



УДК 666.162:629.12.011.83

## **АВИАЦИОННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СТЕКЛА**

И.В. Мекалина

*кандидат технических наук*

В.А. Богатов

*кандидат технических наук*

Т.С. Тригуб

Е.Г. Сентюрин

*кандидат технических наук*

**Ноябрь 2013**

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.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,  
№11, 2013 г.

*И.В. Мекалина, В.А. Богатов, Т.С. Тригуб, Е.Г. Сентюрин*

## **АВИАЦИОННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СТЕКЛА**

*Разработаны, исследованы и паспортизованы авиационные теплостойкие акрилатные органические стекла нового поколения СО-120С, ВОС-1 и ВОС-2, работоспособные в интервале температур от 160 до 200°С, с повышенными оптическими и физико-механическими характеристиками. Освоено промышленное производство новых оргстекел. Разработана нормативно-техническая документация на новые оргстекла, позволяющая изготавливать детали остекления самолетов из новых оргстекел редкосшитой структуры. Проводятся исследования моделей натуральных элементов деталей остекления из новых оргстекел для прогнозирования ресурса и сроков эксплуатации.*

**Ключевые слова:** органические стекла, термоформование, авиационные детали остекления, «серебростойкость», ресурс, эксплуатация, климатические испытания.

*I.V. Mekalina, V.A. Bogatov, T.S. Trigub, E.G. Sentiourine*

## **AVIATION ORGANIC GLASSES**

*Designed, researched and passported aviation heat-resistant acrylate organic glass, next generation SO-120S, VOS-1 and VOS-2 efficient in an interval of temperatures from 160 to 200°C, with enhanced optical and physical-mechanical characteristics. Mastered industrial production of new organic glass. Developed normative-technical documentation on the new plexiglass, which allows to produce parts of glazing for aircraft of new organic glass partially crosslinked structure. Studies of models of natural elements of glass elements of the new organic glass for forecasting and terms of use.*

**Keywords:** organic glass, thermoforming, aircraft glazing parts, crack resistance, resource, exploitation, environmental testing.

Органические стекла в деталях остекления самолетов рассматриваются наряду с металлическими материалами как силовые конструкционные материалы в конструкциях на внешнем контуре самолета и относятся к группе материалов, разрушение которых приводит к катастрофе. Они должны удовлетворять требованиям высокой конструкционной прочности в широком диапазоне эксплуатационных температур, надежности и основному функциональному требованию – высокому светопропусканию без оптических искажений.

В течение длительного времени интервал рабочих температур органического стекла составлял от  $-60$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , с развитием сверхзвуковой авиации и увеличением скорости полетов он расширился от  $-60$  до  $+200^{\circ}\text{C}$  и более. Детали остекления самолетов должны выдерживать разогрев и охлаждение внешней поверхности в зависимости от типа летательного аппарата в интервале температур от  $-60$  до  $+200^{\circ}\text{C}$  и выше при температуре на внутренней поверхности  $+80^{\circ}\text{C}$ , обладать ресурсом, сопоставимым с ресурсом планера. При температурах  $-60\div+60^{\circ}\text{C}$  успешно эксплуатируется пластифицированное полиметилметакрилатное (ПММА) органическое стекло СО-95. Для остекления самолетов с рабочими температурами, превышающими  $100^{\circ}\text{C}$ , были разработаны и освоены промышленностью теплостойкие оргстекла линейной структуры:

- полиметилметакрилатные – СО-120, СО-120А, АО-120, АО-120А с температурой эксплуатации в деталях остекления самолетов – до  $130^{\circ}\text{C}$  и температурой размягчения  $120^{\circ}\text{C}$ ;

- фторакрилатные – Э-2, Э-2У, СО-200 с температурой эксплуатации в деталях остекления самолетов – до  $250^{\circ}\text{C}$  и температурой размягчения  $180\text{--}200^{\circ}\text{C}$ .

Для перечисленных стекол накоплен опыт эксплуатации до 20–30 лет [1–7].

Произошедшие в стране политико-экономические изменения отразились на всех сторонах производства авиационных материалов: производство наиболее теплостойких фторакрилатных оргстекол Э-2, Э-2У, СО-200, не имеющих аналогов в мире, было прекращено и не может быть восстановлено по экологическим и экономическим причинам. В связи с этим актуальной задачей современного материаловедения является создание оргстекол, способных работать при температурах до  $200^{\circ}\text{C}$  и выше, – для остекления самолетов нового поколения и замены выработавших ресурс деталей остекления на основе теплостойких фторакрилатных оргстекол на эксплуатирующихся сверхзвуковых самолетах. Для решения этой задачи было предложено направление по химическому и физическому модифицированию акрилатных оргстекол – получение более экологически безопасных и менее дорогостоящих (по сравнению с оргстеклом Э-2) оргсте-

кол редкосшитой структуры. Задача решалась подбором и строгим дозированием компонентов для модификации акрилатных оргстекол с последующим всесторонним изучением свойств полученных образцов [8]. Во ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГУП «НИИ полимеров» разработаны органические стекла редкосшитой структуры СО-120С, ВОС-1, ВОС-2, ВОС-2АО с рабочими температурами от 160 до 200°С. Во ФГУП «ВИАМ» проведены комплексные исследования свойств разработанных оргстекол редкосшитой структуры, подтвердившие повышенную прочность, модуль упругости, ударную вязкость, «серебростойкость» под нагрузкой и действием растворителей, стойкость к воздействию термоударов до 200°С по сравнению с ранее применяемыми оргстеклами. Установлена возможность применения оргстекол частично сшитой структуры в ориентированном и неориентированном состояниях при температурах выше температуры стеклования [9–15].

Разработаны технологии физического модифицирования – молекулярной ориентации оргстекол редкосшитой структуры. Путем физического модифицирования созданы ориентированное гомополимерное оргстекло АО-120С и сополимерное акрилатное оргстекло ВОС-2АО в ориентированном состоянии. Установлена возможность получения оргстекол частично сшитой структуры со степенями ориентации от 30 до 70%; показано, что ориентация повышает на порядок «серебростойкость» оргстекол под действием отдельных эксплуатационных факторов – термических и механических напряжений, органических растворителей, атмосферных воздействий [16–17].

Исследованы свойства разработанных оргстекол редкосшитой структуры, получены паспортные характеристики, разработана нормативно-техническая документация, позволяющая изготавливать детали остекления самолетов из новых оргстекол редкосшитой структуры. В таблице приведены сравнительные характеристики новых оргстекол и оргстекол АО-120 и Э-2, эксплуатирующихся до настоящего времени на отечественных самолетах.

### Свойства авиационных органических стекол

Показатель	Значения показателей для органических стекол					
	СО-120С (неориентированное)	АО-120С (ориентированное)	ВОС-2 (неориентированное)	ВОС-2АО (ориентированное)	АО-120 (ориентированное)	Э-2 (неориентированное)
Температура размягчения, °С	125	125	150	150	120	180
Термостабильность, °С	180	180	230	230	180	230
Удельная ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	22,2	38,7	23	25	32	21
Прочность при растяжении, МПа	79,0	82,0	83,0	100,4	83,0	83,0
Удлинение при разрыве, %	6,5	15,3	5,7	15,6	20	3,8
Модуль упругости, МПа	2600	2900	4200	3900	3100	3380
Рекомендуемые рабочие температуры, °С: – при полном прогреве – при перепаде температур по толщине оргстекла	80 130/60	80 160/60	120 200/80	120 200/80	80 130/60	130 210/80

Отработаны технологии формования оргстекол редкосшитой структуры. Экспериментально установлено, что высокая стойкость к растрескиванию обеспечивает возможность «холодного» формования в неориентированном состоянии оргстекол частично сшитой структуры – ниже температуры стеклования, что позволяет избежать образования отпечатков от форм на поверхности оргстекла и получить детали с повышенными оптическими свойствами. Установлены оптимальные технологические режимы формования оргстекол редкосшитой структуры в ориентированном и неориентированном состояниях способами «горячего» и «холодного» формования. Показано, что изготовленные по разработанным технологиям модели и детали остекления из оргстекол частично сшитой структуры – в отличие от оргстекол линейного строения – имеют повышенную формоустойчивость при воздействии температур, превышающих температуру их стеклования [18].

Промышленное производство новых оргстекол требуемых промышленных номиналов и габаритов освоено на опытном заводе ФГУП «НИИ полимеров», ориентированных оргстекол ВОС-2АО – на предприятии ООО «Рошибус».

В настоящее время проводятся исследования моделей натуральных элементов остекления из оргстекол СО-120С, АО-120С, ВОС-2 и ВОС-2АО под влиянием эксплуатационных факторов в лабораторных условиях в сопоставлении с результатами, полученными в условиях воздействия естественных климатических факторов. Эти исследования необходимы для прогнозирования и обоснования ресурса работы и срока эксплуатации новых оргстекол частично сшитой структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия. 1981. С. 7–81.
2. Гудимов М.М. Трещины серебра на органическом стекле. М.: ЦИПКК АП. 1997. 260 с.
3. Авиационные материалы: Справочник в 13 т. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т. 8. М.: ВИАМ. 2002. С. 29–51.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
5. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
6. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
7. Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А. Многофункциональные оптические покрытия и материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 343–348.
8. Горелов Ю.П., Мекалина И.В., Тригуб Т.С., Шалагинова И.А., Сентюрин Е.Г., Богатов В.А., Айзатулина М.К. Химическое модифицирование прозрачных акрилатных полимеров для повышения эксплуатационных свойств деталей авиационного остекления //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 79–84.
9. 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.
10. 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.
11. Тригуб Т.С., Мекалина И.В., Горелов Ю.П., Шалагинова И.А. Органическое стекло для высокоскоростной авиации //Авиационная промышленность. 2007. №1. С. 39–42.
12. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Тригуб Т.С., Айзатулина М.К. Стойкость авиационных органических стекол к концентраторам напряжений //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №4. С. 30–33.

13. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Новые конструкционные органические стекла //Вопросы оборонной техники. 2009. Сер. 15. Вып. 3, 4. С. 33–39.
14. Мекалина И.В. Оргстекло как часть конструкции самолета //Инженерная газета. 2011. №22.
15. Состав для получения органического стекла: пат. 2340630 Рос. Федерация; опубл. 01.08.2007.
16. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Климова С.Ф., Богатов В.А. Новые «серебро-стойкие» органические стекла //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 45–48.
17. Мекалина И.В., Тригуб Т.С., Богатов В.А., Сентюрин Е.Г. Новое высокотепло-стойкое ориентированное оргстекло марки ВОС-2АО //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 14–19.
18. 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.

#### Reference list

1. Gudimov M.M., Perov B.V. Organicheskoe steklo [Organic glass]. M.: Himiya. 1981. S. 7–81.
2. Gudimov M.M. Treschiny serebra na organicheskom stekle [Cracks of silver on an organic glass]. M.: TsIPKK AP. 1997. 260 s.
3. Aviatsionnye materialy: Spravochnik v 13 t. [Aviation Materials: Handbook in 13 vol.] /Pod obsch. red. E.N. Kablova. T. 8. M.: VIAM. 2002. S. 29–51.
4. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.
5. Graschenkov D.V., Chursova L.V. Strategiya razvitiya kompozitsionnyh i funktsional'nyh materialov [Development strategy of composite and functional materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 231–242.
6. Erasov V.S., Yakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikatsionnye ispytaniya i issledovaniya prochnosti aviatsionnyh materialov [Qualification Tests and Study of Aviation Materials Strength] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 440–448.

7. Bogatov V.A., Kondrashov S.V., Hohlov Yu.A. Mnogofunktsional'nye opticheskie pokrytiya i materialy [Multifunctional Optical Coatings and Materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 343–348.
8. Gorelov Yu.P., Mekalina I.V., Trigub T.S., Shalaginova I.A., Sentyurin E.G., Bogatov V.A., Ayzatulina M.K. Himicheskoe modifitsirovanie prozrachnykh akrilatnykh polimerov dlya povysheniya ekspluatatsionnykh svoystv detaley aviatsionnogo ostekleniya [Chemical modification of transparent acrylic polymers for an improvement of operational properties of aircraft glazing parts] //Rossiyskiy himicheskii zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 79–84.
9. Bogatov V.A., Trigub T.S., Mekalina I.V., Ayzatulina M.K. Otsenka ekspluatatsionnykh harakteristik novykh teplostoykiy organicheskikh stekol VOS-1 i VOS-2 [Evaluation of performance characteristics of new VOS-1 and VOS-2 heat-resistant organic glasses] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 21–26.
10. Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Trigub T.S., Klimova S.F. Modifitsirovannyye organicheskie stekla dlya perspektivnoy aviatsionnoy tehniki [Modified organic glasses for advanced aircraft] //Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2012. №2. S. 2–4.
11. Trigub T.S., Mekalina I.V., Gorelov Yu.P., Shalaginova I.A. Organicheskoe steklo dlya vysokoskorostnoy aviatsii [Organic glass for high-speed aviation] //Aviatsionnaya promyshlennost'. 2007. №1. S. 39–42.
12. Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Trigub T.S., Ayzatulina M.K. Stoykost' aviatsionnykh organicheskikh stekol k kontsentrotoram napryazheniy [Resistance of aircraft organic glasses against stress raisers] //Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2012. №4. S. 30–33.
13. Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Bogatov V.A. Novye konstruktsionnye organicheskie stekla [Novel structural organic glasses] //Voprosy oboronnoy tehniki. 2009. Ser. 15. Vyp. 3, 4. S. 33–39.
14. Mekalina I.V. Orgsteklo kak chast' konstruktsii samoleta [Organic glass as a component of an aircraft structure] //Inzhenernaya gazeta. 2011. №22.
15. Sostav dlya polucheniya organicheskogo stekla [Compound for production of organic glasses]: pat. 2340630 Ros. Federatsiya; opubl. 01.08.2007.
16. Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Klimova S.F., Bogatov V.A. Novye «serebrostoykie» organicheskie stekla [Novel «Silver-stable» organic glasses] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 45–48.

17. Mekalina I.V., Trigub T.S., Bogatov V.A., Sentyurin E.G. Novoe vysokoteplostoykoe orientirovannoe orgsteklo marki VOS-2AO [New high-thermostable oriented organic glass of BOC-2AO type] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2010. №3. S. 14–19.
18. Petrov A.A., Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Bogatov V.A. Issledovanie osobennostey izgotovleniya detaley ostekleniya iz chastichno sshityh organicheskikh stekol [Features of manufacture of glazing parts from partially cross-linked organic glasses] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 32–34.