по деформации) образцов органических стекол позволяет получать кривые релаксации напряжений, связанные с развитием ВЭ деформации во всем эксплуатационном диапазоне температур. В свою очередь, получение кривых релаксации остаточных напряжений – процесс трудоемкий, поскольку требует проведения экспериментов, имитирующих условия полета и последующей стоянки самолета. Каждый такой эксперимент одновременно сочетает в себе нагружение и разгрузку по жесткому режиму, с выдержками при постоянной деформации и постоянных напряжениях и изменением температуры.

В связи с этим для проведения комплексного моделирования поведения остекления летательных аппаратов в условиях эксплуатации и, в частности, моделирования релаксации остаточных напряжений в органическом остеклении за время стоянки самолета после полета с нагревом остекления до температуры размягчения T_p , проведены эксперименты для сравнения закономерностей релаксации напряжений при развитии ВЭ деформации и релаксации остаточных напряжений после полета. В случае их идентичности представляет интерес возможность использования кривых релаксации, определяемых в полуциклах циклического знакопеременного нагружения образцов стекол при комнатной температуре, при моделировании релаксации остаточных напряжений.

Эксперименты проводились на образцах в виде лопаток с прямоугольным сечением 10×10 мм из органических стекол марок СО-120 (линейный полимер, $T_p=120^\circ\text{C}$) и ВОС-2 (полимер с частично сшитой структурой, $T_p=150^\circ\text{C}$). В экспериментах при комнатной температуре образцы нагружались сжатием до степени деформации ε_0 : 0,5; 0,8 и 1,2%, при которой выдерживались в течение 600–1200 с, за которые в них успевала развиться ВЭ деформация (протекал процесс релаксации напряжений сжатия). После чего проводилась разгрузка до деформации $\varepsilon=0$ с получением остаточных напряжений, релаксацию которых при постоянной деформации $\varepsilon=0$ и фиксировали. В экспериментах при повышенной температуре образцы нагревались до заданной температуры с последующим нагружением сжатием до деформации $\varepsilon_0=0,25\%$, при которой выдерживались в течение 600 с (рис. 1, а). Затем при фиксированном напряжении проводилось охлаждение до комнатной температуры, с последующей разгрузкой до полного снятия остаточных деформаций. В результате чего в образце получали остаточные напряжения растяжения $\sigma(0)_{\text{ост}}$, релаксацию которых при постоянной деформации и фиксировали.

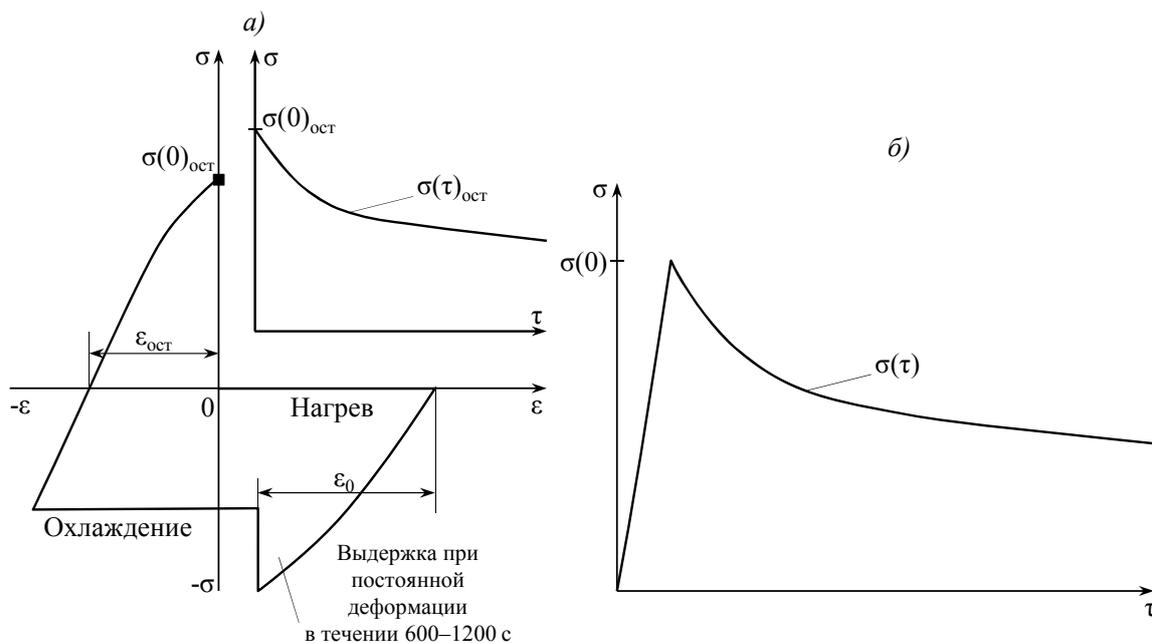


Рис. 1. Экспериментальные кривые релаксации остаточных напряжений $\sigma(0)_{\text{ост}}$ (а) и напряжений за счет развития высокоэластической деформации $\sigma(\tau)_{\text{ост}}$ (б)

Затем для снятия остаточных напряжений образец подвергался отжигу при той же температуре, что и в предыдущем эксперименте. Через сутки (после «отдыха») тот же образец подвергался растяжению до создания напряжения $\sigma(0)=\sigma(0)_{\text{ост}}$ и при полученной постоянной деформации выдерживался не менее 600 с с записью кривой релаксации напряжений $\sigma(\tau)$ (рис. 1, б).

Проведенные эксперименты показали, что кривые $\sigma(\tau)_{\text{ост}}$ и $\sigma(\tau)$, полученные при комнатной температуре, существенно различаются. Остаточные напряжения в обоих органических стеклах релаксируют быстрее и полностью, причем за сравнительно короткое время. Так, за первые 600 с при начальных деформациях сжатия до 1,2% релаксация остаточных напряжений, которую можно представить в виде отношения $\frac{\sigma(0)_{\text{ост}} - \sigma(\tau)_{\text{ост}}}{\sigma(0)_{\text{ост}}}$, достигает ~90%. Релаксация напряжений вследствие развития ВЭ деформации при растяжении оргстекла за это время достигает ~10–20% в зависимости от начальной заданной деформации (рис. 2).

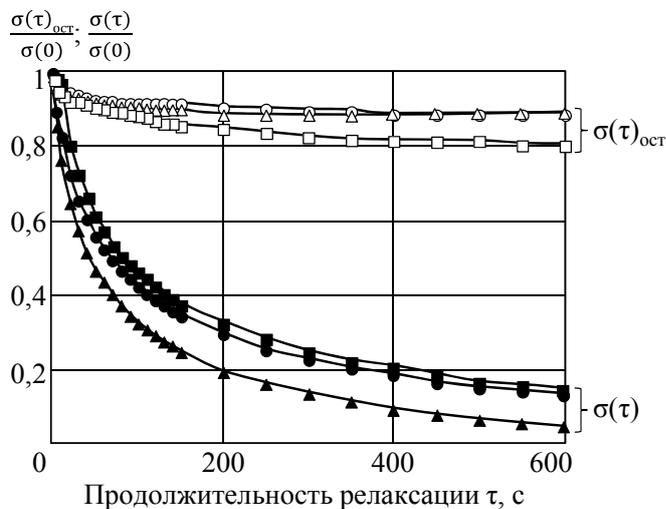


Рис. 2. Релаксация остаточных напряжений $\sigma(\tau)_{\text{ост}}$ (сжатие при комнатной температуре) и напряжений растяжения $\sigma(\tau)$ в оргстекле ВОС-2 при степени деформации ϵ_0 , %: 0,5 (Δ , \blacktriangle); 0,8 (\square , \blacksquare); 1,2 (\circ , \bullet)

Сравнение кривых $\sigma(\tau)_{\text{ост}}$, полученных после сжатия образцов при повышенных температурах, и кривых $\sigma(\tau)$, полученных при комнатной температуре, показало, что с повышением температуры при сжатии кривые сближаются и при температуре $T \geq (T_p - 15^\circ\text{C})$ – для стекла СО-120 и $T \geq (T_p - 30^\circ\text{C})$ – для стекла ВОС-2 практически совпадают (рис. 3). Также с повышением температуры при сжатии релаксация остаточных напряжений при комнатной температуре снижается и при температуре $T \approx (T_p - 25^\circ\text{C})$ составляет 20%, стабилизируясь через ~ 600 с с начала релаксации.

Таким образом, установлено, что процессы релаксации остаточных напряжений в оргстеклах СО-120 и ВОС-2 существенных различий не имеют, а закономерность релаксации остаточных напряжений, полученных при температурах при сжатии, близких к T_p , близка к закономерности релаксации напряжений растяжения при комнатной температуре.

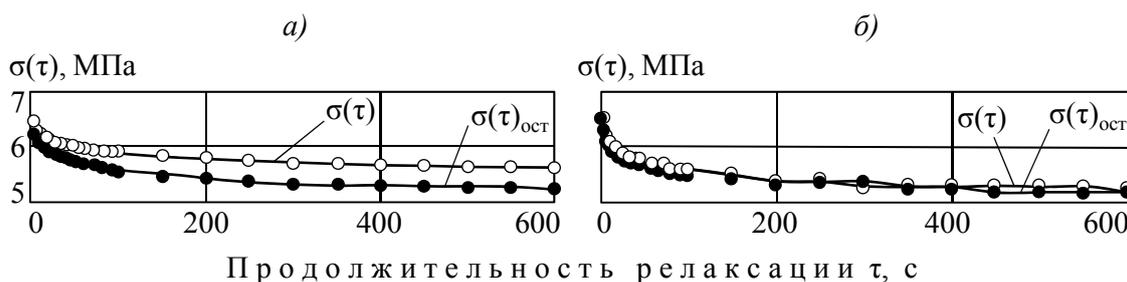


Рис. 3. Релаксация остаточных напряжений $\sigma(\tau)_{\text{ост}}$ (сжатие при температуре $(T_p - 15^\circ\text{C})$ – для оргстекла СО-120 и $(T_p - 30^\circ\text{C})$ – для ВОС-2) и напряжений растяжения $\sigma(\tau)$ в оргстеклах СО-120 (а) и ВОС-2 (б)

Полученные результаты показали возможность использования кривых $\sigma(\tau)$, определенных во вторых полуциклах нагружения (растяжения) образцов оргстекла при комнатной температуре, для моделирования релаксации остаточных напряжений в органическом остеклении за время стоянки самолета после полета с нагревом остекления до $T \geq (T_p - 15^\circ\text{C})$.

Полученные материалы позволяют доработать методику моделирования результирующих и остаточных напряжений [3] в целях повышения точности получаемых результатов, возможности ее применения к изделиям остекления из линейных и частично сшитых полимеров в расширенном диапазоне температур.

В работе активное участие принимала сотрудница ФГУП «ЛИИ им. М.М. Громова» О.И. Хитрова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Ерасов В.С. и др. Влияние эксплуатационных условий нагружения на упругопластические характеристики авиационного органического остекления //Авиационная промышленность. 2006. № 2. С. 43–48.
2. Харитонов Г.М., Хитрова О.И. Напряженно-деформированное состояние монослойного остекления фонарей самолетов //Авиационная промышленность. 1993. № 5–6. С. 55–60.
3. Харитонов Г.М., Хитрова О.И. и др. Температурные напряжения в авиационном органическом остеклении, работающем в области упругопластических деформаций //Авиационная промышленность. 2007. № 4. С. 53–57.
4. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Харитонов Г.М. Методика определения упругих, высокоэластических и пластических характеристик органического стекла /В сб. материалов III Международной конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». 2009. Т. 2. С. 272–273.

REFERENCES LIST

1. Haritonov G.M., Hitrova O.I., Erasov B.C. i dr. Vlijanie jekspluacionnyh uslovij nagruzhenija na uprugoplasticheskie karakteristiki aviacionnogo organicheskogo osteklenija [Influence of operational loading conditions on the elastic-plastic characteristics of organic aviation glazing] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2006. №2. S. 43–48.
2. Haritonov G.M., Hitrova O.I. Naprjazhenno-deformirovanoe sostojanie monoslojnogo osteklenija fonarej samoletov [Stress-strain state of a monolayer glass lanterns aircraft] //Aviacionnaja promyshlennost'. 1993. №5–6. S. 55–60.
3. Haritonov G.M., Hitrova O.I. i dr. Temperaturnye naprjazhenija v aviacionnom organicheskom osteklenii, rabotajushhem v oblasti uprugoplasticheskikh deformacij [Thermal stresses in the aviation organic glazing, working in the field of elastic-plastic deformation] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2007. №4. S. 53–57.
4. Jakovlev N.O., Erasov V.S., Haritonov G.M. Metodika opredelenija uprugih, vysokojelasticheskikh i plasticheskikh karakteristik organicheskogo stekla [Methods of determining the elastic, highly elastic and plastic characteristics of organic glass] /V sb. Materialov III Mezhdunarodnoj konf. «Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov». 2009. T. 2. S. 272–273.