

УДК 620.193.21

М.Г. Абрамова¹**НАТУРНО-УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТАНЦИЯХ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО И МОРСКОГО ТИПА**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65

Представлены результаты исследования параметров коррозионной стойкости образцов алюминиевых сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Zn–Mg–Cu при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях с распылением аэрозолей NaCl на трех станциях морского типа в условиях умеренно теплого, холодного и умеренно влажного климата и континентальной станции, расположенной в условиях умеренного климата.

Приведено теоретическое и экспериментальное обоснование методического подхода при проведении натурно-ускоренных испытаний на станциях морского и континентального типов.

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

M.G. Abramova¹**FULL-SCALE ACCELERATED TESTS OF ALUMINUM ALLOYS AT CONTINENTAL AND MARINE TYPE STATIONS**

The paper presents the results of a study of the corrosion resistance parameters of samples of aluminum alloys of the Al–Cu–Mg and Al–Zn–Mg–Cu systems during field and field-accelerated tests with atomization of NaCl aerosols at three marine stations under conditions of lukewarm, cold and sub-humid climate and continental station located in temperate climate.

The paper also provides the theoretical and experimental substantiation of the methodological approach for conducting field-accelerated tests at marine and continental stations.

Keywords: corrosion, full-scale climatic tests, full-scale accelerated tests, aluminum alloys.

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

Наиболее перспективным методом оценки поведения алюминиевых сплавов в условиях повышенной коррозионной агрессивности является проведение натурно-ускоренных испытаний, направленных на получение сведений о стойкости материалов к агрессивному воздействию хлоридсодержащих сред, для подтверждения и прогнозирования сохранности свойств в ожидаемых условиях эксплуатации [1–4].

Многолетний опыт применения лабораторных методов ускоренных коррозионных испытаний в климатических камерах [5–7] позволил однозначно определить область применения данного метода исследований как инструмента для сравнительной оценки стойкости материалов и защитных покрытий, не предназначенного для определения сроков службы материала, а также прогнозирования его поведения в реальных условиях воздействия внешней среды.

В сравнении с лабораторными методами испытаний натурно-ускоренные методы позволяют получать данные по коррозионной стойкости, в наибольшей степени приближенные к натурным испытаниям ввиду сохранения идентичности механизма коррозионного разрушения, и могут быть применены для прогнозирования поведения материалов в реальных климатических условиях в составе изделий и агрегатов [8, 9].

Как показано в работах [10, 11], проведение натурно-ускоренных испытаний деформируемых алюминиевых сплавов различных систем позволяет выявить склонность к локальным видам коррозии уже в течение 1–2 лет, в то время как при проведении натуральных испытаний для этого потребовалось бы не менее 5–7 лет, что особенно важно в части оценки склонности к расслаивающей коррозии, время до образования которой в условиях открытой атмосферы может достигать 5–10 лет. Данное

обстоятельство определяет актуальность развития методик натурно-ускоренных испытаний, позволяющих оценить поведение материалов в условиях воздействия внешней среды за более короткий срок, что необходимо для своевременной квалификации и внедрения новых перспективных материалов.

Одним из преимуществ проведения натурно-ускоренных испытаний с нанесением на исследуемый образец аэрозолей электролита является их меньшая зависимость от текущих метеоусловий по сравнению со стандартной натурной экспозицией без дополнительного внешнего воздействия [10, 12]. Кинетика развития процессов коррозионного разрушения при натурно-ускоренных испытаниях менее подвержена влиянию сезонных и месячных колебаний метеоусловий и в меньшей степени зависит от времени (сезона) начала коррозионных испытаний.

Тем не менее в настоящее время малоизученным остается вопрос применимости единого метода натурно-ускоренных испытаний в различных климатических зонах для ускорения процессов коррозии, свойственных данному региону. Согласно проведенным ранее исследованиям [13], к одним из наиболее значимых факторов при проведении натурно-ускоренных испытаний является воздействие осадков, увеличение продолжительности и интенсивности воздействия которых приводит к снижению скорости развития процессов коррозии. В работах [14, 15] также приведены результаты исследований, показывающие повышение достоверности прогнозных моделей определения массопотерь стандартных материалов для оценки коррозионной агрессивности атмосферы с введением в функцию доза-ответ коэффициента количества осадков.

Данная работа посвящена исследованию влияния метеорологических и аэрохимических параметров атмосферы различных климатических зон, используемых для проведения натурно-ускоренных испытаний, на кинетику и степень коррозионного разрушения алюминиевых сплавов.

Материалы и методы

Материалы для испытаний

В качестве материалов для исследования применяли образцы, изготовленные из листов типовых конструкционных алюминиевых сплавов систем Al–Cu–Mg (*сплав 1*) и Al–Zn–Mg–Cu (*сплав 2*) толщиной ~2 мм с предварительно удаленной методом химического травления плакировкой.

Методика испытаний

В данной работе для проведения испытаний выбраны климатические станции, распо-

ложенные в четырех климатических зонах на территории Российской Федерации:

- умеренно теплого климата с мягкой зимой приморской атмосферы (условно обозначена – УТМ);

- умеренно влажного климата приморской атмосферы (УВМ);

- холодного климата приморской атмосферы (ХМ);

- умеренного климата сельской атмосферы континентальной зоны при отсутствии близлежащих источников выноса хлорид-ионов (СК).

Натурно-ускоренные испытания проводили при расположении образцов на открытой площадке на атмосферных стендах под углом 45 градусов к горизонту в течение 1 года с промежуточными съемами после 3 и 6 мес.

В качестве испытательного раствора использовали 3%-ный раствор NaCl, распыляемый с помощью пульверизатора 1 раз в день в вечернее время с образованием тонкой равномерной пленки электролита на поверхности образцов без крупных стекающих капель.

Для сравнения одновременно с натурно-ускоренными испытаниями проведены натурные испытания в течение двух лет образцов в идентичных условиях, но без дополнительного воздействия аэрозолями электролита.

На станциях, расположенных в приморских зонах, удаленность атмосферных стендов от береговой линии не превышала 100 м.

Для испытаний применяли образцы размером 30×150 мм в количестве 5 штук на точку, позволяющие провести оценку комплекса характеристик на каждом образце.

В качестве оцениваемых параметров коррозионной стойкости использовали показатели скорости коррозии, глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии, а также потерь механических свойств (предела прочности, предела текучести и относительного удлинения) при осевом растяжении.

Скорость коррозии определяли по ГОСТ 9.908–85 [16] путем сравнения массы образцов, прошедших коррозионные испытания (с последующим удалением продуктов коррозии по ГОСТ 9.907–2007 [17]), с исходной массой, в отношении к площади образца и сроку экспозиции. Для измерения массы применяли аналитические весы GR-200 с точностью до 0,0001 г.

Оценку глубины питтинговой коррозии проводили по ГОСТ 9.908–85 на образцах с предварительно удаленными продуктами коррозии на лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT с точностью до 0,001 мкм.

Глубину межкристаллитной коррозии определяли по ГОСТ 9.021–74 [18] при исследовании предварительно изготовленного

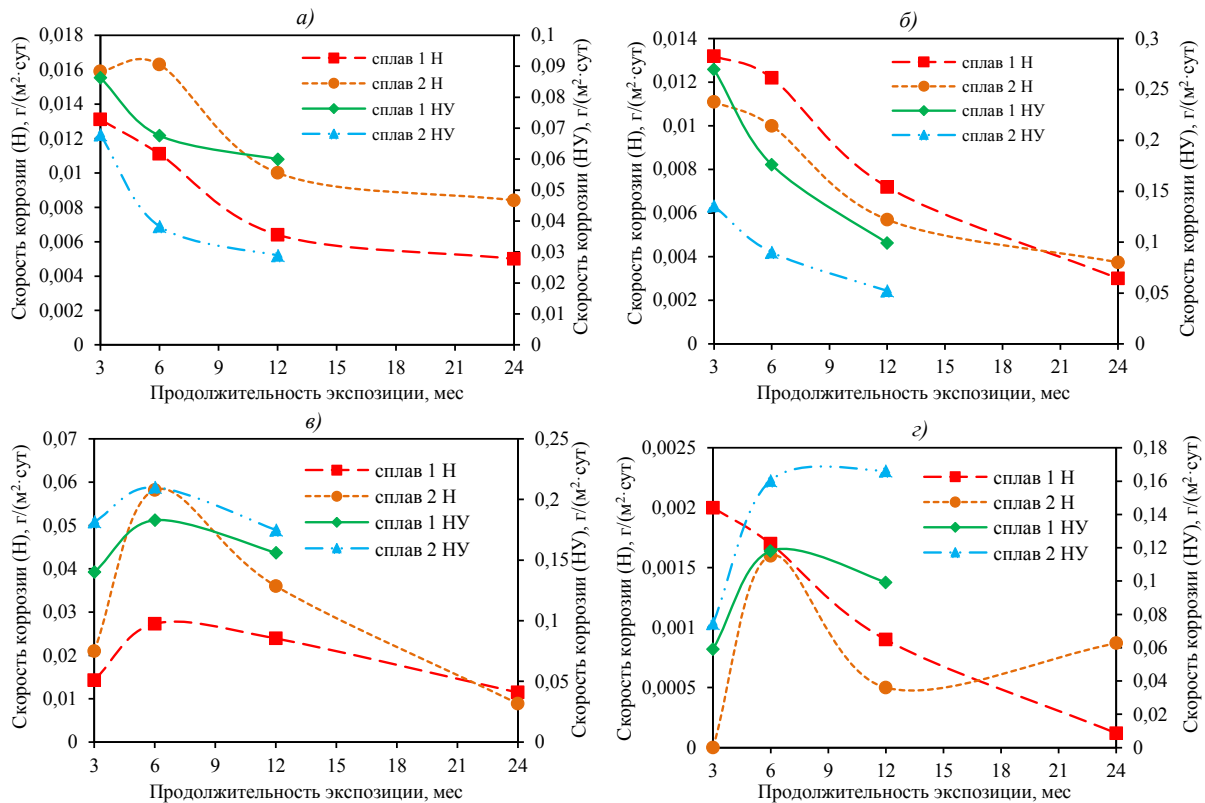


Рис. 1. Скорость коррозии образцов из сплавов 1 и 2 при натуральных (Н) и натурно-ускоренных (НУ) испытаниях в условиях климатических зон на станциях (см. текст): УТМ (а), УВМ (б), ХМ (в) и СК (з)

микрошлифа в поперечном сечении на металлографическом микроскопе Olympus GX51 с точностью до 0,01 мм.

Испытания на осевое растяжение проводили по ГОСТ 1497–84 [19] на образцах в виде лопаток на универсальной испытательной машине Zwick Roell Z100 при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены графики изменения скорости коррозии образцов сплавов 1 и 2 после коррозионных испытаний. В таблице приведены средние значения метеорологиче-

ских параметров атмосферы на станциях за период экспозиции образцов. Видно, что кинетика скорости коррозии при натурно-ускоренных испытаниях в условиях климатических зон на станциях УТМ и УВМ похожа (уже после 3 мес испытаний скорость коррозии начинает существенно снижаться), в то время как в условиях климатической зоны на станции ХМ после 6 мес отмечается рост скорости коррозии по сравнению с тремя месяцами, после чего происходит ее снижение.

Следует отметить, что сравнение полученных результатов на станциях прибрежного и континентального типов без учета данной

Среднегодовые метеорологические параметры климатических станций за период экспозиции образцов материалов

Условное обозначение станции (см. текст)	Температура, °С	Относительная влажность, %	Количество осадков, мм/год	Скорость осаджения хлорид-ионов, мг/(м ² ·сут)	Продолжительность увлажнения поверхности, часов в год
УТМ	16,1	71	651	48,6	2914
УВМ	5,5	65	698	35,0	2687
ХМ	2,0	79	405	52,4	2384
СК	5,9	77	799	1,90	3056

особенности расположения, являющейся ключевой при проведении коррозионных испытаний, является некорректным. Ввиду этого анализ поведения сплавов на станции в условиях климатической зоны СК будет рассматриваться отдельно от станций в зонах с морским типом климата.

Ключевой особенностью проведения коррозионных испытаний на станциях с морским и континентальным типом климата является наличие либо отсутствие собственных источников выноса хлорид-ионов. На станциях с морским типом климата выносимые аэрозоли хлорид-ионов уже являются мощным стимулирующим фактором коррозии, а дополнительное нанесение растворов электролитов только усиливает скорость развития коррозионного разрушения, обуславливая инициацию зарождения и увеличения коррозионных очагов [20–24]. Видно (рис. 1, а–в), что кинетика скорости коррозии при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях сохраняется, различие только в порядке получаемых значений. При этом характерно, что величина ускоряющего фактора при натурно-ускоренных испытаниях тем выше, чем ниже содержание хлорид-ионов в атмосфере. Так, для станций в условиях климатических зон УТМ и ХМ, характеризующихся высоким собственным содержанием в атмосфере хлорид-ионов (соответственно 48,6 и 52,4 мг/(м²·сут)), различие порядка получаемых значений составляет ~ (3–6), а на станции в условиях климатической зоны УВМ с собственным значением концентрации хлоридов 35,0 мг/(м²·сут) различие порядка получаемых значений доходит до 20.

Ранее определенная в работах [25–27] коррозионная агрессивность атмосферы климатических станций морского типа, использованных для проведения испытаний в данной работе, классифицируется как средняя (С3) согласно стандарту ISO 9223–2017 [28], который устанавливает категории коррозионной агрессивности по всему земному шару, и как высокая (9 балл) – по ГОСТ 9.039–74 [29], который устанавливает категории коррозионной агрессивности на территории СССР.

На станциях континентального типа, для которых в принципе не свойственны высокие скорости протекания процессов коррозии, нанесение аэрозолей электролита оказывает колоссальный ускоряющий эффект – различие значений составляет ~60 раз (рис. 1, г). При этом кинетика скорости коррозии при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях различается не только в зависимости от вида испытаний, но и в зависимости от системы сплава.

Если выразить коэффициент ускорения ($K_{\text{н/н}}$) натурно-ускоренных испытаний по

отношению к натурным соотношением величин коррозионных потерь при равном сроке экспозиции, то следует отметить, что по показателю скорости коррозии после 1 года испытаний для станций морского типа $K_{\text{н/н}}$ составляет: 9,2–13,8 – для сплава 1 и 2,9–9,2 – для сплава 2. Для континентальной станции СК значения $K_{\text{н/н}}$ составляют 110,3 – для сплава 1 и 332,6 – для сплава 2.

Как установлено в работе [13], одним из факторов влияния на различие динамики изменения скорости коррозии на станциях морского типа является количество выпадающих осадков. Так, среднее количество осадков на станциях морского типа в зонах УТМ и УВМ в 1,6–1,7 раза больше по сравнению с количеством осадков на станции в зоне ХМ, что соответствует снижению скорости коррозии на данных станциях уже после 3 мес испытаний в сравнении со станцией в зоне ХМ, для которой зафиксирован рост скорости коррозии вплоть до 6 мес испытаний. Таким образом, увеличение количества осадков способствует снижению скорости протекания коррозионных процессов как при натуральных, так и при натурно-ускоренных испытаниях на станциях морского типа.

В отношении континентальной станции в климатической зоне СК закономерностей, характерных для станций морского типа, не наблюдается. Несмотря на гораздо большее количество осадков в сравнении с остальными станциями (799 мм/год), отмечается положительная кинетика скорости коррозии вплоть до 6 мес испытаний, т. е. фактор ускоряющего процесса натурно-ускоренных испытаний превышает даже столь интенсивное воздействие осадков. Следует упомянуть, что воздействие осадков оказывает не только «моющий» эффект, но также является фактором уменьшения количества операций по нанесению аэрозолей электролита – в период дождей нанесение раствора не производится, так как не имеет физического смысла.

На рис. 2 и 3 приведены результаты оценки склонности сплавов к локальной коррозии при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях в различных климатических зонах (межкристаллитная коррозия сплава 2 в период проведения испытаний не обнаружена).

Отметим, что после 1 года экспозиции коэффициент $K_{\text{н/н}}$ питтинговой и межкристаллитной коррозии для обоих сплавов при испытаниях на станциях морского типа находится в диапазоне от 1,5 до 3,5.

Основной рост глубины межкристаллитной коррозии сплава 1 при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях на станциях морского типа происходит в первые 6 мес испытаний, а далее практически не изменяется

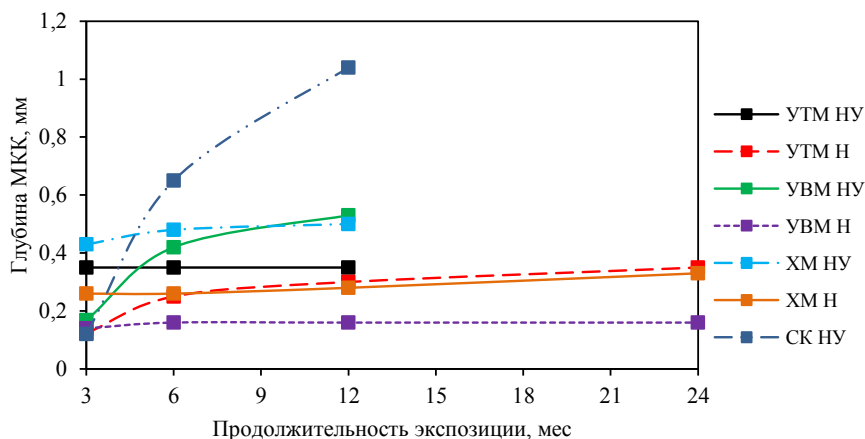


Рис. 2. Глубина межкристаллитной коррозии (МКК) образцов из сплава 1 при натуральных (Н) и натурно-ускоренных (НУ) испытаниях в условиях различных климатических зон

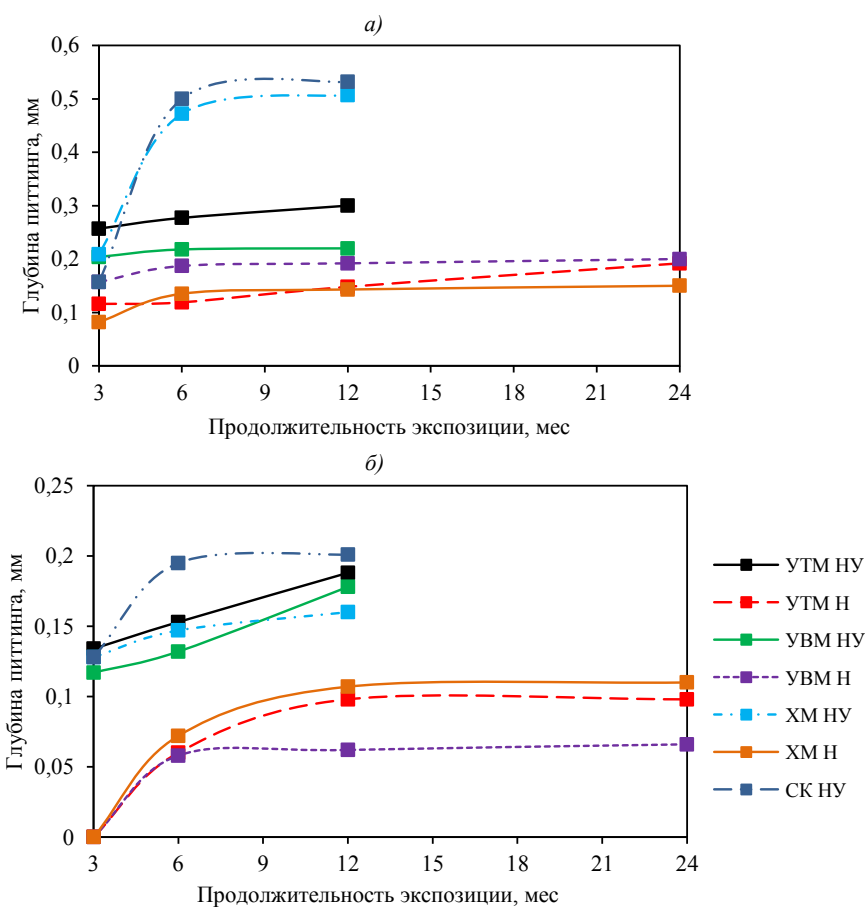


Рис. 3. Глубина питтинговой коррозии образцов из сплавов 1 (а) и 2 (б) при натуральных (Н) и натурно-ускоренных (НУ) испытаниях в условиях различных климатических зон

(рис. 2). Основным фактором, определяющим кинетику развития локальной коррозии алюминиевых сплавов, является доступ активной среды к поверхности образца. При коррозионных испытаниях скорость коррозии тем выше, чем больше площадь контакта образца с внешней средой. По мере образования коррозионных очагов доступ активной

среды к поверхности образца начинают преграждать плотные слои продуктов коррозии, а также солевых и пылевых отложений. В большинстве случаев снижение скорости коррозии (как параметра, характеризующего равномерное коррозионное разрушение образца) и межкристаллитной коррозии сопряжено с высокой степенью деструкции

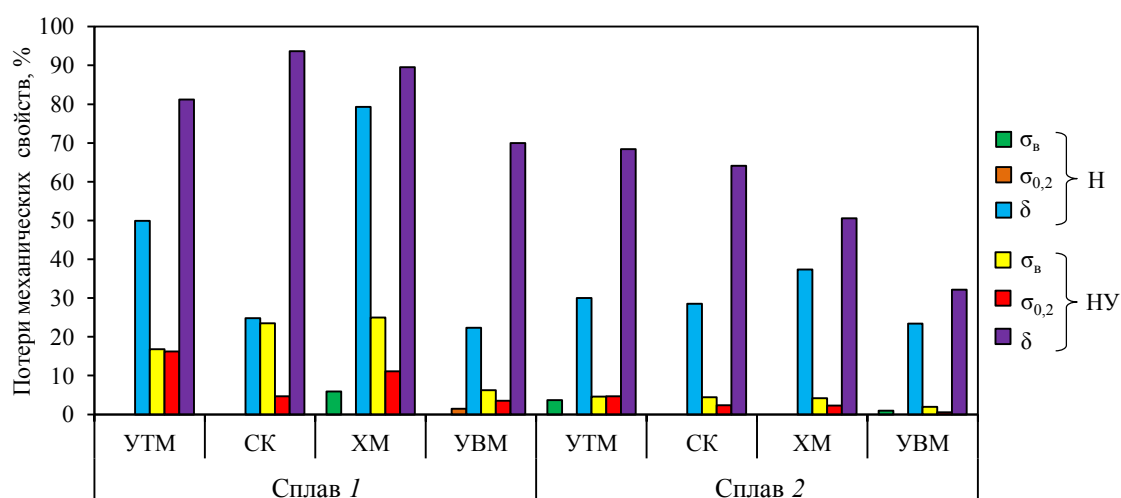


Рис. 4. Потери механических свойств образцов из алюминиевых сплавов Д16-Т (1) и В95о.ч.-Т2 (2) после 12 мес натуральных (Н) и натурно-ускоренных (НУ) испытаний в условиях различных климатических зон

поверхности образца и обильным образованием продуктов коррозии. В частности, в работах [30, 31] показано, что продукты коррозии способствуют торможению кинетики коррозионного процесса.

Натурно-ускоренные испытания способствуют значительной интенсификации развития локальной коррозии обоих сплавов при испытаниях на станции континентальной зоны СК, в то время как при натурной экспозиции межкристаллитной и питтинговой коррозии на обоих сплавах не обнаружено, значения этих величин при натурно-ускоренных испытаниях на порядок больше по сравнению с результатами, полученными для данных сплавов на станциях морского типа.

Анализ полученных данных по оценке потерь механических свойств образцов алюминиевых сплавов после 12 мес натуральных и натурно-ускоренных испытаний (рис. 4) показывает увеличение потерь при натурно-ускоренных испытаниях: если после натуральных испытаний на четырех станциях потери прочностных свойств находились в диапазоне 0–5,9%, то после натурно-ускоренных испытаний данный диапазон составил 2–25%. Диапазон значений коэффициента $K_{НУ/Н}$ по показателю относительного удлинения при испытаниях на станциях морского типа составил от 1,13 до 3,1.

Наибольшие потери механических свойств при натурно-ускоренных испытаниях и наименьшие – при натуральных испытаниях получены после экспозиции на станции в континентальной зоне СК: потери предела прочности увеличились с 0 до 23,5%, а потери относительного удлинения – с 24,8 до 93,7%.

Таким образом, совокупность определенных коррозионных параметров образцов из

алюминиевых сплавов позволяет сделать вывод о том, что проведение натурно-ускоренных испытаний на станции континентального типа приводит к лавинообразному снижению свойств, в то время как при испытаниях на станциях морского типа нанесение аэрозолей NaCl ускоряет коррозионные процессы не более чем в 4 раза (по показателям локальной коррозии, главным образом определяющим коррозионную стойкость алюминиевых сплавов, и потерям механических свойств). Ранее в работе [32] также отмечалось резкое увеличение степени коррозионного разрушения алюминиевых сплавов при дополнительном обрызгивании раствором NaCl образцов при экспозиции в условиях г. Москвы.

Основной целью проведения натурно-ускоренных испытаний является более быстрое определение склонности материалов к воздействию внешней среды, достигаемое путем принудительной инициации процессов коррозии. При этом ускорение не должно быть чрезмерным, что может вызвать изменение механизма коррозионного разрушения и привести к получению некорректных данных. Таким образом, натурно-ускоренные испытания являются средством более быстрого получения сведений о стойкости материала к коррозионному разрушению в данной климатической зоне по сравнению с натурными испытаниями и могут быть использованы для прогнозирования сохранности свойств материала в условиях воздействия внешней среды на длительный период.

Ключевым фактором выбора режима проведения натурно-ускоренных испытаний является учет конкретных климатических условий экспонирования образцов с тем, чтобы воздействие ускоряющего фактора

не приводило к получению некорректных сведений о стойкости материала в условиях данного климатического региона.

Таким образом, натурно-ускоренные испытания с ежедневным распылением аэрозолей NaCl корректно проводить только в условиях приморских регионов с высокой коррозионной агрессивностью атмосферы, для которых характерен естественный вынос аэрозолей морских солей с близлежащих морей/океанов. Для приморских регионов, характеризующихся более низкой коррозионной агрессивностью атмосферы (при средней многолетней скорости осаждения хлорид-ионов $<35 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), проведение натурно-ускоренных испытаний целесообразно после предварительного проведения натуральных и натурно-ускоренных испытаний для оценки соответствия кинетики коррозионных процессов и коэффициентов ускорения. При необходимости режим проведения натурно-ускоренных испытаний может быть скорректирован по количеству операций распыления аэрозоля. Регулировка режима путем изменения концентрации наносимого солевого раствора не приведет к значимым отличиям от коррозионного эффекта. В работе [33] показано, что изменение концентрации используемого раствора практически не оказывает влияния на степень коррозионного разрушения – большее значение имеет непосредственно факт нанесения аэрозоля на поверхность образцов.

Для проведения натурно-ускоренных испытаний на станциях континентального типа нанесение хлоридсодержащих аэрозолей приводит к изменению контролирующего параметра коррозионного разрушения. Так, если для станций приморского типа контролирующим параметром коррозионного процесса является частое воздействие пленки электролита, то в отсутствие естественных источников выноса хлоридов контролирующими становятся параметры, характеризующие агрессивность атмосферы данного климатического региона. К таким параметрам может быть отнесено повышенное содержание загрязняющих веществ при наличии ис-

точников промышленного загрязнения с присутствием в атмосфере сернистых и азотных соединений, соляной кислоты, ионов хлора и других соединений [34–37]. Разработка метода натурно-ускоренных испытаний в условиях континентальных станций требует отдельного изучения и разработки.

Заключения

1. Проведение натурно-ускоренных испытаний с нанесением аэрозолей электролита наиболее корректно только при экспозиции образцов на станциях морского типа, для которых вынос естественных аэрозолей морских солей с поверхности близлежащих морей/океанов является основным контролирующим параметром при проведении коррозионных испытаний.

2. При испытаниях на станциях морского типа коэффициент ускорения натурно-ускоренных испытаний по отношению к натурным (определенный как соотношение величин показателей коррозионной стойкости за одинаковый период испытаний) по показателю скорости коррозии находится в диапазоне: 6,5–13,8 – для сплава 1 системы Al–Cu–Mg и 2,9–9,2 – для сплава 2 системы Al–Zn–Mg–Cu, по показателям питтинговой и межкристаллитной коррозии – от 1,1 до 3,5 для обоих сплавов.

3. При испытаниях на станциях морского типа характерным является снижение скорости коррозии как при натуральных, так и при натурно-ускоренных испытаниях, с увеличением количества выпадающих осадков.

4. Проведение натурно-ускоренных испытаний с нанесением раствора NaCl на станциях континентального типа приводит к чрезмерному ускорению развития коррозионных процессов по сравнению с натурной экспозицией, при этом кардинально меняется кинетика развития параметров коррозионного разрушения. Необходима разработка методов натурно-ускоренных испытаний, ускоряющих контролируемые процессы при испытаниях на станциях континентального типа как в условиях промышленной атмосферы, так и в условиях относительно чистой атмосферы.

Библиографический список

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. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. №12. С. 7–16.

4. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
5. Кутырев А.Е., Фомина М.А., Чесноков Д.В. Моделирование воздействия испытательных факторов на коррозию металлических материалов при испытании на агрессивное воздействие компонентов промышленной атмосферы в камере солевого тумана // *Материаловедение*. 2015. №3. С. 7–15.
6. Стрекалов П.В., Панченко Ю.М., Жиликов В.П., Каримова С.А., Тарараева Т.И., Никулина Т.В. Ускоренные испытания сплава Д16 в соляном тумане. Масса удержанных хлоридов, коррозия, механические свойства // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. №10. С. 1–8.
7. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 18–22.
8. 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.
9. Курс М.Г. Прогнозирование прочностных свойств обшивки ЛА из деформируемого алюминиевого сплава В950.ч.-Т2 с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2018. №5 (65). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109.
10. 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.
11. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.
12. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №1 (54). С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.
13. Corvo F., Minotas J., Delgado J., Arroyave C. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime // *Corrosion science*. 2005. No. 47. P. 883–892.
14. Панченко Ю.М., Маршаков А.И., Николаева Л.А., Игонин Т.Н. Оценка достоверности предсказаний годовых коррозионных потерь конструкционных металлов, рассчитанных с использованием функций доза-ответ, для территорий с различными категориями коррозионной агрессивности атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2019. №12. С. 1–16.
15. Панченко Ю.М., Маршаков А.И., Николаева Л.А., Ковтанюк В.В., Игонин Т.Н. Прогнозирование коррозионных потерь конструкционных металлов за первый год экспозиции на континентальной территории России // *Коррозия: материалы, защита*. 2019. №2. С. 38–46.
16. ГОСТ 9.908–85. ЕСЗКС. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1985. 34 с.
17. ГОСТ 9.907–2007. ЕСЗКС. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. М.: Стандартинформ, 2007. 32 с.
18. ГОСТ 9.021–74. ЕСЗКС. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. М.: Стандартинформ, 1974. 4 с.
19. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1984. 49 с.
20. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Чесноков Д.В., Жирнов А.Д., Жиликов В.П., Каримова С.А., Тарараева Т.И. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №3. С. 8–14.
21. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П., Тарараева Т.И., Мищенко Е.Н. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. №8. С. 23–29.
22. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость образцов сплава 1201 в морских субтропиках // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. №3. С. 1–5.
23. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2014. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-11-11.
24. Corvo F., Perez T., Dzib L.R. et al. Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres // *Corrosion Science*. 2008. No. 50. P. 220–230.

25. Вапиров Ю.М., Жирнов А.Д., Мищенко Е.Н., Каримова С.А., Панин С.В. и др. Применение расчетных методов определения скорости коррозии для оценки коррозионной агрессивности атмосферы // Коррозия: материалы, защита. 2010. №5. С. 1–6.
26. Михайлов А.А., Жирнов А.Д., Жиликов В.П., Панченко Ю.М., Березина Л.Г., Каримова С.А., Чесноков Д.В. и др. Коррозивность приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2009. №9. С. 1–6.
27. Панченко Ю.М., Игонин Т.Н., Николаева Л.А. и др. Коррозионная агрессивность атмосферы по отношению к конструкционным металлам и картографирование континентальной территории Российской Федерации // Коррозия: материалы, защита. 2019. №10. С. 18–30.
28. ISO 9223:2012. Коррозия металлов и сплавов – Коррозивность атмосфер – Классификация, определение и оценка. Женева: ISO, 2012. 15 с.
29. ГОСТ 9.039–74. ЕСЗКС. Коррозионная агрессивность атмосферы. М.: Изд-во стандартов, 1974. 49 с.
30. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Никулина Т.В. Влияние удержанных продуктов коррозии на торможение коррозионного процесса. Ч. 1. Первые два года // Коррозия: материалы, защита. 2013. №2. С. 9–18.
31. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Никулина Т.В. Влияние удержанных продуктов коррозии на торможение коррозионного процесса. Ч. 2. Длительные испытания // Коррозия: материалы, защита. 2013. №3. С. 1–6.
32. Синявский В.С., Калинин В.Д., Александрова Т.В. Новый метод ускоренных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2013. №2. С. 89–93.
33. Курс М.Г. Метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения листов из деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 147 с.
34. Осетров А.Ю., Четырина О.Г., Шель Н.В. Применение ингибированных масляных композиций в целях защиты от коррозии металлических изделий в атмосфере, содержащей SO₂ // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. №4. С. 843–854.
35. Fernández-García A., Díaz-Franco R., Martínez L., Wette J. Study of the effect of acid atmospheres in solar reflectors durability under accelerated aging conditions // Energy Procedia. 2014. No. 49. P. 1682–1691.
36. Syed S. Influence of the environment on atmospheric corrosion of aluminium // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2010. Vol. 45. No. 4. P. 282–287.
37. Corvo F., Betancourt N., Mendoza A. The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel // Corrosion Science. 1995. Vol. 37. No. 12. P. 1889–1901.