

- влияние на сверхпластические свойства никелевых сплавов с неизоморфным выделением второй фазы //ФММ. 2006. Т.103. №1. С. 93–104.
4. Сегал В.М. Процессы обработки металлов интенсивной пластической деформацией //Металлы. 2006. №5. С. 130–141.
 5. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом //Известия АН СССР. Металлы. 1981. №1. С. 115–123.
 6. Безетной В.П. Технологический анализ равноканального углового прессования заготовок //Технология легких сплавов. 2007. №1. С. 109–117.
 7. Колмогоров Г.Л. Технологические особенности получения наноструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации кручением //Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2008. №9. С. 8–10.
 8. Васильев Л.С., Ломаев И.А. О возможных механизмах эволюции наноструктур при интенсивной пластической деформации металлов и сплавов //ФММ. 2006. Т. 101. №4. С. 417–424.
 9. Чутман М.Ю., Миноелян К.Н., Овидько И.А. Рост зерен и миграция границ при пластической деформации нанокристаллических материалов //Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып.7. С. 1216–1229.

УДК 669.018.821:669.717

Ю.М. Панченко, П.В. Стрекалов, Д.В. Чесноков,
А.Д. Жирнов, В.П. Жиликов, С.А. Каримова, Т.И. Тарараева

ЗАВИСИМОСТЬ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СПЛАВА Д16 ОТ ЗАСОЛЕННОСТИ И МЕТЕОПАРАМЕТРОВ ПРИМОРСКОЙ АТМОСФЕРЫ

Обсуждаются результаты двухлетних атмосферных коррозионных испытаний сплава Д16 в представительных приморских районах в естественных условиях и условиях искусственной седиментации морской соли, соответствующих интервалу засоленности от 0 до 300 мг Cl/(м²·сут).

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, коррозионная стойкость, метеопараметры, приморская атмосфера, хлорид-ионы, скорость коррозии, математическое моделирование.*

Алюминиевые сплавы наиболее подвержены влиянию хлорид-ионов, поэтому в непромышленных районах интенсивная коррозия сплавов наблюдается на территориях, примыкающих к морским побережьям. При повышенной относительной влажности воздуха из-за адсорбции влаги солями на поверхности возникает пленка электролита, в которой развивается электрохимический коррозионный процесс, вызывающий питтинговую, общую, расслаивающую коррозию и коррозионное растрескивание [1–3].

Седиментация морских солей на поверхность специфична для каждого конкретного места проведения испытаний и не постоянна во времени [1, 2, 4–8]. Коррозионные потери алюминиевых сплавов в этих районах не пропорциональны засоленности атмосферы, а зависят от поверхностной концентрации хлоридов и продолжительности увлажнения поверхности.

Учитывая, что на металлы воздействует множество метеорологических и аэрохимических факторов, влияние на коррозию непосредственно хлорид-ионов можно оценить при испытании металлов в одном климате, но при различных уровнях засо-

ленности атмосферы. С этой целью исследования неплакированного сплава Д16 проводились в открытой атмосфере на берегу Баренцева моря (КИС «Дальние Зеленцы») и Японского моря (КИС «Владивосток») с естественной и искусственной седиментацией хлоридов.

Методика исследования

Образцы сплава Д16 размерами 96×47×1 мм размещали на стендах под углом 45 град к горизонту верхней стороной на юг. Удаленность стендов от берега моря 25 и 150 м в Мурманске и 50 м во Владивостоке. В каждом из климатических районов проводили испытания длительностью 3 и 6 мес, 1 и 2 года при шести режимах засоленности атмосферы. При всех режимах испытаний для каждого периода устанавливали по три образца.

Естественную засоленность атмосферного воздуха морскими солями определяли одновременно двумя общепринятыми методами «влажной свечи» [6–9, 10, 11] и «сухого полотна» [8]. «Свечу» и два полотна располагали под одним навесом в непосредственной близости от образцов. Анализ «свечи» и «полотен» на засоленность атмосферы после месячной их экспозиции проводили нефелометрическим методом.

Для определения массы хлорид-ионов m_{Cl} , содержащихся на поверхности металла (непосредственно в соли NaCl и в растворимых продуктах коррозии), образцы, снятые с экспозиции, кипятили в течение часа в дистиллированной воде, которую затем анализировали на содержание хлоридов также нефелометрическим методом.

Для расширения диапазона загрязненности атмосферы морскими солями, использован метод нанесения на верхнюю поверхность образца растворов разных концентраций NaCl. Этот метод позволяет контролировать нанесенное количество хлоридов. Естественная засоленность атмосферы дополнена седиментацией хлорид-ионов повышенного уровня – порядка 30; 75; 175 и 275 мг Cl⁻/(м²·сут) во Владивостоке и 175; 275 мг Cl⁻/(м²·сут) в Мурманске.

Для искусственного создания на поверхности образцов седиментаций Cl⁻: 30; 75; 175 и 275 мг Cl⁻/(м²·сут), 1 раз в неделю наносили на верхнюю поверхность порции растворов, содержащих соответственно 0,99; 2,475; 5,775 и 9,075 мг Cl⁻.

Кроме того, естественную седиментацию морских солей на поверхности образцов уменьшали, имитируя дополнительное периодическое выпадение дождей. Для этого верхнюю поверхность определенных партий образцов один раз в неделю обливали дистиллированной водой во Владивостоке объемом 10 мл, а в Мурманске – с учетом слабоинтенсивных естественных дождей – 20 и 30 мл. Таким образом, во Владивостоке образцы испытывались в 50 м от береговой линии в следующих режимах: в естественных атмосферных условиях (природная седиментация хлоридов); при имитации засоленности хлоридами 30; 75; 175 и 275 мг Cl⁻/(м²·сут) и одна партия образцов испытывалась в естественных натуральных условиях, но с дополнительным обливанием водой верхней стороны образца.

В Мурманске одна серия образцов экспонировалась в естественных условиях на расстоянии 25 м от береговой линии, остальные – на коррозионной площадке (100–150 м от берега) при пяти режимах: естественные условия; с дополнительным нанесением порций спиртовых растворов NaCl концентрациями, имитирующими седиментацию хлоридов 75 и 275 мг Cl⁻/(м²·сут) и 2 партии образцов – с дополнительным обливанием верхней поверхности дистиллированной водой разных объемов.

Для изучения влияния метеорологических факторов на коррозионную стойкость сплава Д16 были рассмотрены лишь те факторы, которые могут существенно влиять на коррозионный процесс. К ним отнесены: температура и относительная влажность воздуха, продолжительность адсорбционно-фазового увлажнения (*TOW*), солнечного сияния, дождей и количество выпавших дождей.

Гравиметрические параметры, к которым относятся коррозионные потери (K), масса удержанных продуктов коррозии (m), масса растворимых продуктов ($m_{р.п.}$), рассчитывали в $г/м^2$, с учетом общей площади пластин-образцов.

Коррозионные потери образцов сплава Д16

Кинетика коррозионных потерь представлена на рис. 1 и 2. При всех режимах испытаний наблюдается слабое торможение коррозионного процесса в Мурманске и более существенное – во Владивостоке, особенно в естественных условиях и с обливанием. В Мурманске коррозионные потери образцов с дополнительным обливанием несколько меньше, чем в естественных условиях. Во Владивостоке дополнительное обливание образцов дало малый эффект – вероятно, периодически выпадающие интенсивные дожди смывали практически все хлориды с поверхности.

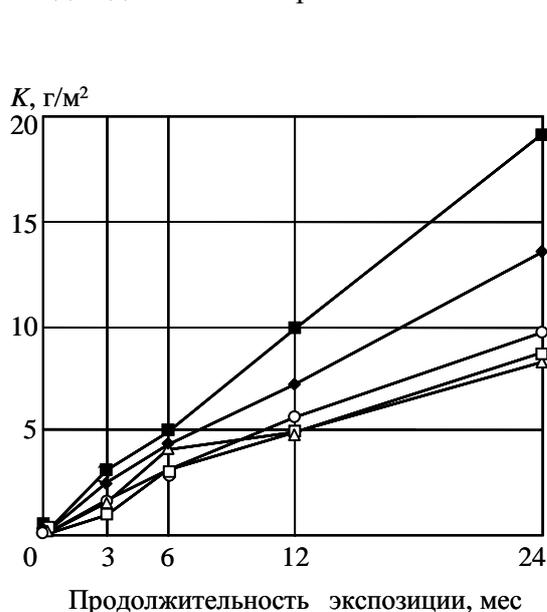


Рис. 1. Кинетика коррозионных потерь в естественных условиях – г. Мурманск (○), при дополнительном обливании 20 мл H₂O (Δ), 30 мл H₂O (□), а также при дополнительном нанесении Cl⁻:

◆, ■ – 75 и 275 мг/(м²·сут) соответственно

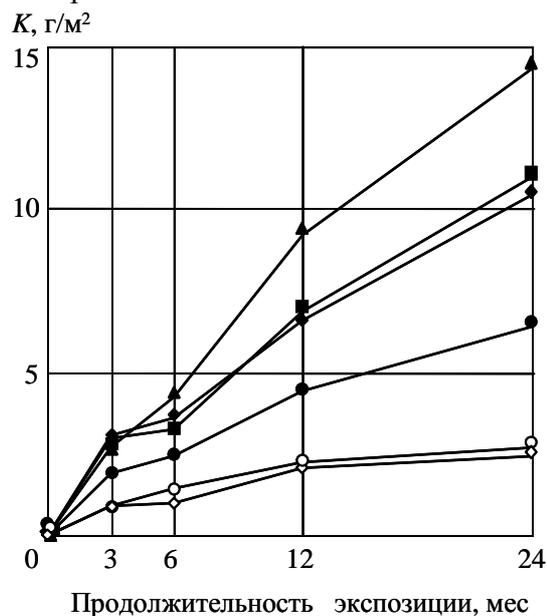


Рис. 2. Кинетика коррозионных потерь в естественных условиях – г. Владивосток (○), при дополнительном обливании 10 мл H₂O (◇), а также при дополнительном нанесении Cl⁻:

● – 30 мг/(м²·сут); ◆ – 75 мг/(м²·сут); ▲ – 175 мг/(м²·сут); ■ – 275 мг/(м²·сут)

Коррозионные потери сплава Д16 в естественных условиях и с обливанием больше в Мурманске, чем во Владивостоке, в 2 и 4 раза через один и два года соответственно, несмотря на практически одинаковую естественную засоленность атмосфер. При дополнительном нанесении 75 мг Cl⁻/(м²·сут) коррозионные потери через год в обоих районах испытаний сравнимы, порядка 7 г/м², но через 2 года во Владивостоке, даже с учетом существенно завышенных значений в результате коррозии нижней стороны, всего 10 г/м² против 14 г/м² – в Мурманске. При режиме с дополнительным нанесением 275 мг Cl⁻/(м²·сут) в Мурманске коррозионные потери, линейно увеличиваясь во времени, за два года составили 20 г/м². Во Владивостоке при этом режиме во все периоды испытаний они сравнимы с потерями при седиментации всего 75 мг Cl⁻/(м²·сут), хотя масса хлоридов на поверхности этих образцов больше. Наибольшие коррозионные потери во Владивостоке – при режиме дополнительной имитации засоленности 175 мг Cl⁻/(м²·сут), но они меньше, чем в Мурманске при дополнительных 275 мг Cl⁻/(м²·сут). Коррозия

сплава Д16 в Мурманске больше или значительно больше, чем во Владивостоке при соответствующих режимах испытаний.

Периодическое нанесение на верхнюю поверхность алюминиевых образцов определенной порции растворов с известной концентрацией хлорида натрия позволило имитировать регламентируемую седиментацию хлоридов. На рис. 3 и 4 представлена зависимость коррозионных потерь образцов от интегральной седиментации хлоридов.

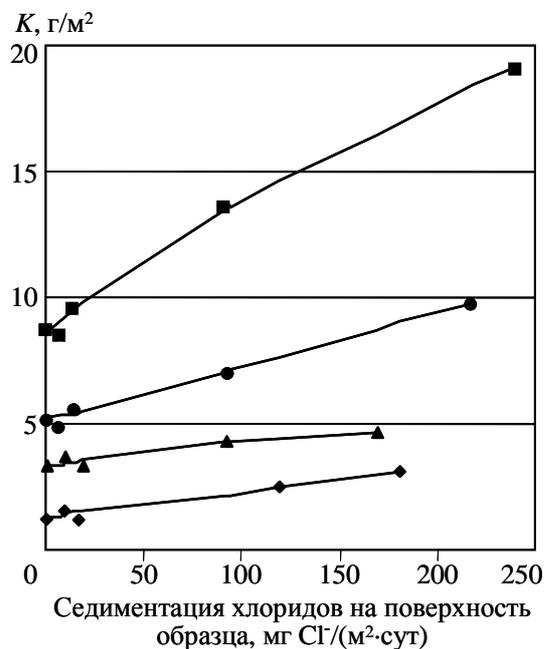


Рис. 3. Зависимость коррозионных потерь в г. Мурманске от седиментации хлоридов спустя 3 (◆) и 6 мес (▲), 1 (●) и 2 года (■) испытаний

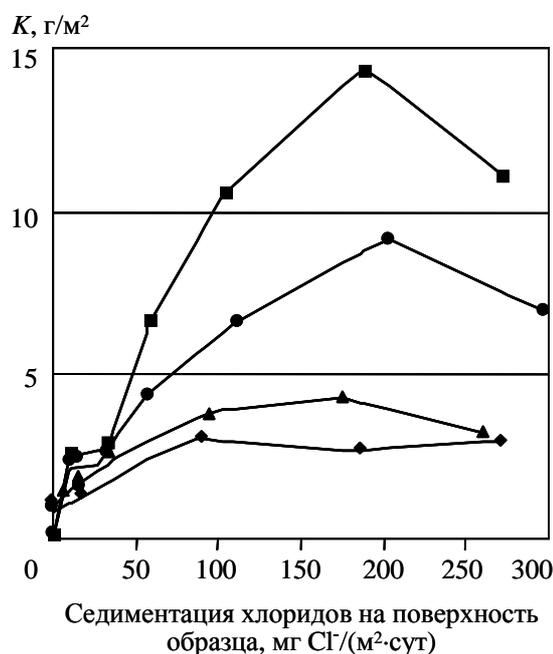


Рис. 4. Зависимость коррозионных потерь в г. Владивостоке от седиментации хлоридов спустя 3 (◆) и 6 мес (▲), 1 года (●) и 1 года 11 мес (■) испытаний

В Мурманске наблюдается явно выраженная линейная зависимость коррозии от засоленности поверхности.

Во Владивостоке линии зависимости коррозии во все периоды (кроме 3 мес) испытаний проходят через максимум, приходящийся на 175–220 мг Cl⁻/(м²·сут), т. е. коррозионные потери увеличиваются лишь до определенного уровня засоленности, дальнейшее увеличение седиментации приводит к уменьшению коррозии. Необходимо отметить, что коррозионные потери образцов при режиме искусственной седиментации в течение 1 года 11 мес завышены коррозией нижней стороны, и тем больше, чем выше агрессивность, поэтому экспериментальные точки линии зависимости для этого срока должны быть расположены ниже.

В условно чистой атмосфере Мурманска (Cl⁻→0) коррозионные потери для каждого срока испытаний существенно больше, чем во Владивостоке.

Такое отличие можно объяснить особенностями характера коррозионного поражения сплава Д16 и структуры удержанных продуктов коррозии в районах испытаний.

В Мурманске питтинговое разрушение оксидного слоя наблюдается в местах с первично осевшими солями – хлористым натрием. При отсутствии дождей или при малоинтенсивных дождях эти пораженные участки сохраняются, увеличивается глубина и число питтингов, объединяющихся в небольшие пятна. Обладая заметной адсорбционной способностью к влаге и коррозивным примесям в воздухе, точечные объемные

рыхлые соли продуктов коррозии усиливают агрессивность среды в местах их образования.

На верхней стороне образцов во Владивостоке коррозионный процесс начинался также в порах оксидной пленки. Но в атмосферных условиях Владивостока продукты коррозии под действием солнечной инсоляции и интенсивных дождей подвержены периодическому высыханию, уплотнению, гидратации. В результате продукты превращаются в слой, равномерно распределенный по всей поверхности, который способствует также равномерному распределению на образце агрессивных примесей и пленки влаги. Места активных центров с солями NaCl под действием интенсивных дождей и оседания новых аэрозолей непрерывно меняются, что приводит, помимо питтинговой, к сравнительно равномерной общей коррозии.

Развитие питтингов в условиях Мурманска приводит к существенной коррозии в сравнении с Владивостоком при всех режимах испытаний.

Математическое моделирование коррозии алюминиевого сплава Д16

Для расчета коррозионных потерь сплава Д16 (K) воспользуемся уравнением линейной зависимости коррозии от засоленности атмосферы [12], наблюдаемой (зависимости) в Мурманске – во всем исследуемом интервале седиментации хлорид-ионов, а во Владивостоке (в первом приближении) – до 220 мг Cl/(м²·сут):

$$K=K_0+\alpha C_{Cl}, \quad (1)$$

где K_0 – потери металла в условно чистой атмосфере за соответствующий срок испытаний, г/м²; α – угловой коэффициент, характеризующий непосредственную зависимость коррозии от седиментации хлоридов, г/м²:мг Cl/(м²·сут); C_{Cl} – седиментация хлоридов на поверхность образца, мг/(м²·сут).

Величина годовых коррозионных потерь металла в условно чистой атмосфере K_0 зависит от условий образования продуктов коррозии: солнечной инсоляции и длительности увлажнения (TOW , ч). В связи с отсутствием данных по солнечной инсоляции их – в первом приближении – можно заменить продолжительностью солнечного сияния ($\tau_{\text{солн.сиян}}$, ч).

В результате математическая модель зависимости годовых коррозионных потерь металла от климатических и аэрохимических параметров атмосферы имеет вид:

$$K = \frac{A_1 \cdot TOW}{\tau_{\text{солн.сиян}}} + A_2 \frac{T \cdot TOW}{h} C_{Cl}, \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – коэффициенты; T – среднегодовая температура испытаний; h – скорость коррозии.

Таким образом, математическая модель (1), основанная на том, что годовые коррозионные потери металла являются суммой коррозионных потерь в условно чистой атмосфере и потерь, обусловленных влиянием хлорид-ионов, представлена в виде уравнения регрессии (2) с использованием климатических параметров атмосферы, влияющих на протекание коррозионного процесса.

По среднегодовым метеорологическим параметрам T , $\tau_{\text{солн.сиян}}$ и h за 1-й год испытаний, составивших в Мурманске 1,2°C; 533 ч и 0,45 мм/ч и во Владивостоке 6°C; 1754 ч и 1,3 мм/ч соответственно, и суммарной за год продолжительности TOW в Мурманске 4250 ч и во Владивостоке 4230 ч, рассчитаны величины постоянных: $A_1=0,639$; $A_2=1,78 \cdot 10^{-6}$.

Рассчитанные по уравнению (2) годовые коррозионные потери сплава Д16 (в условно чистой атмосфере, обусловленные воздействием хлорид-ионов, интегральные), а также наблюдаемые коррозионные потери и ошибка расчета представлены в таблице.

Величины годовых коррозионных потерь (г/м²) сплава Д16 в условно чистой атмосфере, вызванные воздействием Cl⁻, интегральные и наблюдаемые; ошибка расчета

Район	Седиментация хлоридов, мг/(м ² ·сут)	K ₀	αC _{Cl}	Коррозионные потери		Ошибка расчета, %
				интегральные K ₀ + αC _{Cl}	наблюдаемые	
Мурманск	16,2	5,29	0,34	5,63	5,6	0,5
	94,7	5,29	1,98	7,27	7,15	1,7
	234,7	5,29	4,91	10,20	9,82	3,9
Владивосток	31,4	1,71	1,29	3,0	2,28	24,0
	61,0	1,71	2,50	4,21	4,4	-4,3
	113,7	1,71	4,67	6,38	6,58	-3,0

Получена хорошая сходимость рассчитанных величин коррозионных потерь с наблюдаемой коррозией. Это свидетельствует о возможности применения данной модели с найденными величинами постоянных A_1 и A_2 для районов с подобными климатическими условиями.

Следует отметить, что постоянные A_1 и A_2 должны быть найдены исходя из большого массива экспериментальных результатов. Кроме того, в данной модели, возможно, не учтены метеорологические факторы, незначимые в данных районах испытаний, но значительно влияющие на коррозию в других климатических условиях. Поэтому некорректно применение этой модели в районах с существенно отличающимися метеорологическими параметрами без проведения дополнительных аналогичных исследований.

Оценку коррозионных потерь за последующие годы необходимо проводить по моделям долгосрочного прогноза, учитывая, что кинетика коррозии за два года имеет нелинейный характер при всех режимах, особенно в естественных условиях Владивостока.

Таким образом, на основании исследования коррозионной стойкости сплава Д16 на КИС «Дальние Зеленцы» и «Владивосток» при шести режимах естественной и искусственной седиментации хлоридов на верхнюю поверхность образцов получена:

- сравнительная оценка климатических параметров и естественной засоленности атмосферы, влияющих на коррозионный процесс. Показано, что суммарная за год продолжительность адсорбционно-фазового увлажнения практически одинакова, несмотря на различие климата. Существенное отличие наблюдается по режиму выпадения дождей и длительности солнечного сияния. Исследована кинетика коррозионных потерь неплакированного сплава Д16 после испытаний образцов при шести режимах в течение 3 и 6 мес, 1 и 2 лет. Показано, что в Мурманске коррозионный процесс практически не замедляется во времени, но во Владивостоке происходит торможение процесса коррозии, особенно при испытаниях в естественных условиях. Коррозионные потери увеличиваются в соответствии с повышением уровня агрессивности;

- получена зависимость коррозии сплава Д16 от интегральной седиментации хлоридов на верхнюю поверхность образцов, проанализирован механизм протекания коррозии;

- разработана математическая модель, описывающая связь годовых коррозионных потерь с климатическими параметрами и засоленностью атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsutsumi Y., Nishikata A., Tsuru T. //Corros. Sci. 2007. V.49. № 3. P. 1394.
2. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П., Тарараева Т.И., Мищенко Е.Н. //Коррозия: материалы, защита. 2007. № 8. С.23.

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-