

сти и трещиностойкости, что открывает широкие возможности для изготовления обтекателей сверхзвуковых летательных аппаратов.

Таким образом, одним из перспективных путей создания радиопрозрачных материалов нового поколения является разработка композитов с применением высокотемпературной бесщелочной алюмосиликатной стеклокерамики и различных нитридов. К достоинствам стеклокерамики следует отнести высокую их технологичность, стойкость к эрозионным и агрессивным воздействиям, достаточно высокие механические свойства, в то же время нитриды кремния, алюминия и бора обладают лучшими диэлектрическими характеристиками.

Бесщелочная стеклокерамика и композиты, получаемые на ее основе путем армирования нитридами кремния, бора, относятся к наиболее результативным материалам как с точки зрения возможности достижения требуемого уровня свойств, так и с точки зрения их технологичности и экономичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красюк В.Н. Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов: учеб. пособие. СПб. СПбГААП. 1994. 216 с.
2. Гуртовник И.Г. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир. 2003. 363 с.
3. Thermal Expansion of Some Glasses in the System $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ by Hummel and Reid //Journal of the American Ceramic Society. 1951.V. 34. № 10.
4. Gilde G., Patel P., Hubbard C., Pothier B., Hynes T., Croft W., Wells J. SiON low dielectric constant ceramic nanocomposite: Pat. 5677252 US, Int.Cl.6 C 04 B 35/96.US. The United States of America as represented by the Secretary of the Army. 1996.
5. Братухин А.Г. и др. Новые конструкции и функциональные материалы и возможности их более широкого применения. СПб.: Политехника. 1992.
6. Inna G.T., Curtis A.M., Deborah A.H., Anh H.L. Electromagnetic window: Pat. 5573986 US, Int.Cl.6 C 04 B 35/584. US The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. 1996.

В.А. Богатов, Т.С. Тригуб, И.В. Мекалина, М.К. Айзатулина

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ВОС-1 И ВОС-2

Органические стекла применяются для изготовления деталей остекления кабин самолетов. Новые полимерные органические структурированные стекла марок ВОС-1 и ВОС-2, разработанные в ВИАМ совместно с НИИ полимеров, способны работать при кратковременном одностороннем нагреве до температур 160–200°С благодаря их высокой термостойкости.

Новые методики испытаний, разработанные в ВИАМ, применены для исследования работоспособности и основных характеристик новых оргстекло.

Ключевые слова: *органические стекла, авиационные детали остекления, структурированные стекла, термическая устойчивость, стойкость к растрескиванию, работоспособность.*

Органические стекла применяются для изготовления деталей остекления кабин самолетов. Повышение скоростей и высоты полетов потребовало создания герметичных

кабин, в которых по сечению стекла возникают большие напряжения от избыточного давления внутри кабины, перепада температур и аэродинамических нагрузок, – в связи с этим необходимо иметь стекла, которые были бы силовым конструкционным материалом. Температурный интервал эксплуатации стекол расширился – от $\pm 60^{\circ}\text{C}$ до температур от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$ и выше.

Начиная с 60-х годов прошлого века основными материалами авиационного остекления являются полиметилметакрилатные (ПММА) стекла марок СО-95, СО-120, ориентированное стекло АО-120 на основе СО-120, теплостойкие акрилатные оргстекла на основе полимера линейного строения марки Э-2 [1].

Сокращение авиационного производства за последнее десятилетие привело к уменьшению заказов на авиационные оргстекла АО-120, а производство теплостойкого стекла Э-2, не имеющего аналогов в мире, прекращено. В связи с этим для остекления самолетов нового поколения решалась задача создания оргстекол более дешевых и экологически безопасных, способных работать при температурах $+160\div+200^{\circ}\text{C}$ и выше. С учетом опыта применения серийных органических стекол стало возможным проведение исследований, направленных на увеличение температурного диапазона их эксплуатации. Основной материал остекления – стекло АО-120 – в течение многих лет успешно эксплуатируется на самолетах типа МиГ-23, на поверхности деталей остекления которых возникают температуры до $+130^{\circ}\text{C}$ (на 10°C выше температуры размягчения), в то время как в зарубежных стандартах указано, что ориентированные стекла не должны эксплуатироваться при температурах выше температуры размягчения оргстекла [2]. В течение многих лет и до сих пор на самолетах МиГ-25 и МиГ-31 эксплуатируются оргстекла линейного строения типа Э-2 – при температурах на $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$ выше температуры их размягчения. Верхним пределом температуры эксплуатации этого стекла является его термостабильность ($\geq 230^{\circ}\text{C}$) – появление недопустимых оптических дефектов. У линейных полимеров при температурах выше температуры размягчения возможна релаксация ориентационных напряжений, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики всех ориентированных и формованных оргстекол.

В настоящее время восстановление производства теплостойких стекол типа Э-2 требует чрезвычайно больших затрат, несоизмеримых с заказами авиационной промышленности на эти материалы. Наиболее целесообразным направлением создания новых авиационных теплостойких и термостабильных органических стекол выбрана модификация отечественных акрилатных оргстекол, повышение их рабочей температуры до 200°C и более благодаря применению сополимеров, сшивающих и термостабилизирующих добавок, позволяющих значительно увеличить термостабильность полимеров. В результате научных исследований разработаны и паспортизованы новые теплостойкие и термостабильные сополимерные акрилатные органические стекла марок ВОС-1 и ВОС-2, составы которых запатентованы, разработана техническая документация на промышленный выпуск этих авиационных материалов [3].

С учетом необходимости дополнительных более сложных подходов при оценке эксплуатационных характеристик оргстекол, создаваемых по нетрадиционному для отечественного и зарубежного авиационного материаловедения направлению, – применение сшитых стекол в условиях температур, значительно превышающих температуру размягчения стекол, – созданы и применены новые методы оценки их эксплуатационных характеристик.

Как показал опыт эксплуатации, одним из наиболее опасных является случай возникновения напряжений в органическом стекле под действием термоударов – мгновенных смен температуры на внешней стороне детали остекления. При термоударах в органическом стекле возникают временные напряжения. В диапазоне температур,

близких к температуре стеклования материала, под действием термоударов могут возникать остаточные напряжения. Для изучения влияния термоударов разработана новая методика испытаний на стойкость оргстекло к температурным воздействиям ММ 1.2.032–2004 «Исследование органических стекол на стойкость к термоударам». Методика заключается в последовательном проведении следующих операций: разогреве металлического индентора до заданной температуры, приложении основания разогретого индентора к поверхности оргстекла, снятии индентора, охлаждении стекла в естественных условиях до комнатной температуры. При проведении испытаний материалов, с повышением температуры и приближением к температуре размягчения в материале будут возникать не только временные напряжения, но и остаточные, сохраняющиеся в материале и после выравнивания температуры по полю и толщине. Величина остаточных напряжений определяется по методу воздействия активных растворителей. Скорость возникновения трещин «серебра» увеличивается по экспоненциальному закону в зависимости от величины имеющихся в материале напряжений. Остаточные напряжения фиксируются количественно с помощью ацетона по времени появления первых трещин «серебра».

На рис. 1 представлена зависимость времени до появления трещин «серебра» по ацетону от температуры индентора при однократном воздействии.

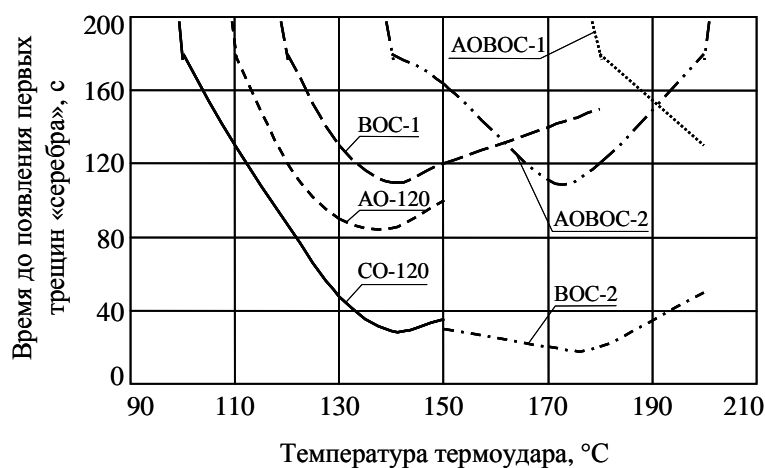


Рис. 1. Зависимость времени до появления трещин «серебра» по ацетону от температуры индентора при однократном воздействии

Для всех оргстекол прослеживается тенденция уменьшения времени до появления трещин «серебра» при повышении температуры индентора, близкой к температуре стеклования оргстекла, что говорит об увеличении значения напряжений растяжения. При дальнейшем повышении температуры индентора напряжения достигают максимального значения, а затем уменьшаются, что связано с процессами релаксации напряжений при температурах выше температуры размягчения на 20–40°C [4]. Сравнение данных для органических стекол при температурах, равноудаленных от температуры стеклования, – для оргстекол СО-120 и АО-120 – при 140°C, ВОС-1 – при 160°C и ВОС-2 – при 170°C, – показывает, что наиболее «серебростойкими» являются оргстекла АО-120 и ВОС-1. Наиболее опасной рабочей температурой для органических стекол является температурный интервал $T_c + (10 \div 20)^\circ\text{C}$ (T_c – температура стеклования). Ориентация оргстекол приводит к повышению «серебростойкости» при однократном термоударе сополимерных шитых (АОВОС-1) и линейных оргстекол (АО-120).

На рис. 2 представлена диаграмма времени до появления микротрещин «серебра» под действием термоударов при температурах 160 и 200°C. Ориентация оргстекло повысила «серебростойкость» оргстекло ВОС-1 и ВОС-2 при действии термоударов более чем в 3 раза, по сравнению с неориентированными.

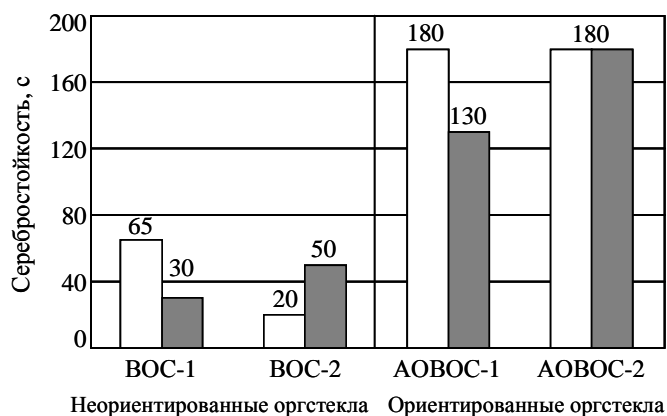


Рис. 2. «Серебростойкость» оргстекло ВОС-1 и ВОС-2 в исходном и ориентированном состояниях «по ацетону» после одностороннего термоудара при температурах 160 (□) и 200°C (■)

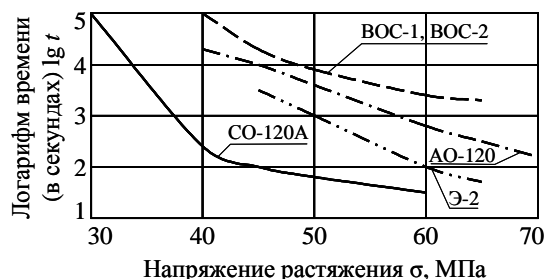


Рис. 3. Время до появления трещин «серебра» под действием напряжений растяжения при температуре 20°C на поверхности термостабилизированных (ВОС-1 и ВОС-2) и серийных оргстекло

Чтобы оценить долговечность оргстекло проводились испытания с применением разработанной новой методики ММ 1.2.014.2002 «Определение «серебростойкости» органических стекло под действием напряжений и растворителей». В методике предложен способ консольного нагружения образца из оргстекла, по длине которого возникают напряжения различного уровня, причем на внешней поверхности возникают напряжения растяжения. Каждый отдельный участок по длине образца исследуется последовательно при действии ацетона, фиксируется время до появления первых трещин «серебра». Преимущество при определении «серебростойкости» по новому методу консольного нагружения заключается в том, что на одном образце можно определить время появления трещин «серебра» в широком диапазоне напряжений, вызывающих возникновение трещин «серебра». Экспериментальные данные, полученные по этой методике, свидетельствуют о значительном превосходстве в работоспособности под нагрузкой сополимерных акрилатных оргстекло сшитой структуры (термостабилизированных ВОС-1 и ВОС-2 по сравнению с гомополимерными линейными ПММА оргстеклами в неориентированном (СО-120, Э-2) и ориентированном состояниях (АО-120).

Эта методика применима при исследовании «серебростойкости» стекло под действием напряжений без действия растворителей. Экспериментально установлено, что органические стекло даже в неориентированном состоянии (ВОС-1 и ВОС-2) обладают повышенной стойкостью к растрескиванию: под действием напряжений растяжения величиной до 40 МПа не происходит растрескивания в течение 500 ч и более. На рис. 3 приведены результаты, подтверждающие превосходство вновь разработанных термостабилизированных оргстекло сшитой структуры по сравнению с серийными оргстеклами (СО-120, АО-120 и Э-2).

Проведенные исследования подтвердили возможность повышения рабочих температур серийных стекло до температур, превышающих температуру размягчения, а также возможность применения новых модифицированных стекло сшитой структуры в ориентированном и неориентированном состояниях при температуре выше температуры размягчения, что подтверждено высокими показателями «серебростойкости» при

действии термоударов. Установлены рабочие температуры новых оргстекел при одностороннем кратковременном разогреве: для ВОС-1 – до 160°C, для ВОС-2 – до 200°C. Проведенные исследования позволили внести рекомендации по уровню рабочих температур в паспорта на оргстекла ВОС-1 и ВОС-2.

Полученные результаты исследований по вышеизложенным методикам позволяют проводить сравнительную оценку серийных и вновь разрабатываемых или модифицированных оргстекел и контролировать напряженное состояние деталей остекления на различных технологических стадиях переработки и в эксплуатации при выборочном контроле.

Разработанные новые стекла ВОС-1 и ВОС-2 имеют показатели, превышающие показатели серийных стекел, а по термостабильности и прочности находятся на уровне стекла Э-2. По основным характеристикам новые оргстекла шитой структуры превосходят метилметакрилатные линейные стекла и при температурах до 100°C – прочность при растяжении новых оргстекел не менее 35 МПа. Средняя температура по толщине оргстекла при одностороннем воздействии повышенных температур 100°C – для большинства деталей остекления в процессе эксплуатации.

Приведенные на рис. 4 данные по теплостойкости серийных и вновь разработанных оргстекел показывают возможность применения для изготовления деталей остекления с рабочей температурой до 200°C оргстекла ВОС-2 для замены снятого с производства самого теплостойкого эксплуатирующегося фторорганического стекла марки Э-2.

В результате проведенных научных исследований разработаны и усовершенствованы методики испытаний, позволяющие оптимизировать состав новых модифицированных оргстекел на стадии разработки материала с заданными техническими свойствами и оценить работоспособность новых теплостойких оргстекел под действием эксплуатационных факторов. Установлена возможность применения новых оргстекел редкосшитой структуры в исходном и ориентированном состояниях выше температуры размягчения – это подтверждено высокими показателями стойкости к растрескиванию под действием термоударов. В процессе изучения влияния напряжений, возникающих в органических стеклах на различных стадиях их переработки и применения, получены данные для установления допустимых температурно-временных условий и ресурса работы оргстекел при заданном уровне напряжений.

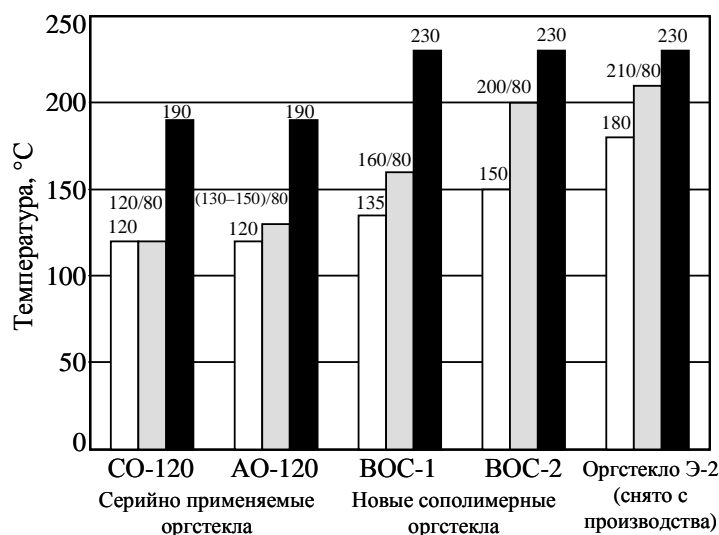


Рис. 4. Температуры размягчения (□), установленные рабочие температуры при одностороннем нагреве (■; в числителе – температура наружной поверхности, в знаменателе – внутренней) и термостабильность (■) теплостойких органических стекел марок CO-120, AO-120, ВОС-1, ВОС-2 и Э-2

На основании проведенной сравнительной оценки серийных и вновь разработанных модифицированных оргстекло разработаны рекомендации по замене выработавших ресурс в эксплуатации теплостойких оргстекло типа Э-2 на новые и по внедрению модифицированных оргстекло марок ВОС-1 и ВОС-2 для деталей остекления новых и перспективных летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия. 1981. 215 с.
2. Акрилатное стекло: блочное, шитое, двухосно-ориентированное: пат. WL 5.1416 (Германия) опублик. DIN. 1992. Р. 1–7.
3. Тригуб Т.С., Мекалина И.В., Горелов Ю.П., Шалагинова И.А. Органическое стекло для высокоскоростной авиации //Авиационная промышленность. 2007. №1. С. 39.
4. Аржаков М.С., Луковкин Г.М., Аржаков С.А. О природе термостимулируемой низкотемпературной релаксации деформации полимерных стекол //ДАН. 1999. Т. 369. №5. С. 629–631.

С.С. Солнцев, В.В. Швагирева, Н.В. Исаева, Г.А. Соловьева

АРМИРОВАННЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ СТЕКЛОЭМАЛИ ДЛЯ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Исследовано влияние процесса армирования стеклоэмалевых покрытий неорганическими волокнами на их свойства.

Приводятся результаты исследования – показана принципиальная возможность получения армированных покрытий с однородной термически стабильной структурой и высокими термомеханическими свойствами.

Ключевые слова: *стеклоэмалевое покрытие, кварцевое волокно, армирование, структура, фазовый состав, термомеханические характеристики.*

Практически на всех отечественных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) применяются жаростойкие стеклоэмали для защиты поверхностей деталей из жаростойких никелевых сплавов и сталей от высокотемпературной газовой коррозии. Высокая эффективность защитного действия стеклоэмалей подтверждается многолетней практикой эксплуатации деталей камер сгорания, форсажных камер авиационных двигателей. Работоспособность и надежность камер сгорания ГТД в значительной мере обеспечиваются высокотемпературными стеклоэмалевыми покрытиями.

Однако остается актуальной задача тепловой защиты деталей и защиты от образования поверхностных трещин, которые могут возникать в результате термической усталости металла. Решение этой задачи связано с созданием стеклоэмалевых покрытий, обеспечивающих значительный температурный градиент – между температурами газового потока и металлической поверхности детали. Указанный градиент можно получить в результате увеличения толщины покрытия и уменьшения теплопроводности защитного слоя.

Весьма важной является также задача повышения эрозионной стойкости стеклоэмалевых покрытий, так как при длительной эксплуатации имеет место некоторый унос массы, уплотнение покрытия и соответствующее уменьшение его толщины. Получение «толстых» (толщиной более 150–200 мкм) стеклоэмалевых покрытий – поми-