

УДК 620.193.21

М.Г. Курс¹, Е.В. Николаев¹, Д.В. Абрамов¹

НАТУРНО-УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СТЕНДЫ

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73

Представлен анализ факторов климатического старения материалов, на основе которого были разработаны методики проведения натурно-ускоренных испытаний. Рассмотрены основные подходы к проведению натурно-ускоренных испытаний металлических материалов с дополнительным воздействием хлоридсодержащих аэрозолей на специализированном стенде в сравнении с экспозицией на стационарных стендах. Приведены результаты оценки параметров климатического старения неметаллических материалов при увеличении продолжительности воздействия солнечного излучения.

Ключевые слова: коррозия, старение, натурные климатические испытания, натурно-ускоренные испытания.

M.G. Kurs¹, E.V. Nikolaev¹, D.V. Abramov¹

FULL-SCALE AND ACCELERATED TESTS OF METALLIC AND NONMETALLIC MATERIALS: KEY FACTORS AND SPECIALIZED STANDS

The paper presents an analysis of the factors of materials climatic aging, on the basis of which methods for conducting field-accelerated tests were developed. The main approaches to the implementation of the field-accelerated tests of the metallic materials with the additional effect of chloride-containing aerosols on a specialized stand in comparison with the exposure on stationary stands are considered. The results of estimating the parameters of climatic aging of non-metallic materials with increasing duration of exposure to solar radiation are presented.

Keywords: corrosion, aging, full-scale climatic tests, full-scale accelerated tests.

¹Федеральное 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

Развитие методик натурно-ускоренных испытаний является одним из ключевых аспектов «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1, 2]. Натурные климатические испытания, несмотря на безусловное преимущество получения наиболее достоверных сведений о поведении материала в условиях воздействия окружающей среды, тем не менее обладают рядом недостатков, к которым относятся: высокая длительность их проведения [3], зависимость от климатических условий на момент начала экспозиции и невысокая воспроизводимость результатов эксперимента ввиду порой достаточно существенных годовых колебаний метеопараметров. Ускоренные же испытания в климатических камерах не позволяют дать достоверную прогнозную оценку поведения материала в реальных климатических условиях многофакторного синергетического воздействия метеорологических и аэрохимических параметров атмосферы, воспроизвести которое в лабораторных условиях невозможно.

Для таких климатических параметров, как температура и относительная влажность воздуха, зависимость скорости протекания процессов старения полимеров от климатического фактора носит экспоненциальный характер. Величина коэффициента ускорения теплового и тепловлажностного старения зависит не только от эффективного значения температуры или влажности воздуха в процессе ускоренных испытаний, но и от величины эффективной энергии активации процессов теплового и тепловлажностного старения полимера. При этом ускоренные лабораторные испытания проводятся пофакторно: в климатических камерах осуществляется воздействие одного или двух факторов. Несоответствие комплекса климатического воздействия, осуществляемого в процессе ускоренных лабораторных испытаний, воздействию, реализуемому в натуральных условиях, может привести к ошибкам в прогнозировании сроков службы чувствительных к климатическому воздействию материалов.

Компромиссным решением может стать широкое внедрение натурно-ускоренных испытаний, при которых ускорение климатического воздействия достигается путем усиления одного-двух ключевых параметров, оказывающих наиболее деструктивное воздействие на материал, экспонирующийся в натуральных климатических условиях. При этом механизм разрушения материала под воздействием климатических факторов при проведении натурно-ускоренных испытаний остается неизменным – материал также подвергается сложному комплексу воздействующих метеорологических и аэрохимических параметров атмосферы с учетом их суточных, сезонных и годовых колебаний.

Наиболее активно натурно-ускоренные методы испытания используются за рубежом, где данный метод является стандартизованным [4]. В Российской Федерации данные методы пока еще не получили широкого распространения, существующие методики не унифицированы и не закреплены госстандартом, отсутствует специализированное оборудование, которое позволяло бы проводить испытания в автоматическом режиме, повышая воспроизводимость эксперимента путем нивелирования влияния человеческого фактора.

В данной работе рассмотрены существующие подходы к проведению натурно-ускоренных испытаний, разработаны и научно обоснованы предлагаемые режимы испытаний, а также приведено описание впервые разработанных и введенных в эксплуатацию на территории РФ специализированных стендов для проведения натурно-ускоренных испытаний металлических и неметаллических материалов.

Натурно-ускоренные испытания металлических материалов

Традиционно применяемым в качестве натурно-ускоренных испытаний методом как в России, так и за рубежом является повышение частоты воздействия хлоридсодержащими аэрозолями – либо путем распыления, либо путем окунания, что имитирует повышенную агрессивность приморских регионов, характеризующихся высокими скоростями осаждения хлорид-ионов.

Так, проведение натурно-ускоренных испытаний на территории РФ, коррозионная агрессивность которой не превышает среднего балла С3 по ISO 9223, может позволить оценить поведение материалов в более жестких условиях экспозиции, включая тропические регионы, характеризующиеся более высокими скоростями осаждения хлорид-ионов и повышенной влажностью.

В приведенных далее работах показано существенное влияние метеоусловий на проведение натурно-ускоренных испытаний. Так, в работе [5] установлено, что при проведении натурно-ускоренных испытаний по ISO 11474 на Кубе и в Колумбии значительное влияние на скорость кор-

розии образцов оказывает режим выпадения осадков: с увеличением их количества скорость коррозии при проведении испытаний с распылением солевого раствора снижается.

Коррозионные потери алюминиевых сплавов в приморских регионах определяются особенностями условий экспозиции в этих районах, при которых основным фактором влияния является поверхностная концентрация хлоридов и продолжительность увлажнения поверхности [6]. Результаты исследования коррозионной стойкости листа из сплава Д16 при натурно-ускоренных испытаниях (г. Мурманск и г. Владивосток) с искусственной седиментацией морской соли различной концентрации при экспозиции на открытой площадке, а также с дополнительным обливанием водой верхней стороны образца для имитации дополнительного периодического выпадения дождей, показали, что во Владивостоке, в отличие от Мурманска, на поверхности образца продукты коррозии превращаются в равномерно распределенный слой, что приводит к сравнительно равномерной коррозии.

В работе [7] описана методика проведения натурно-ускоренных испытаний в условиях промышленной атмосферы г. Москвы, которая состояла в распылении солевого раствора на исследуемые образцы (распыление в период отрицательных температур не проводилось). Результаты испытаний показали резкое увеличение степени коррозионного разрушения без изменения механизма коррозии, что позволяет сократить время до полной оценки коррозионной стойкости алюминиевых сплавов различных систем.

Представленная в научном источнике [8] методика натурно-ускоренных испытаний состояла в искусственной седиментации хлоридов на поверхность образцов из алюминиевых сплавов путем периодического (через каждые 10 сут) кратковременного погружения образцов в растворы NaCl различной концентрации в течение всего времени испытаний. Отрицательным фактором эксперимента в данном случае явился сам метод проведения испытаний – окунание образцов, что обуславливало в некоторой степени «моющий» эффект, аналогично воздействию осадков, смывающих с поверхности образцов хлорид-ионы и продукты коррозии.

В работе [9] приведены результаты экспозиции алюминиевого сплава в условиях тропической атмосферы при испытаниях как натурным, так и натурно-ускоренным методом с нанесением аэрозолей морской воды один раз в сутки в вечернее время. По результатам испытаний установлено, что потери массы образцов при испытаниях с обливом в 2 раза больше по сравнению с испытаниями без облива за одинаковые периоды времени. Выявленное снижение скорости роста потери массы образцов после 3,5 лет автор работы [9] объясняет защитным действием

продуктов коррозии, затрудняющих доступ влаги и хлоридов к поверхности образца.

В работе [10] представлено распределение различных условий экспозиции по их жесткости в отношении сопротивления коррозионному растрескиванию (КР) сталей при испытаниях в различных климатических зонах под навесом, на открытой площадке и при обливе морской водой. Показано, что воздействие пленки раствора способствует уменьшению времени до растрескивания. Полученные результаты показали, что, определив склонность к КР исследуемой стали по трем-четырем ускоренным методам и зная характеристики «модельного» образца стали по ускоренным методам и в течение короткого срока в натуральных условиях, можно путем экстраполяции зависимости изменения времени до КР стали от интенсивности воздействия рассчитать время до КР в натуральных условиях на длительные сроки (при условии, что исследуемая сталь и сталь-модель одного класса). Испытания показали [10], что все факторы (температура, время увлажнения поверхности), а не только концентрация хлоридов влияют на стойкость стали к КР.

Натурно-ускоренные испытания неметаллических материалов

Старение неметаллических материалов (полимеров, защитных покрытий, функциональных материалов) представляет собой совокупность физико-химических изменений их исходной структуры, происходящих как в виде химических реакций, так и физических процессов, протекающих под действием солнечного излучения, температуры, влажности, механических напряжений и др. Основными причинами, вызывающими старение полимеров, является реакционная способность молекулярной цепи при воздействии на нее физических и химических факторов. К физическим факторам относят тепло, свет, ионизирующие излучения, механические нагрузки, к химическим – кислород, озон, галогены, воду и другие агрессивные агенты. Эти факторы, действуя как раздельно, так и одновременно, вызывают в полимерах сложные, главным образом радикально-цепные реакции образования новых связей и разрыва старых [11–14].

Одним из важных факторов, влияющим на свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), является солнечная радиация, особенно ее ультрафиолетовая (УФ) составляющая, приводящая к фотодеструкции поверхности материала, образованию напряжений, трещин и разрушению поверхности матрицы, вследствие чего происходит оголение поверхностных слоев армирующего наполнителя, которые теряют способность нести нагрузку, воздействующую на материал.

При старении и эрозии поверхности ПКМ за счет действия УФ-излучения и абразивных частиц его толщина уменьшается, а количество дефектов растет, следовательно, это приводит к

снижению прочностных свойств материала. Разрушение поверхности ПКМ интенсифицируется вторым фактором – влагой, которая интенсивно сорбируется за счет увеличения удельной поверхности и образования новых полярных центров.

Третьим фактором является температура воздуха, которая наряду с одновременным воздействием солнечной радиации приводит к значительному нагреву поверхности образцов материалов, что увеличивает скорость всех химических реакций и реакций старения полимера в частности.

Опыт ФГУП «ВИАМ» в области создания новых материалов, улучшения их сопротивляемости старению и коррозии, исследования процессов старения ПКМ при натуральных испытаниях в различных климатических зонах показывает, что снижение физико-механических свойств современных, разработанных в последнее время материалов под воздействием факторов атмосферы зачастую начинается через 7–10 лет экспозиции [15–18], что требует разработки методик натурно-ускоренных испытаний, которые позволили бы сократить сроки квалификационных климатических испытаний материалов и обеспечить их своевременное внедрение в образцы новой техники.

Материалы и методы

В данной работе испытания проводили в Геленджикском центре климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» им. Г.В. Акимова (ГЦКИ) и в Московском центре климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» им. Г.В. Акимова (МЦКИ). По особенностям климата ГЦКИ характеризуется высоким содержанием хлоридов в атмосфере, которые способствуют ускорению электрохимических процессов коррозии, особенно в сочетании с высокой влажностью воздуха [19]. Климат ГЦКИ принадлежит к умеренно теплому климату с мягкой зимой (ГОСТ 16350–80). По ISO 9223 коррозионная агрессивность атмосферы ГЦКИ классифицируется как С3 (средняя). Климат МЦКИ принадлежит к умеренному климату с промышленной атмосферой [20].

Натурно-ускоренные испытания образцов металлических, неметаллических материалов и защитных покрытий проводили на стендах с автоматическим обливом морской водой и стенде слежения за солнцем, первый из которых предназначен преимущественно для проведения натурно-ускоренных испытаний металлических материалов, оказывая на них агрессивное воздействие хлоридсодержащими аэрозолями, второй – для неметаллических материалов, увеличивая воздействие на них радиационного излучения. Для сравнения также проведены натурные испытания на стационарных стендах, расположенных на открытой площадке под углом 45 градусов к горизонту и под навесом в горизонтальном положении.

*Стенд с автоматическим обливом
для проведения натурно-ускоренных испытаний
металлических материалов*

На основе анализа предшествующих работ по проведению натурно-ускоренных испытаний установлены следующие критерии проведения натурно-ускоренных испытаний, которые определили конструкцию и принцип работы разработанного стенда с автоматическим обливом (рис. 1).

1. Горизонтальное расположение рамы стенда – для увеличения времени воздействия наносимого солевого раствора.

2. Расположение стенда – под проветриваемым навесом для нивелирования воздействия осадков и солнечной радиации.

3. Распыление раствора – посредством форсунок, расположенных таким образом, чтобы обеспечить равномерное распыление раствора по всей рабочей поверхности с минимальным перекрытием факелов распыления. Количество распыляемого раствора рассчитывается таким образом, чтобы на поверхности образцов образовывалась тонкая пленка наносимого раствора, при этом образование крупных стекающих капель должно быть исключено (расход раствора при расчете на 1 м^2 должен составлять ~ 100 мл).

4. Управление должно предусматривать распыление солевого раствора с учетом текущих метеоусловий, при температуре окружающей среды $0\text{--}40^\circ\text{C}$ и заданной скорости ветра (экспериментально определяют допустимую скорость ветра, при которой возможно воспроизведение операции облива).

5. Для исключения человеческого фактора работа стенда должна вестись в автоматическом режиме, что позволяет нормировать количество наносимого раствора, проводить распыление непрерывно в течение календарного года (исключение составляют лишь дни с отрицательной температурой воздуха и повышенной скоростью ветра).

Для проведения испытаний в данной работе определен режим ежедневного однократного распыления.



Рис. 1. Внешний вид стенда с автоматическим обливом морской водой

*Стенд слежения за солнцем
для проведения натурно-ускоренных испытаний
неметаллических материалов*

Уровень воздействия солнечного излучения характеризуется дозой интегрального или УФ-излучения, попавшей на поверхность образцов, а также дозой поглощенного излучения. Основными факторами, влияющими на соотношение поглощенного, отраженного и рассеянного излучения, являются высота солнца над горизонтом, прозрачность атмосферы, количество и форма облаков. Однако определяющим фактором является угол падения солнечных лучей на исследуемую поверхность.

Для разработки стенда слежения за солнцем (рис. 2), который позволяет максимально увеличить интенсивность воздействия солнечного излучения на исследуемые образцы материалов в течение светового дня, приняты следующие технические решения.

1. Рама стенда должна позиционироваться в автоматическом режиме в двух плоскостях: относительно вертикальной оси в пределах от 0 до 300 градусов и относительно горизонтальной – в пределах от 0 до 90 градусов с точностью ± 1 градус.

2. Основание стенда должно обеспечивать его устойчивость при максимальной скорости ветра 40 м/с , при скоростях ветра $>40\text{ м/с}$ программное обеспечение в автоматическом режиме должно переводить раму стенда в горизонтальное положение.

3. Для контроля дозы УФ-излучения на стенде должны быть установлены метеорологические датчики:

– интегрального солнечного излучения с диапазоном измерения $300\text{--}3000\text{ нм}$, определяемого плотностью потока 1500 Вт/м^2 с погрешностью $\pm 5\text{ Вт/м}^2$;

– УФ-составляющей солнечного излучения с диапазонами измерения $280\text{--}320$ (погрешность $\pm 0,1\text{ Вт/м}^2$) и $320\text{--}400\text{ нм}$ (погрешность $\pm 1\text{ Вт/м}^2$).

Таким образом, при проведении натурно-ускоренных испытаний чувствительных к солнечному излучению полимерных и функциональных материалов ускорение осуществляется за счет



Рис. 2. Внешний вид стенда слежения за солнцем

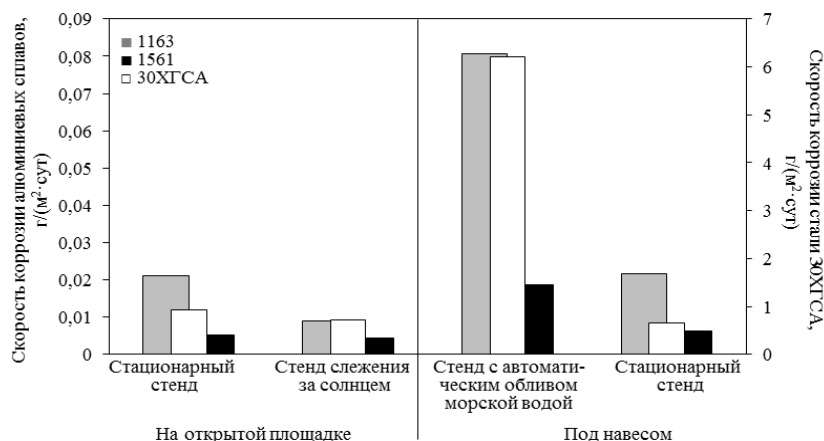


Рис. 3. Скорость коррозии образцов из металлических материалов после 6 мес испытаний

того, что образцы получают максимальную дозу излучения. Для получения максимальной дозы поверхность образцов во время светового дня постоянно ориентируется под углом 90 градусов к вектору прямого солнечного излучения. Усиление действия солнечного излучения создается за счет большей дозы солнечного излучения, поглощаемой образцом. При этом толщина воздушной массы, через которую проходит солнечное излучение, и продолжительность воздействия солнечного света для каждого места проведения экспозиции, а также максимальная плотность потока излучения сохраняются, что гарантирует неизменность механизмов климатического старения при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях.

Результаты и обсуждение

Коррозия металлических материалов при натурно-ускоренных испытаниях

На рис. 3 приведены результаты оценки скорости коррозии листов из алюминиевых сплавов 1163-Т и 1561, а также стали 30ХГСА при испытаниях в различных условиях в течение 6 мес. Видно, что экспозиция на стенде с автоматиче-

ским обливом повышает интенсивность коррозионных процессов по сравнению с испытаниями на стационарном стенде, расположенном на открытой площадке, в 4 раза – для алюминиевых сплавов и в 6 раз – для низкоуглеродистой стали. Экспозиция на стенде слежения за солнцем снижает агрессивность коррозионного воздействия на металлические материалы за счет большей продолжительности воздействия солнечного излучения, способствующей более быстрому высыханию фазовых и абсорбционных пленок влаги, – для сплава 1163-Т скорость коррозии на стационарном стенде в 2 раза выше, чем на стенде слежения за солнцем. Скорость коррозии при испытаниях на стационарных стендах под навесом и на открытой площадке практически идентична.

На рис. 4 приведены результаты оценки скорости коррозии образцов из сплава 1163-Т при испытаниях в различных климатических условиях в течение 3 и 12 мес. При натурно-ускоренных испытаниях ввиду значительной интенсификации коррозионных процессов, уже после 3 мес экспозиции скорость коррозии в 70 раз больше, чем при испытаниях на открытой площадке, – площадь коррозионных поражений приближается к 100% поверхности.

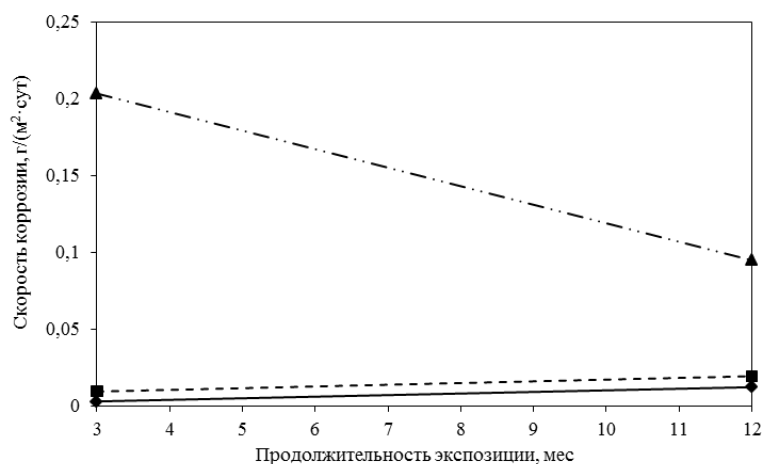


Рис. 4. Скорость коррозии образцов из сплава 1163-Т после 3 и 12 мес испытаний на открытой площадке (◆), под навесом без облива (■) и с обливом (▲)

Далее скорость коррозии при натурно-ускоренных испытаниях снижается ввиду практического отсутствия доступа кислорода, необходимого для развития коррозии, и образования плотного слоя продуктов коррозии. При испытаниях на открытой площадке и под навесом скорость коррозии продолжает расти, так как площадь коррозионных поражений еще недостаточно велика. Таким образом, скорость коррозии при натурно-ускоренных испытаниях снижается в ~10 раз.

Идентичность механизма коррозионного разрушения образцов металлических материалов при проведении натуральных и натурно-ускоренных испытаний подтверждается характером кинетики протекания коррозионных процессов (происходит снижение скорости коррозии с увеличением площади коррозионных поражений поверхности), а также сохранением характера коррозионных поражений – склонностью к идентичным локальным видам коррозии, характеру распространения межкристаллитной и расслаивающей коррозии.

Ранее в работах [21, 22] показано, что двух лет натурно-ускоренных испытаний достаточно для реализации всех коррозионных процессов, происходящих в алюминиевых сплавах. При натурной экспозиции для выявления склонности к локальным видам коррозионного разрушения и оценки степени их влияния на изменение физико-механических свойств необходимы гораздо большие сроки – до 10–15 лет [3]. Таким образом, широкое внедрение натурно-ускоренных испытаний позволит в полной мере оценить климатическую стойкость алюминиевых сплавов при проведении квалификационных испытаний.

*Старение полимерных материалов
и защитных покрытий
при натурно-ускоренных испытаниях*

На рис. 5 представлены результаты изменения декоративных свойств лакокрасочного покрытия (ЛКП) марки АС-1115, нанесенного на подложку из сплава 1163-Т, после 6 мес натурной экспозиции в различных условиях. Видно, что даже в

течение столь непродолжительного срока становится очевидной большая агрессивность климатического воздействия при экспозиции на стенде слежения за солнцем по сравнению со стационарным стендом: потери блеска и цвета соответственно на 23 и 38% выше по сравнению с экспозицией на открытой площадке и на 44 и 58% – соответственно по сравнению с экспозицией под навесом, защищенным от воздействия солнечного излучения.

Анализ результатов изменения физико-механических характеристик после натуральных и натурно-ускоренных испытаний образцов неметаллических материалов в обеих зонах показал, что для образцов из углепластика без покрытия и с ЛКП, стеклопластика без покрытия и с ЛКП, а также для органического стекла натурные и натурно-ускоренные испытания приводят к идентичному снижению определяемых характеристик. Для данных материалов воздействие солнечного излучения не является определяющим, а сами материалы являются малочувствительными к воздействию солнечного излучения. Для образцов герметиков в условиях натурно-ускоренных испытаний наблюдается более значительное снижение определяемых характеристик по сравнению с натурными испытаниями. Так, в условиях МЦКИ, после экспозиции герметиков на стенде слежения за солнцем, их условная прочность и относительное удлинение в момент разрыва снизились на 10% больше, чем на стационарном стенде. В условиях ГЦКИ, после экспозиции герметиков на стенде слежения за солнцем, их условная прочность и относительное удлинение в момент разрыва снизились на 30% больше, чем на стационарном стенде.

Таким образом, для материалов, малочувствительных к солнечному излучению коэффициент ускорения при натурно-ускоренных испытаниях составил 1. Для герметика, который эксплуатируется в защищенных от солнечного излучения условиях, коэффициент ускорения на стенде слежения за солнцем в районе с умеренным климатом можно принять в интервале значений – от

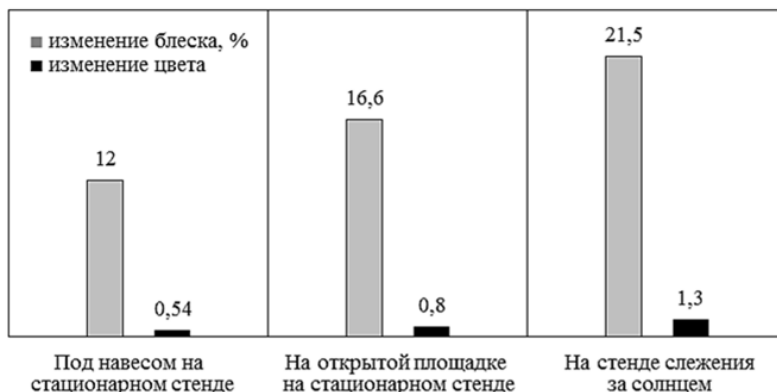


Рис. 5. Изменение декоративных свойств (блеск под углом 60 градусов – по ГОСТ 31975–2017; цветовое различие – по ГОСТ Р 52490–2005) лакокрасочного покрытия АС-1115 при испытаниях в различных условиях

1,10 до 1,145. В условиях умеренно теплого климата с мягкой зимой коэффициент ускорения можно принять в интервале значений – от 1,3 до 1,37.

Для уточнения коэффициентов ускорения при проведении натурно-ускоренных испытаний металлических и неметаллических материалов необходимо получение результатов при более длительной экспозиции.

Заключения

1. Показано, что проведение натурно-ускоренных испытаний металлических материалов с нанесением хлоридсодержащих аэрозолей способствует значительной интенсификации процессов коррозионного разрушения, что позволяет сократить время до реализации коррозионных процессов до приемлемых сроков при проведении климатической квалификации при сохранении механизмов процессов коррозии и старения.

2. Впервые разработаны и проведены испытания на стендах для проведения натурно-ускоренных испытаний металлических материалов при автоматическом обливе морской водой и неметаллических материалов при увеличении воздействия солнечного излучения, рассмотрены принципиальные подходы к разработке методик испытаний, обоснованы необходимые режимы экспозиции.

3. Установлено, что увеличение интенсивности воздействия солнечного излучения в наибольшей степени увеличивает деструкцию функциональных материалов – лакокрасочных покрытий и герметиков, и в меньшей степени – ПКМ.

4. Показано, что широкое внедрение натурно-ускоренных испытаний при проведении квалификационных испытаний конструкционных и функциональных материалов позволит в полной мере оценить степень подверженности их деструктивному воздействию климатических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натурных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор // *Вопросы материаловедения*. 2016. №3 (87). С. 126–137.
4. ISO 11474:1998. Corrosion of metals and alloys. Corrosion tests in artificial atmosphere - Accelerated outdoor test by intermittent spraying of a salt solution (Scab test). URL: <https://www.iso.org/standard/19426.html> (дата обращения: 20.11.2018).
5. Corvo F., Minotas J., Delgado J., Arroyave C. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime // *Corrosion science*. 2005. Vol. 47. P. 883–892.
6. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Чесноков Д.В., Жирнов А.Д. и др. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №3. С. 8–14.
7. Синявский В.С., Калинин В.Д., Александрова Т.В. Новый метод ускоренных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2013. №2. С. 89–93.
8. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А., Чесноков Д.В. и др. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №10. С. 1–3.
9. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость образцов сплава 1201 в морских субтропиках // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. №3. С. 1–5.
10. Артмеладзе Л.И., Гурвич Л.Я., Лащевский В.Б. Коррозионная стойкость высокопрочных нержавеющей сталей в морском климате // *Защита металлов*. 1994. Т. 30. №3. С. 282–286.
11. Павлов М.Р., Николаев Е.В., Андреева Н.П., Барботько С.Л. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №7 (43). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11.
12. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018).
13. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 1. Исследование влияния сорбированной влаги на эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №12. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-11-11.

14. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6 (42). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
15. Старцев О.В., Вапиров Ю.М., Деев И.С. и др. Влияние длительного атмосферного старения на свойства и структуру углепластика // Механика композитных материалов. 1986. №4. С. 637–642.
16. Apicella A., Tessieri R., De Cataldis C. Sorption Modes of Water in Glassy Epoxies // Journal of Membrane Science, 1984. Vol. 18. P. 211–225.
17. Ермолаева М.А., Меркулова В.М. Влияние старения на свойства органопластиков // Приложение к журналу «Авиационная промышленность». М.: Машиностроение. 1985. Т. 2. С. 20–23.
18. Рудольф А.Я., Савин В.Ф., Старцев О.В., Блазнов А.Н., Раскутин А.Е. Продольный изгиб для определения прочности плит авиационных углепластиков // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: докл. IX Всерос. науч.-практич. конф. 17–19 июня 2009 г. Бийск: Изд. БТИ АлтГТУ, 2009. С. 148–153.
19. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
20. Гращенков Д.В., Николаев Е.В., Ефимов В.А., Кириллов В.Н. Московский центр климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» – региональный центр испытаний материалов в представительной зоне умеренного климата // Сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012». Москва, 2012. С. 202–208.
21. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1 // Вопросы материаловедения. 2016. №1 (85). С. 116–126.
22. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 24–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.