

УДК 620.1:669.715

В.О. Старцев¹, И.М. Медведев¹, О.В. Старцев¹**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ЭПОКСИДНЫМ ПОКРЫТИЕМ
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЭКСПОНИРОВАНИИ
В НАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-12-12

Изучено изменение температуры образцов алюминиевого сплава Д16-АТ с эпоксидными покрытиями белого, серого и черного цветов в течение 9 лет натурального экспонирования в Геленджикском центре климатических испытаний. Предложена мультилинейная прогнозная модель изменения температуры, включающая 12 метеорологических показателей. Показана высокая достоверность модели. Установлена строгая 12-месячная периодичность в величине среднеквадратичной месячной погрешности прогноза температуры поверхности образцов.

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, температура поверхности, климатические факторы, прогнозирование, мультилинейная модель.*

The variations in surface temperature of D16-AT aluminum samples with white, grey and black epoxy coatings subjected to 9 years of natural weathering in Gelendzhik Climatic Testing Center are studied. The multilinear predication model of temperature variations including 12 meteorological indexes is proposed to predict the sample surface temperature. High reliability of model is shown. The rigorous 12-month intervals in the value of mean square error of monthly models surface temperature prediction are shown.

Keywords: *aluminum alloy, surface temperature, climatic parameters, prognostication, multilinear model.*

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

Контроль состояния материалов в климатических условиях позволяет оценивать их коррозию и старение, определять эффективность средств защиты и профилактики, чтобы избежать преждевременного выхода из строя деталей или дорогостоящего обслуживания [1, 2]. В работах [3–7] рассмотрены закономерности влияния агрессивных климатических факторов (температуры, влажности, солнечной радиации, ветра, осадков в виде дождя и снега, CO₂, хлоридов) на алюминиевые сплавы, проявляющиеся в изменении физико-химических характеристик материалов. Важным параметром состояния материала при экспонировании в натуральных климатических условиях является его температура. Контроль этого показателя необходим для мониторинга времени увлажнения поверхности и корректировки показаний датчиков коррозии, расположенных на контролируемых образцах [1–4].

В работах [8–16] представлены методики моделирования изменения температуры поверхности образцов при экспонировании в натуральных условиях различных климатических зон. В работе [8] показано, что температура поверхности образца линейно зависит от температуры воздуха и квадратично – от интенсивности солнечной радиации. Соответствие смоделированных и экспериментально измеренных значений контроли-

руемого показателя определяется коэффициентом детерминации R^2 [17], представляющим собой долю дисперсии зависимой переменной, объясняемую выбранной математической моделью. Чем ближе коэффициент детерминации к 1, тем лучше модель описывает экспериментальные данные с используемыми переменными. В модели [8] достигнут высокий коэффициент детерминации $R^2=0,976$. В работе [9] зависимость температуры поверхности образцов определена из закона сохранения энергии и находится из уравнения

$$a_1(T_s - T_1) + a_2 T_s^4 = a_3 G + a_4 T_2^4 + a_5 T_3, \quad (1)$$

где T_s – температура поверхности образца; T_1 – температура прилегающего к образцу воздуха; T_2 – температура воздуха; T_3 – температура поверхности почвы около образца; G – интенсивность солнечной радиации; a_i ($i=1 \dots 5$) – параметры модели (1).

Модель (1) позволяет рассчитывать температуру поверхности образцов со среднеквадратичной погрешностью $0,4-1,3^\circ\text{C}$ и коэффициентом детерминации $R^2=0,992$. В работе [10] вместе с моделью, аналогичной модели (1), где использовались факторы и отклики в один и тот же момент, автор ссылается на работу, в которой температуру поверхности в момент времени t оценивали с помощью линейной зависимости от факторов, измеренных не только в момент измерения откликов (t), но и в предыдущие моменты времени: $t-dt$; $t-2dt$; $t-3dt$, где dt – интервал времени между измерениями (например, 1 сут). Величина ошибки по моделям, приведенным в работе [10], составляла $1-2^\circ\text{C}$.

Кроме очевидных достоинств указанных моделей, следует отметить и их недостатки: представленные модели получены на основе непродолжительных периодов наблюдений – в работе [4] срок экспонирования образцов не превышал 2 лет, в работе [5] продолжался всего 12 мес; результаты, приведенные в работах [4, 5], являются аппроксимацией (моделированием), но не прогнозированием; при моделировании учитывалось ограниченное количество климатических факторов влияния – температуры воздуха и интенсивности солнечной радиации.

Выполненные исследования показали принципиальную возможность прогнозирования температуры поверхности тестовых образцов материалов с использованием данных прямых метеорологических наблюдений. Надежность прогноза должна зависеть от значимости выбранных метеорологических показателей за продолжительный период наблюдений. Увеличив при анализе количество возможных влияющих факторов на прогнозируемый показатель и разделив участки подбора параметров (моделирования) и проверки модели (прогнозирования) по времени, можно оптимизировать модель и получить более реалистичные оценки достоверности прогноза.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

С 2004 г. в Геленджикском центре климатических испытаний ВИАМ им. Г.В. Акимова (ГКЦИ ВИАМ) ведется мониторинг температуры образцов алюминиевого сплава Д16-АТ с нанесенными эпоксидными покрытиями белого, серого и черного цветов, установленных на открытом испытательном стенде под углом 45 град к горизонту. Географическое положение места наблюдений в ГКЦИ ВИАМ составляет $44,57$ град северной широты и $38,02$ град восточной долготы [18]. Периодичность фиксации температуры поверхности образцов составляет 20 мин с погрешностью, не превышающей $0,2^\circ\text{C}$.

В табл. 1 представлена зависимость цвета лакокрасочного покрытия ЭП-140 на среднюю величину, минимальные и максимальные значения температуры поверхности тестовых образцов за весь период наблюдений.

Таблица 1

**Характеристические температуры поверхности тестовых образцов,
измеренные за 10-летний период наблюдений в ГЦКИ ВИАМ**

Значение показателя	Температура, °С, в зависимости от цвета покрытия ЭП-140		
	белый	серый	черный
Минимальное	-19,1	-18,1	-18,8
Максимальное	53,8	59,5	68,8
Среднее	15,0	17,0	18,2
Стандартное отклонение	9,9	11,0	12,7

Изменение цвета покрытия от белого к черному приводит к увеличению средней температуры поверхности на 3,2°С, но при этом максимальная величина температуры возрастает на 15°С.

Параллельно измеряли стандартные метеорологические показатели локального климата ГЦКИ ВИАМ с помощью автоматизированного метеорологического комплекса СКМП-2 [19]. Накоплена 10-летняя база данных об изменении следующих показателей, внесенных в базу данных с интервалом в 20 мин:

1. Атмосферное давление, мм. рт. ст.;
2. Относительная влажность воздуха, %;
3. Скорость ветра, м/с;
4. Направление ветра, град;
5. Количество осадков, мм;
6. Суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м²;
7. Ультрафиолетовая составляющая солнечной радиации, кВт·ч/м²;
8. Продолжительность увлажнения поверхности под навесом, ч;
9. Продолжительность увлажнения поверхности в жалюзийной будке, ч;
10. Температура воздуха, °С;
11. Угол склонения Солнца, град (изменяется от -23,45 до 23,45 град в течение года);
12. Угол высоты Солнца над горизонтом, град.

С использованием полученной базы данных ранее в работе [19] проанализировано влияние температуры и относительной влажности воздуха, интенсивности солнечной радиации, скорости и направления ветра на температуру поверхности указанных тестовых образцов алюминиевого сплава. Аппроксимацию измеренных значений температуры поверхности обеспечивали с помощью линейной комбинации перечисленных пяти климатических факторов, что позволило прогнозировать искомый показатель со стандартным отклонением 3,1°С при коэффициенте детерминации $R^2=0,96$.

В данной работе поставлена задача проанализировать влияние всех 12 измеренных метеорологических показателей, различного сочетания этих показателей, периодов аппроксимации на точность и достоверность прогнозных моделей за 10-летний период прямых измерений.

В дополнение к 12 измеренным метеорологическим показателям при моделировании температуры для учета радиационного баланса [20] аналогично зависимости (1) [9] добавлено еще два параметра:

13. Квадрат температуры воздуха, К²;
14. Степень температуры воздуха, К².

Моделирование и прогнозирование температуры поверхности тестовых образцов выполнено аналогично, приведенным в работе [19], с помощью мультилинейной зависимости [21]

$$y_i = b_0 + \sum_{k=1}^K b_k x_{ki}, \quad (2)$$

где y_i – отклик (температура поверхности образцов с покрытиями белого, серого и черного цветов) в момент времени i ; x_{ki} – k -й контролируемый показатель в i -й момент времени; K , k – варьируемые параметры модели (2) ($K=14$; $k=0 \dots K$).

На стадии определения параметров модели (2) проведен анализ выбросов изменений температуры образцов по показателям, представленным в работе [22]:

$$\frac{|dY_i - M[dY]|}{S[dY]} > n, \quad (3)$$

$$dY_i = Y_i - \hat{Y}_i, \quad (4)$$

где Y_i – экспериментальное значение контролируемого показателя; \hat{Y}_i – оценка значения этого показателя по модели; dY_i – остатки модели для i -й точки; $M[dY]$ – среднее значение остатков (dY); $S[dY]$ – стандартное отклонение остатков.

Значения температуры, выходящие за пределы интервала с границей $n=4$, удалялись в соответствии с рекомендациями работы [23] и параметры модели (2) пересчитывались. Для множества измеренных значений $n=4$ выбрано из соображения, что остатки независимы и подчиняются нормальному закону распределения. В таком случае в диапазон с границей $n=3$ попадает 99,6% всех остатков и величину отклонения большей $n=4$ заведомо можно считать выбросом. В рассмотренной таблице наблюдения (более 750000 измеренных значений температуры) нашлось всего 20 таких случаев, что подчеркивает корректность показаний температурных датчиков. Например, в декабре 2009 г. при температуре воздуха 4°C датчик температуры показал нереальную величину 80°C. Это позволило убрать точки некорректной работы датчиков контроля температуры и уменьшить ошибку прогноза на 0,5°C. Критерий (выражения 3 и 4) применялся только к участку аппроксимации, на участке прогноза брались все отклики.

Для проверки влияния контролируемых показателей на отклик задачи проведено моделирование температуры образцов при использовании различных сочетаний показателей по модели (2) в интервале 1 год. Рассмотрено более 450000 вариантов расчетов:

$$N = N_t N_y C_K^k,$$

где $N_t=3$ (количество цветов поверхности образцов); $N_y=9$ (количество лет исследования);

$$C_K^k = \frac{K!}{k!(K-k)!} = 16383, k=1, 2, \dots, K, K=14 \text{ – число сочетаний [24].}$$

Метод поиска параметров модели (2) основан на сингулярном разложении матриц [25], который ранжирует независимые переменные в порядке убывания их влияния на отклик и удаляет незначимые переменные.

Результаты

Для каждого типа отклика (покрытие белого, серого, черного цветов) и каждого года наблюдений получились свои сочетания контролируемых показателей, приводящие к наилучшему результату (наименьшая ошибка и наибольший коэффициент детерминации на стадии прогноза). В табл. 2. представлены обобщенные результаты проведенного анализа.

Таблица 2

Статистика прогноза при применении различных сочетаний показателей в модели (2)

Контролируемые показатели*	Ошибка прогноза для покрытий разного цвета, °С			Коэффициент детерминации прогноза для покрытий разного цвета		
	белый	серый	черный	белый	серый	черный
Солнечная радиация, положение Солнца (6, 7, 13, 14)	4,84	5,58	5,72	0,31	0,34	0,50
Температура воздуха, положение Солнца (10, 11, 12, 13, 14)	2,90	3,78	5,51	0,87	0,79	0,64
Солнечная радиация, температура воздуха, положение Солнца (6, 7, 10, 11, 12, 13, 14)	2,48	2,90	3,79	0,79	0,78	0,80
Солнечная радиация, влага, температура воздуха, положение Солнца (2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14)	1,60	1,94	3,23	0,94	0,93	0,89
Все показатели (1–14)	1,48	1,87	3,03	0,95	0,93	0,92

* Номера показателей указаны ранее.

Видно, что солнечная радиация и положение Солнца на небосклоне являются значимыми факторами влияния, но полностью не определяют температуру поверхности образцов. Ошибка прогноза по модели (2), построенной на показателях 6, 7, 13, 14, составляет для образцов с покрытием белого цвета 4,84°С, а для образцов с покрытием черного цвета возрастает до 5,72°С.

С учетом температуры воздуха и положения Солнца на небосводе снижается ошибка прогноза до 2,9°С для образцов с покрытием белого цвета. Однако лучший результат достигается, если в модель (2) включить характеристики солнечной радиации, температуры воздуха и положения Солнца на небосводе (показатели 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14). В этом случае коэффициенты детерминации прогноза для покрытий разного цвета достигают значений 0,78–0,80. Еще лучший результат получен при учете относительной влажности воздуха и продолжительности увлажнения поверхности, но самый лучший прогноз обеспечивается при использовании в модели (2) всех 14 показателей. В этом случае ошибка прогноза минимальная, и для образцов алюминиевого сплава с покрытием белого цвета она составляет 1,48°С при коэффициенте детерминации $R^2=0,95$. Погрешность прогноза температуры поверхности образцов черного цвета для всех рассмотренных вариантов выше, а для образцов серого цвета занимает промежуточное положение.

При длительном экспонировании материалов в натуральных климатических условиях их свойства могут изменяться из-за развивающихся процессов коррозии и старения [1, 3, 5–7, 26–31]. Например, потери массы из-за коррозии алюминиевых сплавов АА110 и АА6061 за 2 года экспозиции на климатической станции Miyakojima в Японии составили 6 г/м² [31]. Под воздействием УФ-компоненты солнечной радиации изменяется цвет покрытия [29, 30], что может изменить температурный режим поверхности образцов при одинаковых метеорологических условиях по мере увеличения продолжительности климатического воздействия. Располагая данными о температуре образцов за 10 лет непрерывных наблюдений, можно по величине ошибки прогноза оценить возможный эффект изменения свойств эпоксидных покрытий ЭП-140 при длительном воздействии климатических факторов на температурный режим образцов.

Для этого определены ошибки прогноза за различные временные интервалы аппроксимации. Например, для анализа и подбора параметров модели (2) используются метеорологические показатели, полученные за 1 мес непрерывных наблюдений. С помощью этой выборки определяются параметры модели (2) и дается прогноз на любой последующий месяц за время измерений. Если покрытие образцов стабильно по своим свойствам, то прогноз не должен меняться от изменения времени аппроксимации. Если

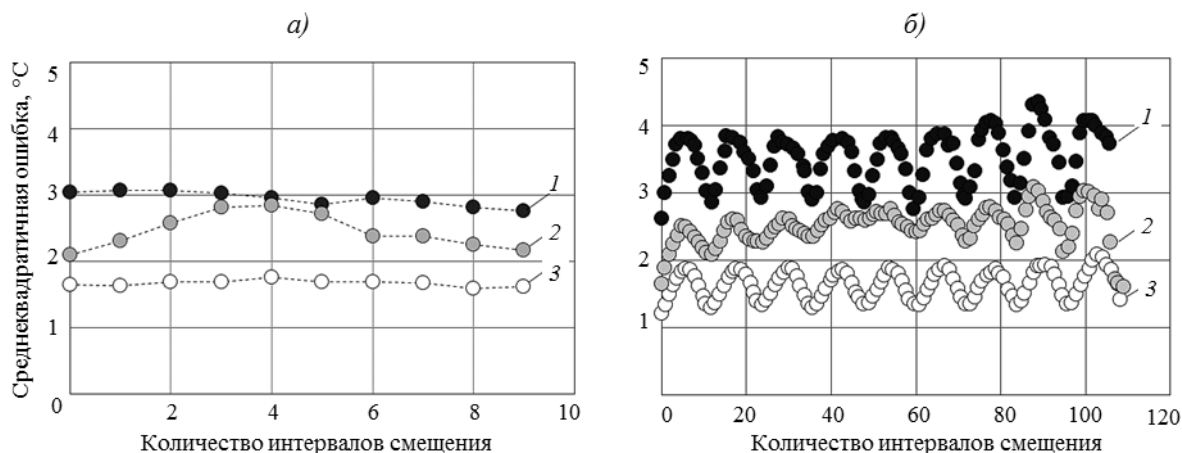
прогноз через N месяцев отличается от прогноза в месяц аппроксимации – это может означать изменение свойств материала под действием климатических факторов. Ошибки прогноза определены и проанализированы для интервалов аппроксимации 1 год, 1 квартал, 1 мес. Для ошибки прогноза на одном выбранном интервале, параметры модели (2) брали со всех предыдущих подобных интервалов. Например, для октября 2015 г. можно получить более 100 вариантов прогноза. Результаты анализа ошибок прогноза усреднены по параметру

$$dp = k(Y_d - Y_p) + M_d - M_p, \quad (5)$$

где dp – количество интервалов между временем подбора параметров ($Y_p M_p$) и прогнозом ($Y_d M_d$); Y_d – год данных; M_d – месяц или квартал данных; Y_p – год нахождения параметров; M_p – месяц или квартал нахождения параметров; k – коэффициент, зависящий от масштаба интервала ($k=1$ – для года, $k=4$ – для квартала, $k=12$ – для месяца), у интервала 1 год: $M_d = M_p$.

Например, разность между 2 кварталом 2015 г. и 3 кварталом 2009 г. составляет $dp = 4(2015 - 2009) + 2 - 3$ интервала (в данном случае интервалами являются кварталы). Если произвести расчет по этой формуле, то получим значение $dp = 4(2015 - 2009) + 2 - 3 = 23$, т. е. 23 интервала.

Зависимость среднеквадратичных ошибок прогноза температуры поверхности тестовых образцов от количества годовых интервалов смещения представлена на рисунке, а. Видно, что при смещении времени аппроксимации от 1 до 9 лет ошибка прогноза для образцов белого цвета составляет неизменную величину $1,7^\circ\text{C}$, доказывая чрезвычайно высокую стабильность эпоксидного покрытия ЭП-140 этого цвета к климатическим воздействиям. Для покрытия черного цвета ошибки прогноза увеличиваются с $2,8$ до $3,0^\circ\text{C}$, т. е. всего на $0,2^\circ\text{C}$, подтверждая стабильность свойств покрытия. Ошибка прогноза образцов с покрытием серого цвета экстремально изменяется с $2,1$ до $2,9^\circ\text{C}$.



Зависимости среднеквадратичных годовых (а) и месячных (б) ошибок прогноза температуры поверхности образцов с покрытием черного (1), серого (2) и белого цветов (3) на алюминиевом сплаве Д16-АТ от количества интервалов смещения dp

Наиболее интересный результат получен при анализе влияния месячных интервалов смещения на величину среднеквадратичной месячной погрешности прогноза (см. рисунок, б). Оказалось, что величина этой ошибки флуктуирует со строгой периодичностью 12 мес для покрытий каждого цвета. Например, в тестовых образцах белого цвета при увеличении интервала смещения от 1 до 6 мес ошибка возрастает с $1,2$ до $1,9^\circ\text{C}$, а затем вновь уменьшается до величины $1,2^\circ\text{C}$ при смещении интервала аппроксимации от 7 до 12 мес. Амплитуда аналогичных флуктуаций для образцов серого цвета составляет 1 и $1,5^\circ\text{C}$ – для покрытия черного цвета (см. рисунок, б).

Обсуждение и заключения

Проведенный анализ показывает высокую достоверность мультилинейной модели (2) для прогнозирования температуры поверхности образцов и преимущество использования большего количества стандартных метеорологических показателей в этой модели. Однако, исходя из результатов, представленных на рисунке, можно утверждать, что кроме проанализированных 12 стандартных метеорологических показателей существуют другие показатели, оказывающие дополнительное влияние на температуру поверхности образцов.

С учетом температурного режима образцов, экспонируемых в натуральных климатических условиях, возможно расширить представления о структурных и физико-химических превращениях, полученных в поверхностных слоях металлических и неметаллических материалов [2, 26, 27, 32–35].

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Доказана возможность использования мультилинейной модели для прогнозирования температуры поверхности образцов из алюминиевого сплава Д16-АТ с эпоксидными покрытиями ЭП-140 белого, серого и черного цветов на основе измеренных стандартных метеорологических характеристик. Для образцов алюминиевого сплава с покрытием белого цвета она составляет $1,6^{\circ}\text{C}$ при коэффициенте детерминации $R^2=0,94$.
2. Показано, что за 10 лет климатического воздействия эпоксидное покрытие ЭП-140 проявило высокую климатическую стойкость.
3. Впервые установлена строгая 12-месячная периодичность в величине среднеквадратичной месячной погрешности прогноза температуры поверхности тестовых образцов.
4. Для минимизации погрешности прогноза температуры поверхности тестовых образцов для каждого месяца года целесообразно использовать параметры мультилинейной модели, полученные при аппроксимации тестовых измерений в соответствующий месяц любого года измерений.

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., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Каблов Е.Н. и др. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозионности приморских атмосфер // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. №1. С. 1–15.
5. Berdahl P., Akbari H., Levinson R. Weathering of Roofing Materials-An Overview // *Constr. Build. Mater.* 2006. P. 23.
6. Dan Z., Muto I., Hara N. Constant Dew Point Corrosion Tests for Metals, Developments in Corrosion Protection // *Developments in Corrosion Protection* / ed. by M. Aliofkhazraei. 2014. P. 81–101.
7. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys // *Mater. Des.* 2014. Vol. 56. P. 862–871.
8. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures // *Polym. Degrad. Stab.* 2009. Vol. 94. P. 189–195.
9. Bijl P. и др. Modelling of sample surface temperature in an outdoor weathering test // *Polym. Test.* 2011. Vol. 30. P. 485–492.
10. Myers D. Predicting temperatures of exposure panels: models and empirical data // *ACS Symposium Series, D.* / ed. by R. Bauer, J. W. Martin. 1999. Vol. 722. P. 71–84.

11. Haillant O., Dumbleton D., Zielnik A. An Arrhenius approach to estimating organic photovoltaic module weathering acceleration factors // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2011. Vol. 95. P. 1889–1895.
12. Tocháček J., Vrátníčková Z. Polymer life-time prediction: The role of temperature in UV accelerated ageing of polypropylene and its copolymers // *Polym. Test*. 2014. Vol. 36. P. 82–87.
13. Boxhammer J. Surface temperatures and temperature measurement techniques on the level of exposed samples during irradiational weathering in equipment // *Weather. Plast. Test. to Mirror Real Life Perform*. 1999. P. 105–119.
14. Schönlein A., Haillant O., Senff S. Surface temperatures of color painted samples in natural and artificial weathering with different laboratory light sources for optimized testing and investigations // *Weathering Symposium: Natural and Artificial*. 2009.
15. Burch D., Martin J. Predicting the temperature and relative humidity of polymer coatings in the field // *ACS Symp. Ser. Am. Chem. Soc.* 1999. P. 85–107.
16. Pickett J.E.E., Gibson D.A.A., Gardner M.M.M. Effects of irradiation conditions on the weathering of engineering thermoplastics // *Polym. Degrad. Stab.* 2008. Vol. 93. No. 8. P. 1597–1606.
17. Draper N.R., Smith H. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, 1998. 736 p.
18. Кондратьев К.Я. *Актинометрия*. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965. 693 с.
19. Старцев О.В. и др. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №7. С. 43–47.
20. Хромов С.П., Петросяниц М.А. *Метеорология и климатология*. М.: Наука, 2006. 582 с.
21. Калиткин Н.Н. *Численные методы*. М.: Наука, 1978. 512 с.
22. Тейлор Дж. *Введение в теорию ошибок*; пер. с англ. М.: Мир, 1985. 272 с.
23. Moore D.S., McCabe G.P., Craig B.A. *Introduction to the Practice of Statistics*. Sixth Edit. New York, 2009. 766 p.
24. Стенли Р. *Перечислительная комбинаторика*. М.: Мир, 1990. 440 с.
25. *Handbook of Linear Algebra*. Edited by Leslie Hogben. Chapman&Hall/CRC, Taylor&Francis Group, 2007. 1402 p.
26. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P. Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fibre reinforced epoxy laminates // *Polym. Polym. Compos.* 1998. Vol. 6. No. 7. P. 481–488.
27. Startsev O.V., Krotov A.S., Mashinskaya G.P. Climatic ageing of organic fiber reinforced plastics: water effect // *Int. J. Polym. Mater.* 1997. Vol. 37. No. 3–4. P. 161–171.
28. Afshar A. и др. Effect of long-term exposure to marine environments on the flexural properties of carbon fiber vinylester composites // *Compos. Struct.* 2015. Vol. 126. P. 72–77.
29. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. №3. С. 16–18.
30. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // *Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №12. Ст. 10 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.
31. Dan Z. et al. Applicability of Constant Dew Point Corrosion Tests for Evaluating Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloys // *Corros. Sci.* 2011. Vol. 53. P. 2006–2014.
32. Титарева А.С., Кириллов В.Н., Старцев О.В. Поведение материалов в элементах конструкций авиационной техники, изготовленных с применением ПКМ и систем ЛКП в условиях умеренно теплого климата // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 81–85.
33. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Медведев И.М., Фролов А.С. Коррозия и старение поверхности конструкционных материалов по данным 3D микроскопии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №12. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-12-12.
34. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №7. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-9-9.
35. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S1 (38). С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.