

УДК 629.3.023.26

*Е.Г. Сентюрин<sup>1</sup>, И.В. Мекалина<sup>1</sup>, М.К. Айзатулина<sup>1</sup>, И.В. Орлова<sup>1</sup>***ПОЛИРОВАНИЕ И ШЛИФОВАНИЕ – ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ «СЕРЕБРОСТОЙКОСТИ» И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГСТЕКЛОЛ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ПРОДЛЕНИИ РЕСУРСА АВИАЦИОННОГО ОСТЕКЛЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-45-52

*Ориентированные акрилатные органические стекла в настоящее время являются основными материалами остекления большинства отечественных самолетов и вертолетов, занимая от 90 до 100% площади всего остекления. Физико-механические и оптические характеристики ориентированных оргстеклол обеспечивают высокую надежность и ресурс авиационного остекления до десяти и более лет. Однако необходимость постоянного совершенствования и усложнение условий эксплуатации авиационной техники требуют от остекления увеличения ресурса до ресурса планера (более 20–30 лет). Решение этой проблемы достигается внедрением технологий шлифовки и полировки органических стекол в процессе их изготовления, переработки, эксплуатации и при ремонте для удаления с поверхности дефектов различной сложности с помощью полировальной и шлифовальной паст, разработанных и выпускаемых ФГУП «ВИАМ».*

**Ключевые слова:** оргстекло, акрилаты, «серебробстойкость», ресурс, надежность, шлифование, полирование, ориентация, внутренние напряжения, линейная структура, частично сшитая структура, эксплуатация, остекление.

*E.G. Sentjurin<sup>1</sup>, I.V. Mekalina<sup>1</sup>, M.K. Aizatulina<sup>1</sup>, I.V. Orlova<sup>1</sup>***POLISHING AND GRINDING – EFFECTIVE METHODS TO IMPROVE THE «SILVER RESISTANCE» AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF PLEXIGLAS IN THE MANUFACTURE AND EXTENSION OF AVIATION GLAZING IN OPERATION (review)**

*Oriented acrylate organic glass is currently the main glazing materials of most domestic aircraft and helicopters, occupying from 90 to 100% of the total glazing area. Physico-mechanical and optical characteristics of oriented plexiglas provide high reliability and service life of aviation glazing up to 10 years and more. However the need for continuous improvement and complication of operating conditions of aircraft require glazing to increase the life of the airframe (more than 20–30 years). The solution to this problem is achieved by the introduction of technologies for grinding and polishing of organic glasses in the process of their manufacture, processing, operation and repair to remove surface defects of varying complexity with the help of polishing and grinding pastes developed and manufactured by FSUE «VIAM».*

**Keywords:** plexiglas, acrylates, «silver resistance», service life, reliability, grinding, polishing, orientation, internal stresses, linear structure, partially cross-linked structure, operation, glazing.

<sup>1</sup>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

### Введение

Постоянное совершенствование авиационной техники, необходимость увеличения скорости, ресурса и надежности предъявляют новые требования ко всем авиационным материалам, агрегатам и конструкциям [1, 2].

Органические стекла, работая как ответственные авиационные конструкционные материалы в самых сложных условиях, должны обеспечивать высокие оптические характеристики, надежность и ресурс эксплуатации авиационного остекления [3].

#### *Ведущая роль ФГУП «ВИАМ» в создании авиационных органических стекол на основе акриловых полимеров*

С первых лет создания ВИАМ в его работе уделялось самое большое внимание решению проблем материалов и технологий авиационного остекления. В тяжелые годы Великой Отечественной войны была создана прозрачная броня и организовано ее производство в необходимых объемах. В послевоенные годы над созданием новых, надежных в эксплуатации оргстекол для самолетов, при ведущей роли ВИАМ работали институты Академии наук, институты и предприятия министерств химической и авиационной промышленности. На основании этих работ были созданы и исследованы десятки составов теплостойких оргстекол [4].

С первых лет создания промышленного производства органических стекол, способных обеспечить требования к авиационному остеклению самолетов различного назначения, главными стали органические стекла на основе акриловых полимеров.

Авиационные акрилатные оргстекла, обладая многими преимуществами перед другими прозрачными полимерными и неорганическими материалами, требовали тем не менее постоянного совершенствования технологий переработки и условий эксплуатации. Например, сравнительно невысокая абразивостойкость оргстекол приводила к образованию на их поверхности механических повреждений, внешние эксплуатационные воздействия – к образованию микротрещин «серебра». Поверхностные повреждения снижали физико-механические и оптические характеристики деталей авиационного остекления. Поэтому уже с первых дней производства и эксплуатации оргстекол осуществлялись попытки их полировки различными способами, в том числе абразивными порошками и мягкими салфетками.

#### *Создание научных основ и промышленной технологии ориентации оргстекол*

Основы науки о полимерах были практически реализованы при создании материалов для авиационного остекления. При создании в ВИАМ органических стекол с учетом теоретических положений об ориентационных явлениях в полимерах, связи молекулярного строения полимеров с их физическими свойствами, особенностей их вынужденно эластического и высокоэластического состояний впервые в нашей стране разработана, а в дальнейшем широко реализована в промышленности технология ориентации органических стекол [5]. При этом опыт эксплуатации учитывался не только при создании новых материалов, но и являлся основанием для постоянного совершенствования серийных материалов и технологий с учетом изменившихся требований к авиационной технике. В первые годы участки для ориентации оргстекол создавались непосредственно на авиационных заводах. С увеличением потребности в ориентированных стеклах, а также в связи с необходимостью повышения их качества ориентированное оргстекло начали производить централизованно на заводе «Оргстекло» (г. Дзержинск), где до этого акрилатные оргстекла производили только в неориентированном состоянии.

Ориентированные оргстекла по сравнению с исходным оргстеклом, благодаря низкой чувствительности к концентраторам напряжений, обладают существенно более высокими физико-механическими свойствами, особенно стойкостью к удару, длительной прочностью, стойкостью к растрескиванию («серебростойкостью») в эксплуатационных условиях и другими показателями, что в совокупности позволяло многократно увеличивать ресурс и надежность деталей остекления.

Среди ориентированных оргстекол, нашедших самое широкое и успешное применение в авиационной промышленности, необходимо отметить оргстекло марки АО-120 [6]. Оргстекло этой марки создано в начале семидесятых годов прошлого века в результате физической модификации полиметилметакрилатного оргстекла линейного строения СО-120А. Оргстекло АО-120 до недавнего времени для большинства самолетов и вертолетов являлось основным материалом остекления, ресурс эксплуатации составлял 10–15 лет.

### ***Особенности полимеризации исходных оргстекол для ориентации.***

#### ***Устранение дефектов нетермостойкости***

Однако широкое внедрение ориентированных оргстекол в отечественном авиастроении серьезно осложнило требования к технологии полимеризации акрилатных оргстекол.

Процесс производства высококачественного листового авиационного акрилатного оргстекла связан с комплексом сложнейших технологических и контрольных операций – начиная с выбора и контроля качества исходного мономера, инициатора полимеризации и других добавок. В соответствии с ГОСТ 10667–90 на стекло органическое листовое для применения в авиации марки СО-120А толщиной  $\geq 10$  мм должен применяться мономер метилметакрилат с массовой долей основного вещества не менее 99,9%.

Высокая чистота исходного мономера помогала повысить температуру размягчения, ударную вязкость, относительное удлинение при разрыве, светостойкость оргстекол СО-120А некоторых толщин по сравнению со оргстеклом СО-120К. Однако потребовались значительные усилия по контролю всех этапов полимеризации для предотвращения образования в оргстекле дефектов типа «оптической нетермостойкости». Мероприятия по устранению образования таких дефектов при полимеризации акрилатных оргстекол потребовали значительного увеличения продолжительности полимеризации, трудоемкости по контролю соблюдения всех этапов ее проведения. Большое количество оргстекол браковалось. Все дефекты, проявляющиеся после разогрева оргстекла, являются следствием неоднородности процесса полимеризации при получении листа. В результате различий в скорости реакции на отдельных участках полимеризующейся массы возникают и замораживаются внутренние напряжения. При прогреве оргстекла выше температуры его размягчения эти напряжения вызывают деформацию, что приводит к образованию оптических дефектов с максимальными размерами от нескольких миллиметров до сантиметра. За рубежом в технологии производства листовых ориентированных оргстекол применяются их шлифовка и полировка, что значительно упрощает производственный процесс и повышает качество оргстекла.

### ***Эксплуатационные дефекты на поверхности оргстекол и их устранение методами шлифовки и полировки***

Полный переход в отечественном авиастроении на применение оргстекол преимущественно в ориентированном состоянии позволил решить многие основные проблемы. Однако в настоящее время возникает необходимость дальнейшего увеличения

ресурса эксплуатации деталей остекления практически до ресурса планера (до 20–30 лет и более) без ограничения продолжительности и количества полетов, несмотря на усложнение работы отечественной авиационной техники в условиях расширения географии применения и снижения качества обслуживания. Универсальным решением этой проблемы является разработка материалов и технологий полировки и шлифовки оргстекла в остеклении авиационной техники во время ремонта и непосредственно при эксплуатации [7].

К авиационным органическим стеклам предъявляются очень высокие требования по оптическим и физико-механическим характеристикам. У органических стекол не должно быть дефектов, снижающих их физико-механические характеристики, и оптических дефектов, не позволяющих при просмотре через остекление осуществлять пилотирование или нарушающих возможность объективно оценивать внешнюю обстановку.

В процессе эксплуатации на поверхности оргстекла возникают дефекты типа поверхностного растрескивания – «серебро», выколки, царапины, трещины, следы краски.

Причины возникновения дефектов:

- естественное старение материала под воздействием климатических и эксплуатационных факторов – воздействие ультрафиолетового света и влаги, эрозионные воздействия песка, камней при взлетах и посадках, града в полете;
- ошибки в технологии изготовления деталей – наличие остаточных напряжений, снижающих «серебростойкость» деталей при воздействии внешних факторов при эксплуатации;
- нарушение правил эксплуатации и ремонта;
- попадание на поверхность оргстекла органических растворителей, красок, смывок, воздействие средств для устранения обледенения, разогретых выше установленного уровня температуры, случайные механические воздействия при обслуживании самолета [8].

Многие из перечисленных дефектов, возникающих при изготовлении листов и деталей авиационного остекления не представляют серьезной опасности, не снижая физико-механические характеристики ориентированных оргстекла. Однако новые высокие требования к оптическим характеристикам и ресурсу деталей остекления требуют проведения постоянного контроля за состоянием остекления и при необходимости современного их шлифования и полирования [9, 10].

В первое время применения для изготовления авиационного остекления органических стекол, при производстве и эксплуатации до 90-х годов прошлого века применяли полировальную пасту 63М. В состав пасты в качестве полировального порошка по образцу зарубежных паст входил природный глинозем (трепел) [11], который требовал дополнительной очистки, так как в его составе могли находиться царапающие частицы диоксида кремния. Паста обладала низкой полирующей способностью – после полирования на поверхности оргстекла мог образовываться трудноудаляемый белый налет, отмывание которого значительно повышало трудоемкость полировки.

Для решения проблемы удаления дефектов на поверхности оргстекла в деталях авиационного остекления во ФГУП «ВИАМ» разработаны полировальная и шлифовальные пасты и технологии их применения. Разработана (ТУ1-595-27-566–2005), запатентована и выпускается полировальная паста практически для всех предприятий отрасли и эксплуатации [12]. Паста применяется для удаления с поверхности оргстекла негрубых царапин, потертостей и помутнений, возникающих в процессе производства или эксплуатации. Паста ВИАМ-3 представляет собой сложную масляно-водную систему, содержащую минеральный полировальный порошок – фторопол (смесь оксидов

и фторидов редкоземельных металлов в виде твердого раствора, обогащенного по диоксиду церия). Паста ВИАМ-3 обладает высокой полирующей способностью – отполированная поверхность оргстекла блестящая, без белого налета.

В зависимости от назначения, формы и размеров оргстекла деталей остекления полирование проводится вручную или механизированным способом с применением специальных полировально-шлифовальных машинок. В процессе производства каждая партия полировочной пасты подвергается проверке по показателям внешнего вида, полирующей способности, реакции рН среды, содержанию полирующего порошка – минеральной составляющей, после прокаливании навески пасты. Определение полирующей способности пасты проводят путем полировки пластин из органических стекол марок АО-120, АО-120А и СО-120А размером 200×200 мм, толщиной от 2 до 24 мм. Поверхность органического стекла после обработки пастой при рассмотрении невооруженным глазом на расстоянии 40 см должна быть чистой, блестящей и не иметь царапин. Волосяные царапины допускаются, но не в виде сплошной сетки. Применение полировочной пасты ВИАМ-3 позволяет значительно повысить ресурс эксплуатации и надежность изделий из оргстекла, снизить энергозатраты и стоимость изделий.

С помощью полировальной пасты ВИАМ-3 успешно решена проблема устранения наиболее массовых дефектов на поверхности оргстекла глубиной значительно меньше 0,1 мм. Для устранения более значительных дефектов перед полировкой необходимы материалы и технологии для шлифовки оргстекла.

Шлифование деталей остекления должно проводиться квалифицированными специалистами, имеющими необходимый опыт для проведения таких работ. Шлифование осуществляется способами – вручную или специальными машинками – с применением необходимых материалов по программе ремонта каждой конкретной детали в соответствии с конструкторской документацией. На некоторых авиационных предприятиях для удаления особо крупных дефектов освоен и успешно применяется способ циклевания.

Проведенные исследования по шлифовке оргстекла с помощью абразивных кругов показали, что для удаления дефектов необходимо применение шлифовальных кругов размерами до 100 мкм в зависимости от глубины повреждений.

Для шлифования органических стекол в ВИАМ разработана и производится паста шлифовальная для органического стекла (ТУ1-595-9-609–2000), которая представляет собой сложную масляно-водную систему, содержащую минеральный шлифовальный порошок. Паста применяется для удаления с поверхности органического стекла царапин и других дефектов глубиной  $\geq 0,1$  мм, возникающих в процессе эксплуатации деталей авиационного остекления.

В процессе производства паста подвергается проверке по показателям внешнего вида, шлифующей способности, реакции рН среды, содержанию шлифовального порошка (минерального остатка). Определение шлифовальной способности пасты проводят путем шлифовки пластин из органических стекол марок АО-120 и СО-120 размером 200×200 мм, толщиной от 2 до 24 мм. Поверхность оргстекла после обработки пастой должна быть максимально гладкой, без каких-либо поверхностных и точечных дефектов и царапин. Такая поверхность считается подготовленной для дальнейшей операции – полировки с помощью полировальной пасты ВИАМ-3.

Положительный результат влияния шлифования и полировки на характеристики оргстекла при эксплуатации получен при испытании криволинейных деталей остекления из органического стекла АО-120, отформованных методом «холодного формования», при котором возможно изготовление оргстекла пилотских кабин и иллюминаторов с хорошими оптическими показателями (минимизация дефектов типа «внешний вид» и

«термостойкость»). На поверхность образца наносили искусственные дефекты, имитирующие эксплуатационные, глубиной до 0,1 мм – царапины (наносились механическим способом) и «серебро» (наносилось при воздействии ацетона). Для отработки режимов механической обработки поверхности криволинейных образцов и деталей в ВИАМ изготовлены партии полировальной пасты ВИАМ-3 и шлифовальных паст марок М-20 и М-40. После обработки поверхности образцов шлифовальной и полировальной пастами светопрозрачность у образцов была равна 92%, «серебростойкость» составляла >3 мин. Образцы направлены на экспозицию в течение 12 мес на климатические станции в умеренно холодном климате г. Москвы (МЦКИ) и умеренно теплом климате г. Геленджика (ГЦКИ). После открытой экспозиции в МЦКИ, а также на открытой площадке и под навесом в ГЦКИ высокие показатели светопрозрачности и «серебростойкости» у образцов сохранились.

Рассмотрим другие примеры эффективности применения технологий шлифовки и полировки.

### ***Обеспечение высокого качества крупногабаритных ориентированных оргстекел благодаря шлифовке и полировке***

В настоящее время в России самые высококачественные ориентированные оргстекла, обеспечивающие высокие характеристики авиационного остекления при изготовлении и эксплуатации, выпускает ООО «Рошибус» в соответствии с лицензионным договором с ВИАМ. В первую очередь это оргстекло АО-120, а также уже широко внедренный в авиации его аналог с повышенными оптическими и физико-механическими характеристиками – оргстекло АО-120А [13].

Необходимое для ориентации исходное полиметилметакрилатное органическое стекло СО-120А изготавливает опытный завод ФГУП «НИИ Полимеров им. В.А. Каргина». Предприятия ООО «Рошибус» и ФГУП «НИИ Полимеров» освоили также изготовление новых ориентированных оргстекел на основе частично сшитых и сополимерных оргстекел АО-120С, ВОС-2АО, АО-120ПД и др. Высокое качество выпускаемых оргстекел связано с высокой профессиональной подготовкой коллективов предприятий, а также основано на применении в процессе ориентации широкого комплекса специального современного оборудования, в том числе не в последнюю очередь – для обязательной шлифовки и полировки всех крупногабаритных листов оргстекла.

Проведены исследования характеристик фторакрилатных органических стекол Э-2 (Э-2У) и СО-200 после длительной эксплуатации в деталях остекления самолетов, на поверхности которых возникают значительные остаточные напряжения, приводящие к снижению физико-механических свойств. Проведенные исследования показали, что удаление поврежденного слоя оргстекла на глубину до 2 мм позволяет восстановить работоспособность остекления на основе самого теплостойкого в мире оргстекла марки СО-200 до уровня физико-механических характеристик, достаточного для дальнейшей (20 лет) безопасной эксплуатации воздушного судна [14].

Зарубежных статей о новых вариантах материалов и технологий о полировальных и шлифовальных пастах для авиационного остекления не обнаружено.

Многолетние творческие контакты с российским отделением американской фирмы «ЗМ» – мирового лидера в производстве паст различного назначения, и исследование лучших паст фирмы «ЗМ» не показали каких-либо преимуществ перед пастой ВИАМ-3 при полировке авиационных органических стекол.

К сожалению, изучение достоинств *поликарбонатов* в течение ряда десятилетий в отечественном авиастроении не сделало его авиационным материалом для остекления из-за низких оптических характеристик и атмосферостойкости. В настоящее время

Институт пластмасс совместно с ФГУП «ВИАМ» разработал новый поликарбонат (ТУ2256-539-00209349–2015 «Листы атмосферостойкие оптические прозрачные марки ВТП-8/ПК-ЭА-7,0 из поликарбоната»), который в настоящее время проходит опробование для применения в авиационной технике. Поликарбонат марки ВТП-8/ПК-ЭА-7,0 показал высокую стабильность физико-механических характеристик при обработке поверхности полировальной пастой ВИАМ-3.

### Заключения

1. Показана ведущая роль ФГУП «ВИАМ» в создании авиационных акрилатных оргстекло, технологий молекулярной ориентации, их промышленного производства, технологий изготовления деталей авиационного остекления с высокой надежностью и ресурсом – до десяти и более лет.

2. Усложнение условий эксплуатации авиационной техники требует полного перехода в отечественном авиастроении на применение органических стекол преимущественно в ориентированном состоянии. Это необходимо для дальнейшего повышения ресурса остекления до ресурса планера (до 20–30 лет). Разрабатываются также материалы и технологии шлифования и полирования деталей остекления в условиях ремонта и непосредственно при эксплуатации для удаления всех возникающих дефектов, снижающих оптические и физико-механические характеристики оргстекло.

3. Приведены характеристики и положительные результаты испытаний при совместном применении разработанных и выпускаемых ФГУП «ВИАМ» паст: полировальной и шлифовальной марок М-20 и М-40.

4. В настоящее время в России самые высококачественные ориентированные оргстекла, обеспечивающие необходимые оптические и физико-механические характеристики деталей остекления при формовании и эксплуатации, выпускает в соответствии с лицензионным договором и патентом ФГУП «ВИАМ» предприятие ООО «Рошибус» – это органическое стекло АО-120, а также его аналог с повышенными характеристиками, широко внедренный в авиации, – оргстекло АО-120А. Предприятия ООО «Рошибус» и ФГУП «НИИ Полимеров» освоили также изготовление новых ориентированных оргстекло марок АО-120С, ВОС-2АО, АО-120ПД и др. Применение широкого комплекса специального современного оборудования, в том числе для обязательной шлифовки и полировки крупногабаритных листов оргстекла, обеспечивает высокое качество выпускаемых органических стекол.

5. Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.4. «Оптические материалы и материалы остекления» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 343 с.
4. Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Исаенкова Ю.А. История создания материалов самолетного остекления и полимерных материалов со специальными свойствами (к 75-летию лаборатории полимерных материалов со специальными свойствами) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 81–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-81-86.

5. Способ формования изделий из органического стекла: пат. 203804 Рос. Федерация; заявл. 19.12.00; опубл. 10.05.03.
6. Гудимов М.М. Трещины серебра на органическом стекле. М.: Изд-во ЦИПККАП, 1997. 260 с.
7. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
8. Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Авиационные органические стекла. Проблемы и перспектива // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2004. Вып. 3. С. 3–6.
9. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
10. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С. 70–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
11. Марек Д., Томка М. Акриловые полимеры. М.: Химия. 1966. 320 с.
12. Полировальная паста: пат. 2200179 Рос. Федерация; заявл. 19.01.01; опубл. 10.03.03.
13. 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.
14. Акользин С.В., Фролков А.И. Восстановление работоспособности теплостойкого авиационного остекления при ремонте и в эксплуатации // *Авиационная промышленность*. 2014. №1. С. 41–44.
15. 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.