

3. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1986. 368 с.
4. Dubuisson E., Lavie Ph., Dalard F., Caire J.-P. //Corros. Sci. 2007. V.49. № 2. P. 910.
5. Duncan J.R., Balance J. A. Degradation of Metals in the Atmosphere. //Amer. Soc. of Testing and Materials. Philadelphia. 1988. P. 316.
6. Julve E. //Port. Electrochem. Acta. 1989. V. 7. № 3. P. 143.
7. Стрекалов П.В. //Защита металлов. 1994. Т. 30. № 1. С. 71.
8. Стрекалов П.В. //Защита металлов. 1988. Т.24. № 5. С. 804.
9. Стрекалов П.В., Панченко Ю.М. //Защита металлов. 1992. Т.28. № 2. С. 269.
10. Беруштитс Г.Б., Кларк Г.Б. //Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. М.: Наука. 1971. 159 с.
11. Roy S.K. //Corrosion (USA). 1983. V. 39. № 7. P. 291.
12. Михайловский Ю.М. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. М.: Металлургия. 1989.

УДК 666.117

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

НОВОЕ ВЫСОКОТЕПЛОСТОЙКОЕ ОРИЕНТИРОВАННОЕ ОРГСТЕКЛО МАРКИ ВОС-2АО

Высокотеплостойкое органическое стекло применяется для изготовления деталей остекления кабин новых самолетов. Приведены свойства нового ориентированного органического стекла марки ВОС-2АО. Органическое стекло ВОС-2АО способно работать при кратковременном одностороннем нагреве до температур 200°С благодаря высокой термостойкости.

Ключевые слова: *органическое ориентированное стекло, авиационные детали остекления, физическое структурирование стекла, шитая структура, термическая устойчивость, стойкость к растрескиванию, термические, оптические и механические свойства, работоспособность.*

Решающим вкладом в повышение надежности и ресурса авиационных органических стекол является реализация результатов фундаментальных научных исследований по изучению возможности существенного изменения свойств термопластичных полимерных материалов методом физической модификации их молекулярной структуры путем ориентационной вытяжки в диапазоне температур высокоэластического состояния. В ВИАМ разработана технология модификации оргстекол способом молекулярной ориентации, и в настоящее время наибольшее применение в авиации нашли органические стекла в ориентированном состоянии марок АО-120 и АО-120А на основе исходного полиметилметакрилатного стекла линейного строения марки СО-120А с температурой размягчения 120°С. Ориентация органического стекла повышает его пластические свойства: ориентированное оргстекло менее чувствительно к концентраторам напряжений, обладает в отличие от неориентированного оргстекла локальным разрушением при динамических нагрузках.

Детали остекления на основе ориентированных стекол имеют существенное преимущество перед неориентированными стеклами в стабильности физико-механических свойств при возникновении на их поверхности в эксплуатации концентраторов напряжений в виде царапин и выколов, а также в 2 раза и более высокий ре-

сурс. Отечественная авиационная промышленность имеет уникальный опыт успешного, многолетнего применения ориентированных стекол линейного строения на высокоскоростных самолетах с рабочей температурой на поверхности до 130–140°C, т. е. выше температуры размягчения.

Для повышения рабочих температур деталей остекления самолетов до 160–200°C разработаны путем химической модификации теплостойкие и термостабильные прозрачные полимеры сшитой структуры. На основании результатов оптических, теплопрочностных и физико-механических исследований выбран и запатентован оптимальный состав, паспортизовано теплостойкое и термостабильное органическое стекло марки ВОС-2. Проведены исследования влияния отдельных эксплуатационных факторов на работоспособность оргстекла ВОС-2 и его технологические характеристики; изучены термомеханические зависимости и установлена способность оргстекла сшитой структуры ВОС-2 к переработке методами плоскостной ориентации и формообразованию для изготовления деталей одинарной и двойной кривизны.

Для получения оргстекла в ориентированном состоянии исследованы технологические параметры и отработана технология ориентации оргстекла ВОС-2. Ориентация оргстекла осуществляется путем растяжения по плоскости предварительно разогретого листа до температуры выше температуры размягчения с последующим охлаждением его в растянутом состоянии. Для установления температурного интервала ориентации оргстекла определены температуры размягчения и характер термомеханических зависимостей (рис. 1). Температура размягчения оргстекла ВОС-2 составляет 142–150°C, при этом исследованная термостабильность оргстекла ВОС-2АО находится на уровне свойства исходного оргстекла и составляет 230°C.

Ориентация оргстекла ВОС-2 проведена в интервале температур от 150 до 175°C; показано, что оптимальный интервал температур ориентации оргстекла ВОС-2 составляет 160–175°C. Получены опытные листы оргстекла со степенями ориентации от 30 до 70%, на основании исследований которых (листов) разработана технология ориентации оргстекла и оформлена технологическая рекомендация.

Для проведения паспортизации в ВИАМ, на промышленном оборудовании в ООО «Рошибус» из оргстекла ВОС-2 изготовлена партия крупногабаритных листов оргстекла в ориентированном состоянии со степенью ориентации 54–60%, ориентированному оргстеклу присвоена марка ВОС-2АО. Проведены физико-механические испытания оргстекла ВОС-2АО в диапазоне температур от -60 до +100°C, определены прочность, относительное удлинение и модуль упругости при растяжении, предел прочности при статическом изгибе и удельная ударная вязкость.

В табл. 1 обобщены физико-механические показатели свойств при температурах -60, +20 и +100°C. Приведены данные по стойкости оргстекла к растрескиванию под действием напряжений растяжения. При постоянном воздействии на образцы оргстекла напряжений растяжения 40 МПа при комнатной температуре поверхностных дефектов «серебра» не появляется в течение длительного времени: 500 ч. В табл. 1 приведены также данные, подтверждающие работоспособность ориентированного оргстекла ВОС-2АО при одностороннем воздействии повышенных температур: в процессе циклических

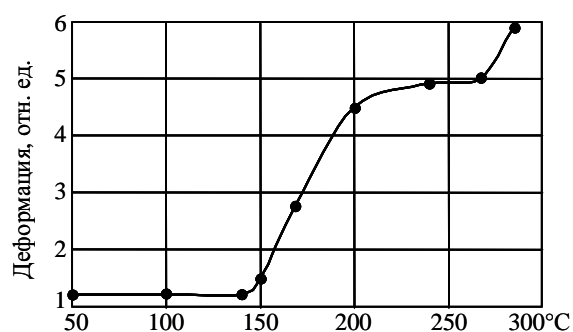


Рис. 1. Термомеханическая кривая оргстекла ВОС-2

воздействий по режиму $20 \rightleftharpoons 170^\circ\text{C}$ поверхностных трещин «серебра» не появляется в течение более 40 циклов, по режиму $20 \rightleftharpoons 200^\circ\text{C}$ – более 10 циклов.

Таблица 1

Физико-механические свойства оргстекла ВОС-2АО

Свойства	Показатели свойств при температуре испытания, °С		
	-60	+20	+100
Предел прочности при растяжении, МПа	101,4	100,4	32
Относительное удлинение при разрыве, %	4,8	15,6	26,3
Модуль упругости при растяжении, МПа	6300	3900	2260
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	194	149,0	>30 (без разрушения)
Удельная ударная вязкость, кДж/м ²	–	25,0	24,2
Вид и режим испытания	Продолжительность испытаний		Наличие или отсутствие «серебра»
Стойкость к термоударам: 20 \rightleftharpoons 170°С 20 \rightleftharpoons 200°С	>40 циклов >10 циклов		«Серебро» отсутствует То же
Стойкость к растрескиванию под напряжением растяжения 40 МПа при 20°С	500 ч		«Серебро» не появляется

В табл. 2 приведены результаты физико-механических и оптических показателей оргстекла ВОС-2АО после различных видов старения: теплового при 120°С в течение 500 ч, УФ облучения, старения в тропической камере при температуре +50°С, относительной влажности 98% в течение 500 ч, старения в условиях воздействия плесневых грибов. Оценка стойкости к старению определена по изменению прочности и модуля упругости при растяжении, ударной вязкости, коэффициента светопропускания, коэффициента желтизны.

Таблица 2

Физико-механические и оптические свойства оргстекла ВОС-2АО после различных видов старения

Условие старения оргстекла	σ_b , МПа	E , МПа	Удельная ударная вязкость a , кДж/м ²	Коэффициент, %	
				пропускания	желтизны
Без старения (исходное состояние) 120°С, 500 ч	100,4	3900	25,0	93,1–93,4	7,8
	109,8	4000	23,1	92,3–93,0	9,8
УФО, 50 ч необлученная сторона	101,3	3900	22,9	91,8	10,6
			27,9		
Тропическая камера ($t=50^\circ\text{C}$, $\phi=98\%$), 500 ч Старение при воздействии грибов – грибостойкость 2 балла (грибостойкое)	98,4	3900	21,2	92,7–92,9	9,0
	–	–	22,9	92,5	9,0

Полученные результаты исследований свидетельствуют о высокой стойкости оргстекла (по прочностным и оптическим характеристикам) к воздействию отдельных эксплуатационных факторов. На основании этих данных можно прогнозировать необходимый уровень атмосферостойкости и ресурса работы оргстекла ВОС-2АО в составе деталей авиационного остекления.

В табл. 3 обобщены данные по результатам определения «серебростойкости» оргстекла ВОС-2АО в исходном состоянии и после различных видов старения.

Таблица 3

«Серебростойкость» (по ацетону) оргстекла ВОС-2АО	
Вид старения	«Серебростойкость» по ацетону (не менее)
Без старения (в состоянии поставки)	20 мин
После термообработки 120°C, 6 ч	20 мин
Тепловое старение 120°C, 500 ч	20 мин
Старение в тропической камере 500 ч	60 с
Старение в тропической камере 500 ч + термообработка при 120°C, 120 мин	20 мин
УФ облучение 50 ч	20 мин
Водное старение 10 сут	10 мин
Водное старение 10 сут + термообработка при 120°C, 120 мин	20 мин

Установлено, что при воздействии ацетона трещин «серебра» в течение 20 мин не появляется на образцах в исходном состоянии, после теплового старения и УФ облучения. После воздействия влаги в условиях тропической камеры и выдержки в воде в течение 10 сут показатели «серебростойкости» снижаются, но дополнительная термообработка при 120°C в течение 2 ч восстанавливает «серебростойкость» поверхности оргстекла до 20 мин. Это свидетельствует о том, что необратимых процессов старения и деструкции в оргстекле не происходит при воздействии исследуемых эксплуатационных факторов.

Для установления допустимых рабочих температур ориентированного оргстекла ВОС-2АО проведены исследования релаксации ориентационных напряжений по термической усадке, фиксируемой по зависимости утолщения образцов при выдержке при полном прогреве в диапазоне температур 100–150°C (рис. 2).

Анализ результатов исследования показывает стабильность размеров ориентированного оргстекла до температуры 130°C, что определяет возможность установления уровня рабочей температуры при полном прогреве. Максимально допустимые температуры при одностороннем воздействии определяются стойкостью к растрескиванию поверхности, так как при температурах выше температуры размягчения в ориентированных органических стеклах сшитой структуры могут происходить процессы усадки, а структурные узлы шивки препятствуют изменению линейных размеров. Результаты определения стойкости к термоударам показывают (см. табл. 1), что при циклическом воздействии по режиму 20⇌170°C (более 40 циклов) и 20⇌200°C (более 10 циклов) трещин «серебра» на поверхности ориентированного оргстекла ВОС-2АО не появляется.

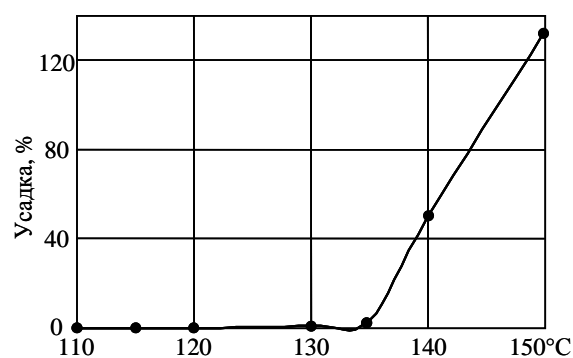


Рис. 2. Зависимость термической усадки оргстекла ВОС-2АО от температуры полного прогрева

Полученные данные по физико-механическим характеристикам, стойкости к термоудару, «серебростойкости» и усадке являются основанием для установления допустимых рабочих температур: при полном прогреве – до 130°C; в условиях одностороннего нагрева в зависимости от конструкции детали при установившемся перепаде температур по толщине – до 170/80°C и при кратковременном разогреве внешней поверхности – до 200°C.

Преимуществами ориентированного оргстекла ВОС-2АО по сравнению с исходным оргстеклом ВОС-2 аналогичного назначения являются:

- повышение рабочей температуры при полном прогреве на 10°C, при установившемся перепаде температур по толщине – на 30°C;
- повышение стойкости к УФ облучению на 40%; к тепловому старению – на 15%;
- повышение предела прочности при растяжении на 10%; относительного удлинения при разрыве – в 3 раза; «серебростойкости» после старения в камере тропического климата – в 20 раз [1].

По сравнению с зарубежным аналогом марки Плексиглас GS 249 (фирмы «Рем», Германия) оргстекло ВОС-2АО имеет превосходство в теплостойкости, термостабильности и рабочей температуре при полном прогреве на 40–50°C (Каталог компании Rohm GmbH, MIL – PRF – 8184Г от 5 октября 1998 г.).

Результаты проведенных исследований ориентированного оргстекла ВОС-2АО в условиях воздействия эксплуатационных факторов: тепловое, водное, тропическое старение, УФ облучение, воздействие напряжений растяжения 40 МПа, теплопрочностные циклические испытания по режиму $20 \rightleftharpoons 170$ и $20 \rightleftharpoons 200$ °C, – анализ и сопоставление полученных результатов с ранее полученными данными по искусственному, естественному и эксплуатационному старению сополимерного оргстекла СО-133К, серийных органических стекол СО-120, АО-120 свидетельствуют о возможности установления ресурса работы деталей остекления из оргстекла ВОС-2АО в течение 10–15 лет при соблюдении правил эксплуатации деталей остекления из органических стекол [2, 3].

По результатам обработки технологических параметров ориентированного оргстекла ВОС-2АО, определения формоустойчивости, «серебростойкости», светопропускания формованных моделей остекления установлены оптимальные температурные режимы формования оргстекла – при «горячем» формовании: 155 ± 5 °C, при «холодном» формовании: 120–135°C. Термообработку отформованных заготовок деталей из ориентированного органического стекла ВОС-2АО следует проводить при температурах 110 ± 5 °C. Разработана технологическая рекомендация по формованию оргстекла ВОС-2АО.

Разработаны и выпущены технические условия на ориентированное оргстекло марки ВОС-2АО, согласно которым оргстекло должно изготавливаться в виде листов размерами 1700×1850 мм и 2050×2300 мм, толщиной от 2 до 12 мм со степенью ориентации от 30 до 60%. По согласованию с потребителем допускается изготавливать и поставлять стекло марки ВОС-2АО других линейных размеров и степени ориентации. В технических условиях приведены технические требования по разнотолщинности листов, по внешнему виду (допустимым дефектам), по оптическим искажениям и светопропусканию: в исходном состоянии допускаемые нормы коэффициента светопропускания составляют 89–90%, после определения светостойкости 86,5–88,5%. Установлены требования по физико-механическим показателям: прочность при разрыве 95 МПа, ударная вязкость 20 кДж/м² и «серебростойкость» (по ацетону) 20 мин, а также требования безопасности, правила приемки оргстекла и методы его испытания.

Ориентированное оргстекло марки ВОС-2АО предназначено для изготовления деталей авиационного остекления, а также остекления наземного, водного транспорта, средств индивидуальной защиты и оборудования в атомной, металлургической и химической промышленности.

Авторы статьи выражают благодарность принимавшим участие в работе сотрудникам ФГУП «ВИАМ» М.К. Айзатулиной, Ю.А. Фролкову, С.С. Тригубу, Ю.А. Хохлову и сотрудникам ООО «Рошибус» В.Х. Розенблюму, ФГУП «НИИ полимеров» Ю.П. Горелову.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 39–42.
2. Гудимов М.М. Трещины серебра на органическом стекле. М.: ЦИПКК АП. 1997. С. 97–102, 203–215.
3. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия. 1981. С. 63–95.

УДК 629.7.023.222

В.А. Богатов, С.В. Кондрашов, Ю.А. Хохлов

ПОЛУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ ОКСИНИТРИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Рассмотрен вопрос получения градиентного оптического покрытия оксинитрида алюминия с переменным по толщине показателем преломления методом реактивного магнетронного распыления. Метод позволяет управлять величиной показателя преломления от 1,65 до 2,1 и законом его изменения по толщине покрытия путем регулирования относительного содержания азота и кислорода в процессе реактивного магнетронного распыления алюминиевой мишени.

Приведены результаты измерения спектрального коэффициента отражения градиентного покрытия оксинитрида алюминия на силикатном стекле, которые подтвердили возможность получения покрытия с переменным по толщине показателем преломления.

Ключевые слова: *градиентное оптическое покрытие, переменный показатель преломления, реактивное магнетронное распыление.*

В процессах проектирования и изготовления оптических деталей высокого качества большой интерес представляют градиентные оптические покрытия с переменным по толщине показателем преломления. Такая технология позволяет создавать бесцветные (ахроматические) просветляющие и антиотражающие покрытия, а также значительно расширить спектральный диапазон просветления оптических деталей в инфракрасной области спектра. Применение градиентных оптических покрытий является перспективным для повышения энергетической эффективности светодиодов и элементов солнечных батарей, для создания узкополосных фильтров и высококачественной лазерной оптики.

Одним из широко применяемых методов получения оптических градиентных покрытий является метод совместного вакуумного испарения двух диэлектрических материалов с разными показателями преломления ($n_1 > n_2$) и изменяющейся во времени относительной скоростью испарения этих материалов.