

Научная статья

УДК 620.1:53.093:53.096

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-15-26

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА В ПОЛУЗАСУШЛИВОМ И СУБТРОПИЧЕСКОМ КЛИМАТЕ

Е.В. Куршев<sup>1</sup>, С.Л. Лонский<sup>1</sup>, И.В. Мекалина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Изделия из органических стекол широко используют в авиационной технике для различных видов остекления, которые работают в сложных эксплуатационных условиях – например, подвергаются воздействию низких и высоких температур, влаги, ультрафиолетового облучения и др. Эти факторы могут влиять на эксплуатационную надежность оргстекла. В настоящее время в конструкциях авиационного остекления наиболее распространено применение ориентированного полиметилметакрилатного оргстекла АО-120. В работе представлены результаты исследования микроструктуры поверхностей оргстекла АО-120, подвергшегося продолжительному воздействию атмосферных факторов в различных климатических зонах США (Аризона и Флорида).

**Ключевые слова:** полиметилметакрилатное оргстекло АО-120, микроструктурные исследования, микрофазовая структура, климатические зоны, атмосферные факторы, авиационная техника, детали остекления

**Для цитирования:** Куршев Е.В., Лонский С.Л., Мекалина И.В. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности органического стекла в полусухом и субтропическом климате // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-15-26.

Scientific article

## INFLUENCE OF LONG CLIMATIC AGING ON MICROSTRUCTURE OF SURFACE OF ORGANIC GLASS IN SEMI-ARID AND SUBTROPICAL CLIMATE

E.V. Kurshev<sup>1</sup>, S.L. Lonskii<sup>1</sup>, I.V. Mekalina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Products from organic glasses are widely used in aviation engineering for different types of glazing which work in difficult operational conditions, for example, are exposed to influence of low and high temperatures, moisture, ultra-violet radiation, etc. These factors can influence operational reliability of organic glass. Now application of the oriented polymethyl methacrylate AO-120 organic glass is most widespread in designs of aviation glazing. In the real work results of research of microstructure of surfaces of the AO-120 organic glass which has undergone long influence of atmospheric factors in different climatic zones of the USA (Arizona and Florida) are provided.

**Keywords:** polymethyl methacrylate glazing AO-120, microstructural researches, microphase structure, climatic zones, atmospheric factors, aviation engineering, glazing details

**For citation:** Kurshev E.V., Lonskii S.L., Mekalina I.V. Influence of long climatic aging on microstructure of surface of organic glass in semi-arid and subtropical climate. *Trudy VIAM*, 2022, no. 3 (109), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-15-26.

### Введение

Органические стекла, широко применяемые в деталях остекления самолетов, рассматривают наряду с металлическими материалами как элементы силовых конструкций внешнего контура самолета и относят к группе материалов, повреждение и разрушение которых может привести к авиакатастрофе [1–3].

При эксплуатации самолетов детали остекления из органических стекол подвергаются воздействию как физических, так и химических факторов внешней среды: ультрафиолетовое излучение Солнца; перепады температур и влажности; окисление, обусловленное наличием кислорода и озона в атмосфере; гидролиз под действием атмосферной влаги и осадков; эрозионное воздействие ветра и дождя и т. д. Все указанные факторы могут вызывать изменения микроструктуры и эксплуатационных характеристик материалов. Поэтому при оценке эксплуатационной надежности материалов остекления на основе органических стекол большое внимание уделяют их атмосферостойкости [4–11]. Стабильность свойств во времени при воздействии атмосферных факторов – одно из основных требований, предъявляемых к органическим стеклам для остекления самолетов [12].

Для оценки ресурсных характеристик, связанных с атмосферными факторами, на протяжении многих лет в России проводили систематизацию данных по исследованию атмосферостойкости в различных климатических зонах (умеренной, тропической, субтропической, пустынной) серийных органических стекол, эксплуатируемых в деталях остекления отечественных самолетов [13].

Следует отметить, что совершенствование существующих, а также создание новых материалов остекления невозможно осуществлять без изучения микрофазовой структуры органических стекол, которая в значительной мере определяет их технологические и эксплуатационные свойства.

В данной работе приведены результаты исследования влияния длительного климатического старения в зонах полусухого (Аризона) и тропического влажного климата США (Флорида) на микроструктуру поверхности ориентированного полиметилметакрилатного органического стекла АО-120. Проведен анализ и установлены особенности изменения микрофазовой структуры поверхности оргстекла с учетом воздействия атмосферных факторов при продолжительной экспозиции на климатических площадках Аризоны и Флориды в течение 1 года и 3 лет.

Климат Аризоны характеризуется высокими температурами и низкой влажностью в течение года, а также повышенной дозой солнечного излучения из-за высокой интенсивности солнечного света. Летом температура воздуха в Аризоне может достигать 46 °С.

Климату Флориды также присуща высокая интенсивность солнечного света. Однако его особенностью является длительный период высоких температур воздуха с обильными дождями и, как следствие, высокая влажность воздуха в течение всего года. Максимальная летняя температура воздуха Флориды достигает 32 °С.

Средняя температура воздуха и солнечная радиация в Аризоне выше, чем во Флориде. При этом во Флориде значительно больше средняя влажность воздуха и количество выпадающих осадков.

Полученные результаты являются частью комплекса исследований по сохранению свойств материала после длительного натурального старения в различных климатических зонах.

Результаты исследований базируются на предложенной ранее гипотезе строения полимеров [14–17], согласно которой они образованы изотропной легко деформируемой дисперсионной средой, «наполненной» частицами микродисперсной фазы. Следует

отметить, что микроструктура многих полимеров, возникающая на стадиях синтеза и переработки, в результате молекулярно-массового расслоения образует непрерывную молекулярно-дисперсную среду, в которой распределены коллоидные частицы дисперсной фазы размером 100–300 нм и более. Дисперсные частицы и их агрегаты микрофазовой структуры сравнительно легко деформируются под действием механических напряжений и повышенной температуры [14]. Поэтому полученные результаты исследования по влиянию длительной экспозиции в условиях полусухого климата (Аризона) и зоне влажного тропического климата (Флорида) в течение 1 года и 3 лет на микрофазовую структуру органического стекла имеют важное значение для оценки поведения при воздействии климатических факторов и используются при установлении и продлении сроков эксплуатации изделий авиационной техники.

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») [18–21].

### Материалы и методы

Объектом микроструктурных исследований служили образцы ориентированного полиметилметакрилатного оргстекла марки АО-120 (по ТУ 6-02-5757599-121–90). Для определения влияния природных климатических факторов (температуры, влажности, солнечной радиации, осадков и др.) проводили сравнительные исследования образца из оргстекла АО-120 до старения с образцами, вырезанными из плит оргстекла, находившихся на экспозиции в зонах полусухого (Аризона) и влажного тропического климата (Флорида) в течение 1 года и 3 лет. Стенды для образцов на территории испытательных климатических станций располагались таким образом, что поверхности образцов были ориентированы на юг под углом наклона 45 градусов к линии горизонта для обеспечения максимального воздействия солнечного излучения на поверхности образцов.

Плиты из оргстекла до и после экспозиции распиливали на образцы размером 50×50 мм на ручном отрезном станке алмазным диском с охлаждением места реза образца специальной охлаждающей жидкостью.

С целью удаления загрязнений, образовавшихся в процессе экспозиции на поверхностях образцов, осуществляли промывку образцов под струей холодной водопроводной воды до полной визуальной смывки загрязнений с поверхности. После этого образцы промывали в дистиллированной воде и сушили при комнатной температуре. При промывке образцов моющие средства не использовали, также не осуществлялось механическое воздействие на их поверхности. Следует отметить, что поверхности образцов после длительной экспозиции исследовали как в отмытом виде для изучения микроструктуры поверхности органического стекла, так и без отмытки для изучения образовавшихся загрязнений в результате экспозиции.

Приклеивание образцов к специальным держателям для сканирующего электронного микроскопа проводили с помощью токопроводящего клея на основе углерода с тщательной обмазкой клеем торцов и боковых поверхностей образцов. После полного высыхания углеродного клея поверхности образцов подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке ионно-плазменного травления JFC-1100 (фирма Jeol). Для снятия электрических зарядов и исключения возможных термических повреждений от воздействия пучка электронов, а также для увеличения вторичной электронной эмиссии при исследовании образцов из оргстекла в сканирующем электронном микроскопе, их поверхности металлизировали в вакуумной установке магнетронного распыления Q150R ES (фирма Quorum Technologies).

Микроструктурные особенности поверхностей полиметилметакрилатного оргстекла АО-120 исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 XMU в режиме вторичных электронов при увеличении от  $\times 10000$  до  $\times 50000$ .

Количественную обработку полученных данных микроструктурных исследований проводили с применением программного обеспечения анализа изображений ImageScore Color. Поскольку обнаруженные в процессе исследования агрегаты микродисперсных частиц оргстекла имеют неправильную форму, для корректного определения их размеров проводили измерения диаметра Фере среднего. Диаметр Фере средний – это среднее значение длин проекций диаметра частиц на 64 оси.

### Результаты и обсуждение

Визуальный осмотр образца из оргстекла АО-120, не подвергавшегося климатическому старению (исходный образец), не выявил на поверхности дефектов в виде царапин и пор. На микрофотографии (рис. 1) видно, что образец имеет типичную микрофазовую структуру оргстекла, которая представляет собой микрогетерогенную систему, состоящую из частиц микродисперсной фазы, распределенных в молекулярно-дисперсионной среде. Показано, что микрофазовая структура оргстекла состоит из двух фаз, одна из которых представляет собой частицы и агрегаты дисперсных частиц (светлые участки), а другая (темное поле) является однородной дисперсионной средой, в которой распределена микродисперсная фаза [14–16]. Размеры (диаметр Фере средний) частиц микродисперсной фазы исходного образца находятся в интервале от 52 до 157 нм (рис. 2).

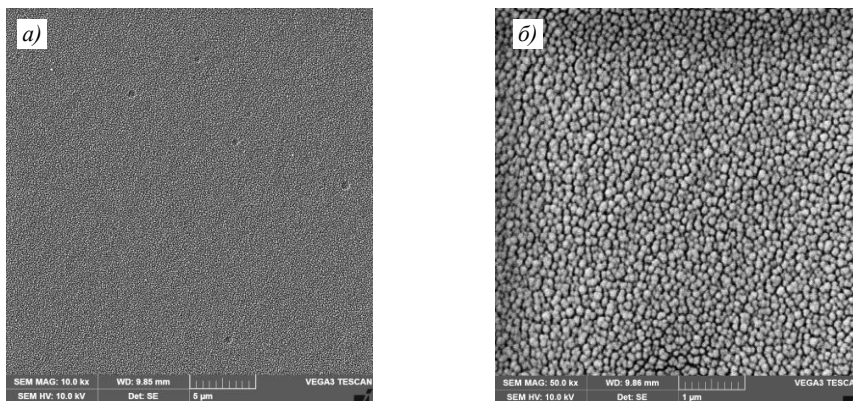


Рис. 1. Микрофазовая структура (*a* –  $\times 10000$ ; *б* –  $\times 50000$ ) поверхности органического стекла АО-120 до климатического старения

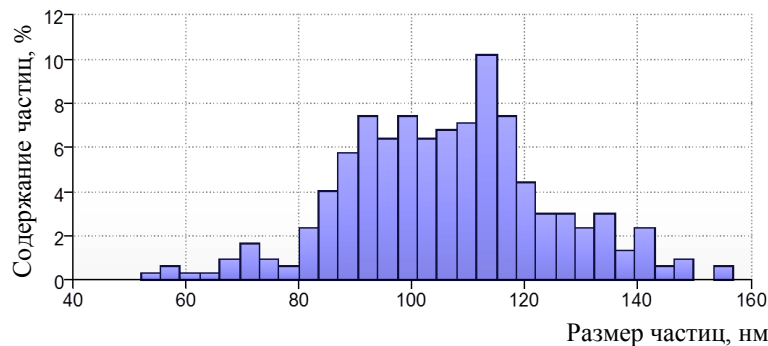


Рис. 2. Гистограмма распределения по размерам (диаметр Фере средний) агрегатов микродисперсных частиц органического стекла АО-120 до климатического старения:  $D_{\min} = 52$  нм,  $D_{\text{cp}} = 106$  нм,  $D_{\max} = 157$  нм

Как при визуальном осмотре, так и в ходе микроструктурных исследований образцов из оргстекла, подвергавшихся климатическим испытаниям, на тыльных и лицевых поверхностях обнаружены многочисленные царапины, образовавшиеся в процессе экспозиции плит материала.

Результаты микроструктурных исследований тыльной поверхности образца из оргстекла, находившегося в течение 1 года на экспозиции в штате Аризона, показали наличие изменений в ее микрофазовой структуре. По сравнению с исходным образцом наблюдали увеличение размеров частиц микродисперсной фазы (рис. 1; 2 и 3, *а, в*) до 89–730 нм (рис. 4, *а*). На лицевой поверхности образца обнаружены участки с ориентацией микродисперсных частиц. Частицы выстраиваются в линии, параллельные друг другу и ориентированные как в продольном, так и в поперечном направлении (рис. 3, *б*). Микродисперсные частицы лицевой поверхности образца (размером 170–1460 нм) отличаются по размеру от частиц на тыльной поверхности, что свидетельствует о фотохимической деструкции поверхности оргстекла, обращенной к солнцу (рис. 3, *б, г* и 5, *б*). Аналогичные изменения наблюдали в работах [14, 22, 23], где представлены исследования полиметилметакрилатных органических стекол в условиях старения и показаны особенности изменения их поверхности после длительной экспозиции в условиях субтропического климата. По-видимому, наблюдаемые изменения структуры связаны с перераспределением сегментальной подвижности в условиях изменения скорости релаксационных процессов в одной или в каждой из фаз [14].

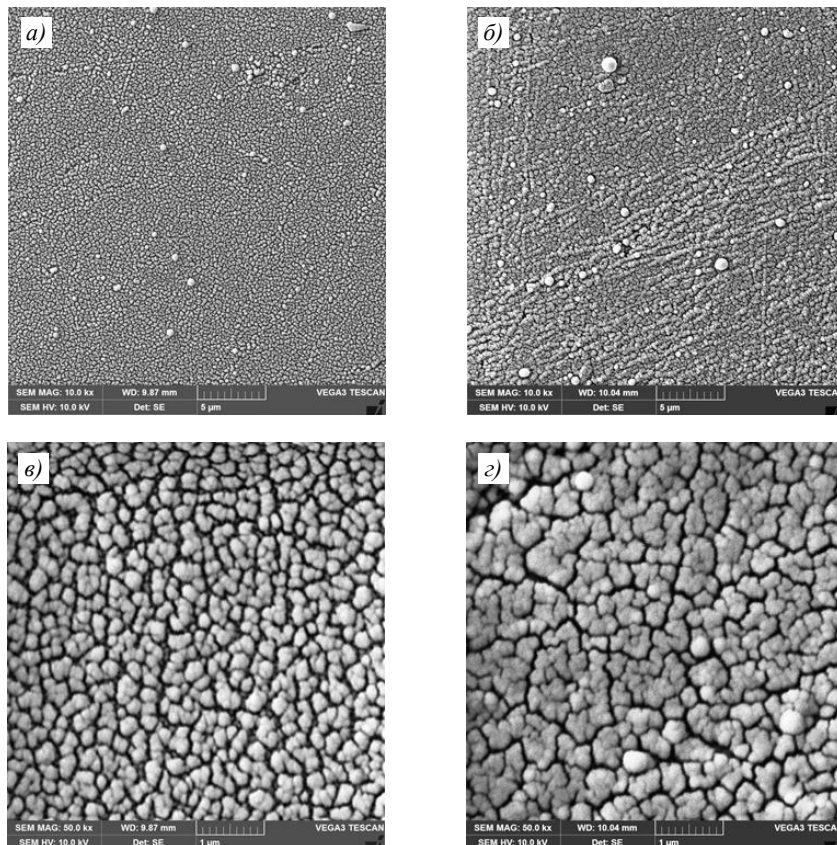


Рис. 3. Микрофазовая структура (*а, б* –  $\times 10000$ ; *в, г* –  $\times 50000$ ) тыльной (*а, в*) и лицевой (*б, г*) поверхностей (с отмывкой) органического стекла АО-120 после экспозиции на открытой площадке в течение 1 года в штате Аризона

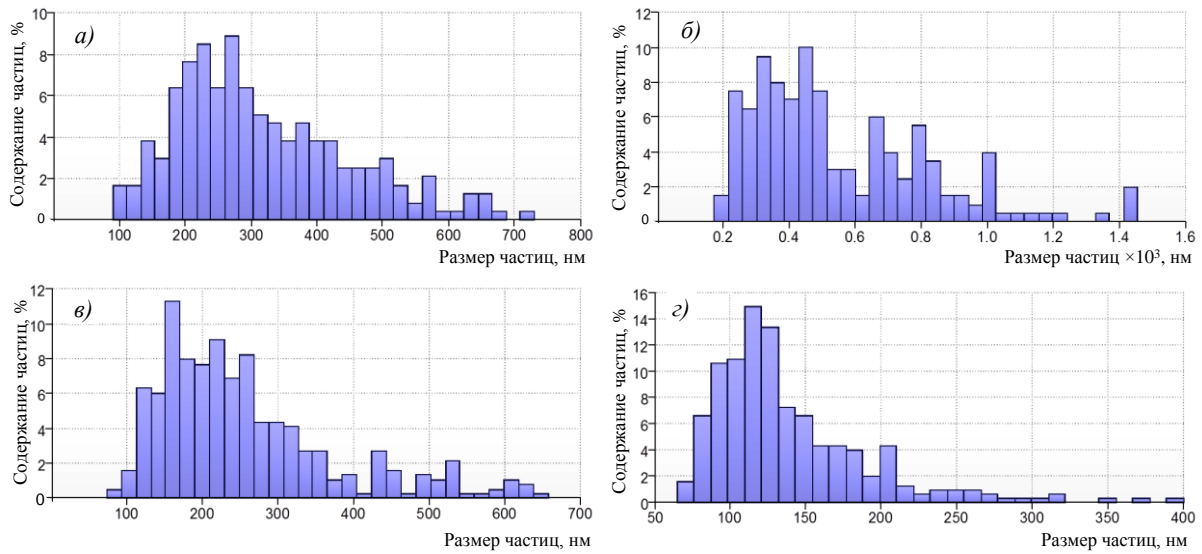


Рис. 4. Гистограмма распределения по размерам (диаметр Фере средний) агрегатов микродисперсных частиц тыльной (*а, в*) и лицевой (*б, з*) отмытых поверхностей органического стекла АО-120 после экспозиции в течение 1 года (*а, б*) и 3 лет (*в, з*) в штате Аризона: *а* –  $D_{\min} = 89$  нм,  $D_{\text{ср}} = 320$  нм,  $D_{\max} = 730$  нм; *б* –  $D_{\min} = 170$  нм,  $D_{\text{ср}} = 552$  нм,  $D_{\max} = 1460$  нм; *в* –  $D_{\min} = 72$  нм,  $D_{\text{ср}} = 258$  нм,  $D_{\max} = 658$  нм; *з* –  $D_{\min} = 64$  нм,  $D_{\text{ср}} = 140$  нм,  $D_{\max} = 380$  нм

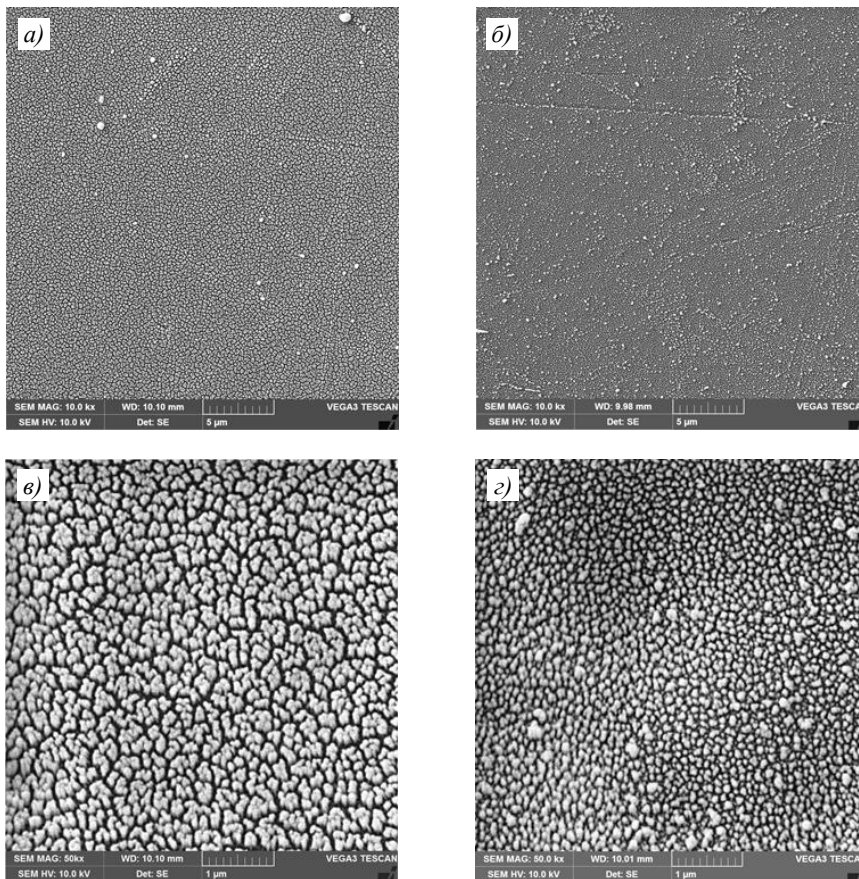


Рис. 5. Микрофазовая структура (*а, б* –  $\times 10000$ ; *в, з* –  $\times 50000$ ) тыльной (*а, в*) и лицевой (*б, з*) поверхностей (с отмывкой) органического стекла АО-120 после экспозиции на открытой площадке в течение 3 лет в штате Аризона

После экспозиции оргстекла АО-120 в штате Аризона в течение 3 лет на тыльной поверхности образца наблюдают незначительное уменьшение размеров микродисперсных частиц до 658 нм (рис. 4, *в*) по сравнению с результатами исследований образца после 1 года экспозиции. При этом на лицевой поверхности происходит существенное уменьшение их размеров до 64–380 нм (рис. 4, *г* и 5, *б*, *г*). Это, по-видимому, можно объяснить распадом микродисперсных частиц на более мелкие образования вследствие деструкции химических связей (рис. 5, *б*, *г*) при длительном атмосферном старении под воздействием УФ-излучения.

Результаты исследования микроструктур тыльной и лицевой поверхностей образцов из органического стекла АО-120 после климатического старения во влажных условиях Флориды в течение 1 года показали (рис. 6 и 7, *а*, *б*) увеличение размеров частиц микродисперсной фазы аналогично исходному образцу (рис. 1; 2; 6, *в*, *г* и 7, *а*, *б*), как и после экспозиции в течение 1 года в штате Аризона. При этом различий в микрофазовой структуре тыльной и лицевой поверхностей практически не наблюдается (рис. 6). Так, на лицевой поверхности образца обнаружены микродисперсные частицы сферической формы (рис. 6, *в*, *г*), при этом они имеют более рыхлую упаковку по сравнению с частицами на тыльной поверхности (рис. 6). Выявлена также незначительная разница в размерах частиц: на тыльной поверхности их размеры составляют от 110 до 771 нм (рис. 7, *а*), а на лицевой – от 68 до 540 нм (рис. 7, *б*).

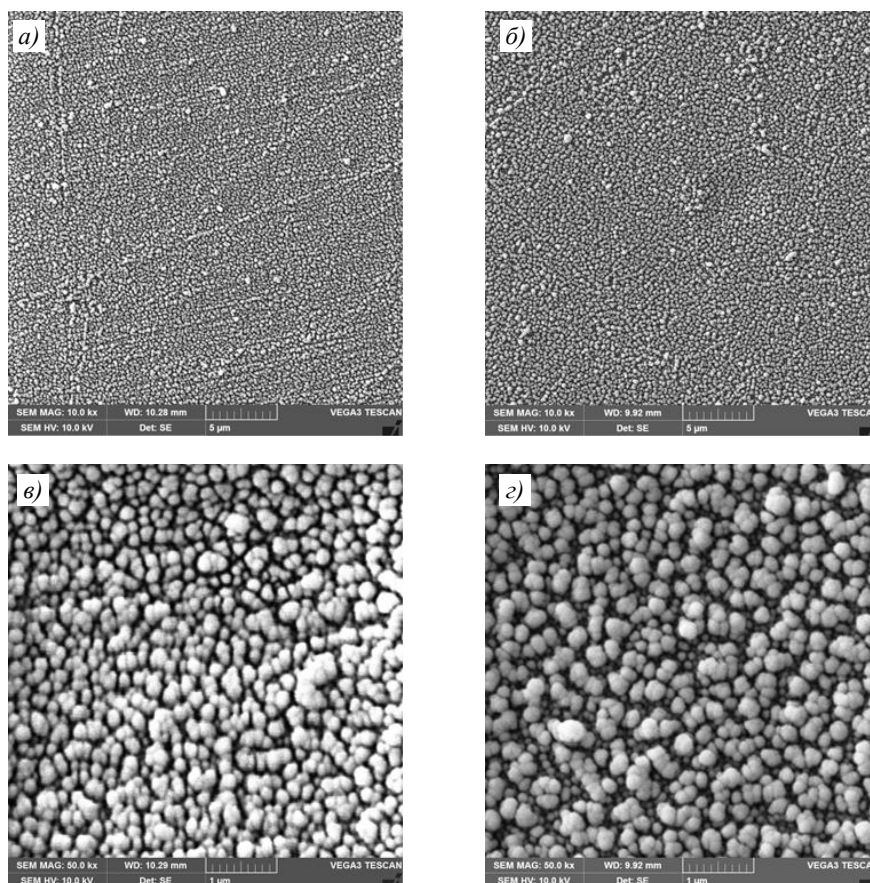


Рис. 6. Микрофазовая структура (*а*, *б* –  $\times 10000$ ; *в*, *г* –  $\times 50000$ ) тыльной (*а*, *в*) и лицевой (*б*, *г*) поверхностей (с отмывкой) органического стекла АО-120 после экспозиции на открытой площадке в течение 1 года в штате Флорида

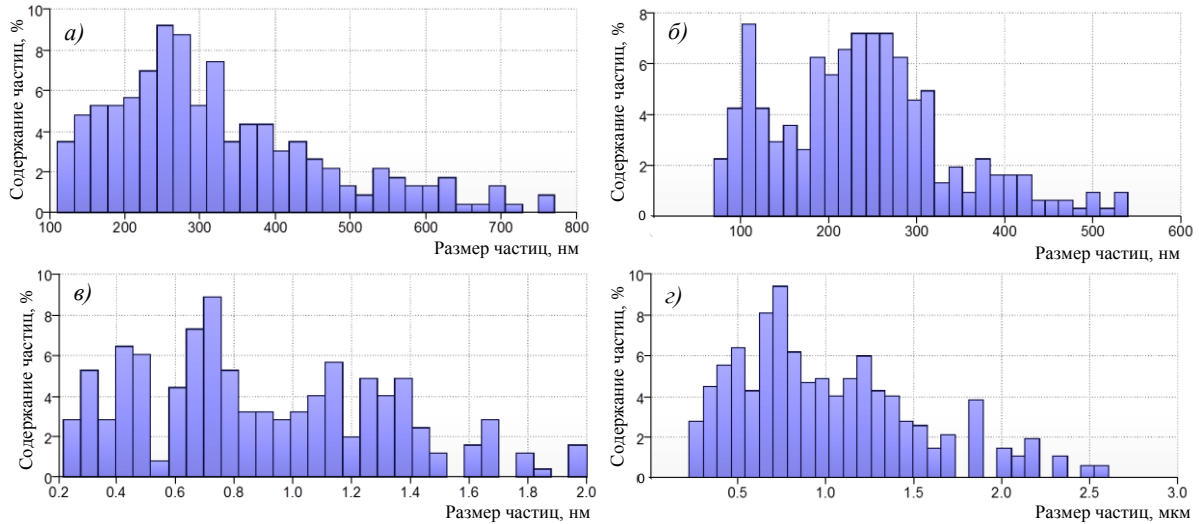


Рис. 7. Гистограмма распределения по размерам (диаметр Ферре средний) агрегатов микродисперсных частиц тыльной (*а, в*) и лицевой (*б, з*) отмытых поверхностей органического стекла АО-120 после экспозиции в течение 1 года (*а, б*) и 3 лет (*в, з*) в штате Флорида: *а* –  $D_{\min} = 110$  нм,  $D_{\text{ср}} = 324$  нм,  $D_{\max} = 771$  нм; *б* –  $D_{\min} = 68$  нм,  $D_{\text{ср}} = 240$  нм,  $D_{\max} = 540$  нм; *в* –  $D_{\min} = 0,2$  мкм,  $D_{\text{ср}} = 0,9$  мкм,  $D_{\max} = 2$  мкм; *з* –  $D_{\min} = 0,3$  мкм,  $D_{\text{ср}} = 1$  мкм,  $D_{\max} = 2,6$  мкм

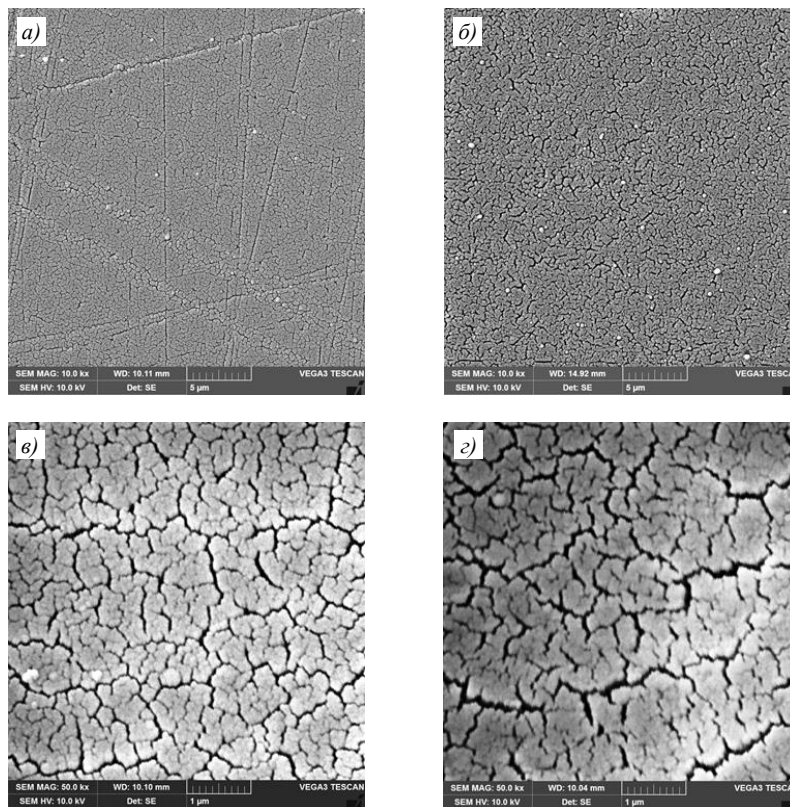


Рис. 8. Микрофазовая структура (*а, б* –  $\times 10000$ ; *в, з* –  $\times 50000$ ) тыльной (*а, в*) и лицевой (*б, з*) поверхностей (с отмывкой) органического стекла АО-120 после экспозиции на открытой площадке в течение 3 лет в штате Флорида

В процессе климатического старения образца в штате Флорида в течение 3 лет произошли значительные изменения микрофазовой структуры как тыльной, так и лицевой поверхностей образца (рис. 1, б и 8). На микрофотографиях тыльной поверхности наблюдаются крупные плотноупакованные микродисперсные частицы размером от 0,2 до 2 мкм

(рис. 7, в). Размер частиц на лицевой поверхности составляет от 0,3 до 2,6 мкм (рис. 7, г). Увеличение размеров микродисперсных частиц, по-видимому, связано с процессами диффузии воды в поверхностные слои оргстекла и заполнения микропустот в результате длительного воздействия дождей и высокой влажности климата Флориды.

Микроструктурные исследования образцов оргстекла до удаления загрязнений, возникших в процессе экспозиции, позволили обнаружить биологические загрязнения (био пленку) на лицевой поверхности образца, находившегося на экспозиции во Флориде в течение 3 лет. Био пленка представляла собой колонии мицелиальных грибов, покрывающих всю поверхность материала (рис. 9). При этом длина отдельных гиф мицелия грибов достигала 1 мм (рис. 9, а–в). После удаления био пленки с поверхности образца повреждений материала в результате жизнедеятельности мицелиальных грибов не выявлено.

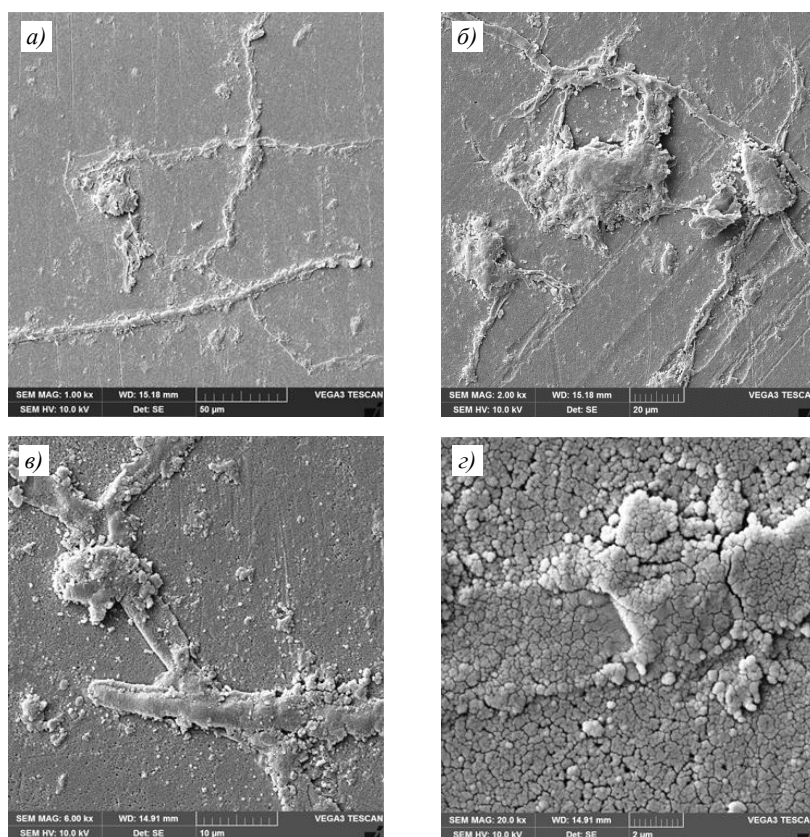


Рис. 9. Микроструктура (а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 2000$ ; в –  $\times 6000$ ; г –  $\times 20000$ ) лицевой поверхности (без отмывки) органического стекла АО-120 после экспозиции в течение 3 лет в штате Флорида

На поверхности образцов, подвергавшихся экспозиции в течение 1 года во Флориде и всего срока экспозиции в Аризоне, колоний мицелиальных грибов не обнаружено. В результате можно сделать вывод, что климат Аризоны является неблагоприятным для развития мицелиальных грибов на поверхности материала.

Следует отметить, что выявленные изменения в микрофазовой структуре поверхности оргстекла АО-120, возникшие в результате экспозиции в каждой из климатических зон, не оказывают влияния на его эксплуатационные свойства [13]. Так, результаты исследований серебростойкости, оптических и физико-механических свойств образцов из оргстекла АО-120 показали сохранение свойств практически на исходном уровне вне зависимости от климатической зоны старения материала.

### Заключения

Проведенные микроструктурные исследования позволили выявить основные изменения в микрофазовой структуре поверхности оргстекла АО-120 после длительной экспозиции образцов в зонах полусухого (Аризона) и влажного тропического климата (Флорида) в течение 1 года и 3 лет при воздействии естественных климатических факторов.

В результате климатического старения в течение 1 года в штате Аризона на поверхности образцов из оргстекла произошло увеличение размеров микродисперсных частиц – частицы на лицевой поверхности достигают размеров до 1,5 мкм. Однако после 3 лет экспозиции на лицевой поверхности образцов происходит существенное снижение размеров микродисперсных частиц до 380 нм. Это вызвано воздействием солнечного света высокой интенсивности и повышенных температур, характерных для климата Аризоны, что в результате привело к протеканию процессов деструкции на лицевой поверхности полиметилметакрилатного оргстекла АО-120 после экспозиции в течение 3 лет.

На лицевой и тыльной поверхностях образцов из оргстекла, находившихся на экспозиции во влажных условиях Флориды, происходит увеличение дисперсных частиц в течение 1 года до 770 нм на тыльной и до 540 нм на лицевой поверхностях, а после 3 лет экспозиции – до 2 мкм на тыльной и до 2,6 мкм на лицевой поверхностях. По-видимому, это связано с процессами диффузии воды в поверхностные слои оргстекла и заполнения микропустот в результате длительного воздействия дождей и высокой влажности климата Флориды.

Наличие колонии мицелиальных грибов, обнаруженных на лицевой поверхности образца из оргстекла, находившегося на экспозиции в зоне влажного тропического климата штата Флорида в течение 3 лет, к повреждению поверхности образца не привело.

Следует отметить, что выявленные изменения в микрофазовой структуре поверхности образцов из оргстекла АО-120 влияния на его эксплуатационные свойства не оказывают.

### Список источников

1. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия, 1981. 215 с.
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. М.: ВИАМ, 2002. Т. 8. С. 29–51.
4. Сентюрин Е.Г., Куклина Л.С., Тригуб Т.С., Пашкова Т.В. Влияние атмосферостойкости на эксплуатационную надежность оргстекла // Авиационная промышленность. 1984. № 5. С. 56–58.
5. Гудимов М.М., Сентюрин Е.Г., Тригуб Т.С. Серебростойкость остекления самолетов из органического стекла в процессе его производства и эксплуатации // Авиационная промышленность. 1995. № 9–10. С. 55–60.
6. Кириллов В.Н., Кавун Н.С., Ракитина В.П. и др. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на свойства эпоксидных стеклотекстолитов // Пластические массы. 2008. № 9. С. 14–18.
7. Старцев О.В., Прокопенко К.О., Литвинов А.А., Кротов А.С., Аниховская В.И., Дементьева Л.А. Исследование термовлажностного старения авиационного стеклопластика // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 1. С. 21–25.
8. Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Железина Г.Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба // Вопросы материаловедения. 2016. № 3 (87). С. 104–114.
9. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Куршев Е.В., Горяшник Ю.С. Особенности биодеструкции термопластов на основе полиэфиров в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.
10. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохранности свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.

11. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор // Вопросы материаловедения. 2016. № 3. С. 126–137.
12. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
13. Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Сентюрин Е.Г., Попов А.А. Особенности влияния атмосферных факторов на авиационные органические стекла // Труды ВИАМ. 2018. № 11 (71). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-28-34.
14. Деев И.С., Куклин Э.А. Особенности формирования микрофазовой структуры полиметилметакрилатных органических стекол и ее изменений в условиях старения // Материаловедение. 2014. № 4. С. 43–50.
15. Деев И.С., Кобец Л.П. Структурообразование в наполненных терморезистивных полимерах // Коллоидный журнал. 1999. Т. 61. № 5. С. 650–660.
16. Новиков В.У., Козицкий Д.В., Деев И.С., Иванова В.С., Кобец Л.П. Мультифрактальный анализ структуры полиметилметакрилата, исследованной методом растровой электронной микроскопии // Пластические массы. 2001. № 1. С. 7–9.
17. Деев И.С., Кобец Л.П. Микроструктура эпоксидных матриц // Механика композитных материалов. 1986. № 1. С. 3–8.
18. 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.
19. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
20. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
21. 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.
22. Рэнби Б., Рабек Я. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. М.: Мир, 1978. 676 с.
23. Сентюрин Е.Г., Гудимов М.М., Руднев В.П. и др. Старение органического стекла // Авиационная промышленность. 1993. № 5–6. С. 50–53.

#### References

1. Gudimov M.M., Perov B.V. *Organic glass*. Moscow: Khimiya, 1981, 215 p.
2. Gudimov M.M. *Silver cracks on organic glass*. Moscow: TsIPKK AP, 1997, 260 p.
3. *Aviation materials: reference book: in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2002, vol. 8, pp. 29–51.
4. Sentyurin E.G., Kuklina L.S., Trigub T.S., Pashkova T.V. Influence of weather resistance on the operational reliability of plexiglass. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1984, no. 5, pp. 56–58.
5. Gudimov M.M., Sentyurin E.G., Trigub T.S. Silver resistance of organic glass aircraft glazing during its production and operation. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1995, no. 9–10, pp. 55–60.
6. Kirillov V.N., Kavun N.S., Rakitina V.P. et al. Study of the influence of heat and moisture impact on the properties of epoxy fiberglass. *Plasticheskiye massy*, 2008, no. 9, pp. 14–18.
7. Startsev O.V., Prokopenko K.O., Litvinov A.A., Krotov A.S., Anikhovskaya V.I., Dement'eva L.A. Investigation of thermal moisture aging of aviation fiberglass. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, no. 1, pp. 21–25.
8. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskii S.L., Zhelezina G.F. Influence of long-term climatic aging on the microstructure of the surface of epoxy organic plastics and the nature of its destruction under bending conditions. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 3 (87). pp. 104–114.

9. Laptev A.B., Nikolaev E.V., Kurshev E.V., Goryashnik Yu.S. Features of biodegradation of thermoplastics based on polyesters in different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 14, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.
10. Laptev A.B., Barbotko S.L., Nikolaev E.V. The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
11. Lutsenko A.N., Kurs M.G., Laptev A.B. Justification of the timing of full-scale climatic tests of metallic materials in the atmosphere of the Black Sea coast. Analytical review. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 3, pp. 126–137.
12. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58.
13. Mekalina I.V., Aizatulina M.K., Sentjurin E.G., Popov A.A. Features of influence of atmospheric factors on aviation organic glass. *Trudy VIAM*, 2018, no. 11 (71), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 04, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-28-34.
14. Deev I.S., Kuklin E.A. Features of the formation of the microphase structure of polymethyl methacrylate organic glasses and its changes under aging conditions. *Materialovedenie*, 2014, no. 4. S. 43–50.
15. Deev I.S., Kobets L.P. Structure formation in filled thermosetting polymers. *Kolloidnyy zhurnal*, 1999, vol. 61, no. 5, pp. 650–660.
16. Novikov V.U., Kozitsky D.V., Deev I.S., Ivanova V.S., Kobets L.P. Multifractal analysis of the structure of polymethyl methacrylate studied by scanning electron microscopy. *Plasticheskiye massy*, 2001, no. 1. S. 7–9.
17. Deev I.S., Kobets L.P. Microstructure of epoxy matrices. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1986, no. 1, pp. 3–8.
18. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
19. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
20. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
21. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
22. Renby B., Rabek Y. *Photodestruction, photooxidation, photostabilization of polymers*. Moscow: Mir, 1978, 676 p.
23. Sentyurin E.G., Gudimov M.M., Rudnev V.P. et al. Aging of organic glass. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1993, no. 5–6. pp. 50–53.

**Информация об авторах**

**Курсев Евгений Васильевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Лонский Станислав Леонардович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Мекалина Ирина Васильевна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Evgeny V. Kurshev**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Stanislav L. Lonskii**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Irina V. Mekalina**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 21.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.01.2022.  
The article was submitted 21.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 10.01.2022.