

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-149-160

КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ* Часть 5. Влияние продолжительности эрозионного воздействия

В.О. Старцев¹

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

Аннотация. Исследованы особенности изменения цветовых показателей модели CIE $L^*a^*b^*$ при воздействии песка и пыли на системы лакокрасочных покрытий в лабораторных условиях. Показано, что для различных систем лакокрасочных покрытий с добавлением пигментов красного и серого цвета зависимости изменения светлоты L и хроматических показателей a , b существенно различаются. Для всех исследованных систем количественно охарактеризован вклад показателей L , a , b в изменение цветового расстояния.

Ключевые слова: климатическое старение, лакокрасочное покрытие, цветовое расстояние, эрозия, математическое моделирование, прогнозирование

Для цитирования: Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 5. Влияние продолжительности эрозионного воздействия // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-149-160.

Scientific article

CLIMATIC AGING OF PAINT COATING SYSTEMS Part 5. Influence of duration of erosion effect

V.O. Startsev¹

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

Abstract. In the fifth part of the series of articles on the climatic aging of paint coating systems, the features of the change in the color indices of the CIE $L^*a^*b^*$ model under the influence of sand and dust in laboratory conditions are studied. It is shown that for different paint coating systems with the addition of red and gray pigments, the dependences of the change in lightness and chromatic indices differ significantly. For all the studied systems, the contribution of the L , a , b indices to the change in color distance is quantitatively characterized.

Keywords: climatic aging, paint coating, color distance, erosion, mathematical modeling, forecasting

For citation: Startsev V.O. Climatic aging of paint coating systems. Part 5. Influence of duration of erosion effect. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-149-160.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (148), 2025; часть 3 – см. «Труды ВИАМ», № 7 (149), 2025; часть 4 – см. «Труды ВИАМ», № 8 (150), 2025.

Введение

Лакокрасочные покрытия (ЛКП) авиационного назначения, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, способны длительное время сохранять свои декоративные показатели, защищать поверхность сплавов и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждений [1–3]. При эксплуатации ЛКП подвергаются деградации из-за воздействия таких факторов, как солнечное излучение, температура и термоциклы, влага, химически активные аэрозоли, абразивные частицы, что приводит к изменению механических и химических свойств. Эти изменения могут проявляться в виде растрескивания, обесцвечивания, охрупчивания и снижения адгезии. Понимание механизмов старения и разработка эффективных стратегий борьбы с ним имеют решающее значение для повышения прочности и срока службы авиационных полимерных покрытий.

Достоверные сведения о состоянии ЛКП в открытых климатических условиях получают с помощью колориметрических исследований, измеряя полное цветовое расстояние ΔE в равноконтрастной системе CIE $L^*a^*b^*$ по ГОСТ Р 71216–2024 [4]. Особенно эффективны исследования, в которых изучают изменения не только полного цветового различия, но и его составляющих: светлоты L и хроматических показателей a , b . Анализируя кинетику изменения этих показателей, можно получить заключения о влиянии химического состава полимерной основы, наличия стабилизаторов, пластификаторов, концентрации и природы пигментов на стойкость покрытий к старению [5].

Ценность современных авиационных ЛКП определяется не только способностью противостоять агрессивным климатическим факторам, но и абразивной (эрозивной) стойкостью. В обзорной статье [6] рассмотрены различные типы абразивных покрытий, механизмы их износа, рекомендации по повышению стойкости и методам контроля.

Авторы работы [7] изучили влияние эрозии под действием песчаных частиц на материал лопасти вертолета, защищенный полиуретановым покрытием. Сопротивление эрозии и механизм разрушения полиуретановой пленки при различных углах удара проанализированы с помощью инфракрасного термометра, инфракрасного спектрометра с преобразованием Фурье, дифференциального сканирующего калориметра, сканирующего электронного микроскопа с полевой эмиссией и лазерного конфокального микроскопа. Показано, что прямой метод измерения потери объема может лучше охарактеризовать сопротивление эрозии полиуретановой пленки по сравнению с традиционными методами определения потери массы, что позволяет избежать влияния частиц песка, вкрапленных в полиуретановую пленку. Сопротивление эрозии полиуретановой пленки снижается при уменьшении угла удара. Потеря объема в результате эрозии в течение 15 мин при скорости удара 220 м/с и угле удара 30 градусов составляет 57,8 мм³, а при 90 градусах не превышает 2,6 мм³. При малом угле удара повреждение пленки происходило из-за песчаной резки, вызывающей образование складок и накопление поверхностных дефектов, быстрое увеличение шероховатости и образование длинных трещин. При большом угле повреждения покрытия вызваны ударами частиц. При этом изменение шероховатости пленки не столь значительно, как при малом угле.

Эрозионный механизм разрушения ЛКП, заключающийся в растрескивании полимерной основы вследствие резания и ударов песка, учтен при модификации полиуретанового покрытия наночастицами лигнина [8]. Для этого приготовленные покрытия наносили на поверхности из древесины и подвергали искусственному выветриванию. Определяли цвет и блеск покрытий до и после испытания на выветривание. Микрофотографии покрытий, полученные с помощью полевой эмиссионной сканирующей

электронной микроскопии, показали, что средний размер наночастиц в полиуретановой подложке составлял ~500 нм. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса подтвердила, что в полиуретане на основе нанолигнина образовались прочные уретановые связи. Методом дифференциального калориметрического анализа установлено, что температура стеклования полиуретановой пленки, модифицированной диэтилентриамином, составила 113 °С, а при наличии частиц лигнина повысилась до 127 °С. Блеск покрытий, модифицированных наночастицами лигнина, изменялся в большей степени. Наночастицы лигнина в модифицированном покрытии захватывают гидроксильные радикалы, что снижает фотоактивность и пожелтение полиуретана в ~3 раза по сравнению с немодифицированными полиуретановыми покрытиями. После испытания на атмосферостойкость покрытие на основе нанолигнина имело более шероховатую поверхность.

В аналогичной работе [9] представлены результаты исследования кинетики эрозионного износа эпоксидно-полиуретановых покрытий, модифицированных наночастицами оксида алюминия или кремния, при экспонировании в климатических условиях в течение 3 лет. Разрушение поверхностных слоев покрытия вследствие естественного выветривания привело к снижению эрозионной износостойкости. Модификация состава полиуретанового (поверхностного) слоя нанонаполнителем обеспечила значительное повышение эрозионной стойкости. Эпоксидно-полиуретановые покрытия с поверхностным слоем, модифицированным нанокремнием, показали самую высокую эрозионную износостойкость по сравнению со всеми исследованными покрытиями.

Перспективы наномодифицирования авиационных ЛКП для повышения их стойкости к коррозии и старению рассмотрены в обзоре [10], сведения о полиуретановых покрытиях с повышенной износостойкостью приведены в работе [11].

Механизмы абразивной эрозии для полимеров, включая полиуретан, стирол-бутадиеновый каучук, полиамид-6 и политетрафторэтилен, исследованы в работе [12]. По результатам исследования истертых поверхностей образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии выявлен следующий механизм абразивной эрозии: микрорежущее действие абразивов с определенной кинетической энергией, микрорасслоение поверхностного слоя материалов в результате зарождения и распространения микротрещин, механохимическое и термическое разложение материалов, отслаивание поверхности в результате пластического разрушения, усиленного за счет локальной пластической деформации. Изучено влияние этих факторов на скорость износа при абразивной эрозии, представлены соответствующие уравнения.

В работе [13] изучены механизмы и стойкость эрозионного износа реальных автомобильных ЛКП до и после ускоренного выветривания. Стальные панели подложки с выбранными покрытиями подвергали деградации под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения и искусственного кислотного дождя. Химические изменения проанализированы с помощью инфракрасной спектроскопии. Затем проведены эрозионные испытания с использованием частиц кварцевого песка при различных углах падения (30 и 90 градусов) и температурах (25 и 60 °С) для исходных и экспонированных образцов. Скорость эрозии определяли путем оценки потери массы с использованием аналитических весов, механизмы износа подробно проанализированы с помощью интроскопии. Результаты показали снижение сопротивления эрозии, вызванное химическими изменениями в образцах, подвергшихся обоим видам воздействия.

По данным работы [14], в состав ЛКП, используемых для защиты от коррозии, включают различные типы пигментов как для эстетики, так и для повышения эксплуатационной стойкости. Авторы показали, что тип пигмента оказывает фундаментальное влияние как на локализованные, так и на глобальные процессы деградации в исследованных

покрытиях. Образцы с белым пигментом TiO_2 имели несущественную химическую деградацию, но значительное изменение поверхности. Микроскопия выявила, что вокруг частиц пигмента TiO_2 образуются кратеры размером несколько микрометров. Эта локальная эрозия не вызвана реакциями, наблюдаемыми в покрытиях с другими типами пигментов. Однако инфракрасная спектроскопия подтвердила, что пигмент TiO_2 также защищает материал под покрытием, что вызывает менее глубокую химическую деградацию по сравнению с другими системами. Более темные покрытия, содержащие технический углерод, продемонстрировали умеренную или сильную химическую деградацию по всей поверхности, кроме того, деградация распространилась глубоко в покрытие.

Можно ожидать, что абразивы существенно влияют на цветовые показатели ЛКП, вызывая изменение шероховатости поверхности, удаление материала и потенциально варьируя оптические свойства покрытия. Степень изменения цвета должна зависеть от свойств абразива (например, размера, твердости), состава и толщины полимерного покрытия, а также приложенной нагрузки и продолжительности воздействия.

Твердые частицы должны существенно влиять на цвет органических покрытий, воздействуя на процессы рассеивания и поглощения света, что является причиной изменения внешнего вида. Осколки частиц могут вызвать загрязнение, делая покрытие более темным или тусклым. Кроме того, химические реакции между частицами и покрытием могут привести к изменению цвета, например потемнению.

Когда ЛКП подвергаются воздействию песка, то вероятны следующие превращения:

- потеря блеска и прозрачности, возникновение шероховатости. Это может рассеивать свет, делая покрытие менее глянцевым, более мутным или белесым;
- загрязнение (частицы песка могут внедряться в поверхность ЛКП, потенциально внося загрязняющие вещества или влагу). Это может привести к обесцвечиванию или появлению пятен с течением времени, особенно если покрытие подвергается воздействию других веществ;
- химические реакции между ЛКП и песком (или веществами, переносимыми песком), вызывающие изменение цвета. Их протекание более вероятно, если песок нечистый или покрытие подвергается воздействию агрессивных химикатов;
- УФ-деградация (если ЛКП подвергается воздействию солнечного света после воздействия потока частиц, УФ-излучение может ускорить пожелтение, особенно в прозрачных покрытиях);
- общий износ (повторное воздействие абразивных материалов, таких как песок, может способствовать общей деградации ЛКП, привести к изменению цвета и другим повреждениям поверхности).

К сожалению, перечисленные эрозионные эффекты при климатических воздействиях изучены недостаточно [15–22]. В предыдущей части данной работы [23] установлено, что наибольшие изменения цветового расстояния фторполиуретанового и эпоксидного покрытий происходят после эрозионного воздействия. Поэтому целью пятой части комплексного исследования является углубленный количественный анализ влияния эрозии на кинетику изменения цветового расстояния ΔE и его составляющих (светлоты L и хроматических показателей a , b).

Материалы и методы

Для испытаний использовали четыре группы образцов из алюминиевого деформируемого сплава с нанесенными системами ЛКП, состоящими из двух грунтовых слоев холодной и горячей сушки, а также фторполиуретанового (ВЭ-69) и эпоксидного

(ЭП-140) покрытия с добавлением пигментов красного и серого цвета. Подробная информация об объектах испытаний приведена в предыдущей части статьи [24].

Для проведения лабораторных испытаний, имитирующих воздействие пыли, использовали камеру статической и динамической пыли. Исследование воздействия пыли проводили при скорости обдува образцов 15 м/с, температуре пылевоздушной смеси 30 °С, концентрации пыли в пылевоздушной смеси 5 г/м³. Пылевая смесь имела следующий состав, % (по массе): 70 – кварцевый песок, 15 – мел, 15 – каолин. Размер частиц не превышал 200 мкм (перед началом испытаний компоненты пылевой смеси просеивали через сито с соответствующим размером ячейки). Концентрацию пыли в рабочем объеме камеры контролировали каждые 2 ч путем фильтрации запыленного воздуха с последующим определением изменения массы фильтра. Образцы во время испытаний располагали вертикально, перпендикулярно потоку пылевоздушной смеси. Образцы размещали на сетчатой полке, обеспечивающей свободное прохождение потока запыленного воздуха через рабочий объем испытательной камеры. Продолжительность испытаний составила 56 ч.

При проведении испытаний на воздействие песка и пыли цветовые показатели измеряли каждые 4 ч после тщательного промывания поверхности образцов с помощью мягкой ткани.

С помощью спектрофотометра со сферической геометрией измерения определяли значения светлоты L и хроматических показателей a , b систем ЛКП на экспонируемых образцах, рассчитывали значение полного цветового различия (цветового расстояния) ΔE в системе CIE $L^*a^*b^*$ [25, 26] по соотношению [27]

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}, \quad (1)$$

где L , a , b – значения в процессе испытаний; L_0 , a_0 , b_0 – начальные значения.

Получено 15 экспериментальных значений.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 показано изменение показателей L , a , b для всех исследованных систем ЛКП. Отмечено, что изменение цветового расстояния после воздействия песка и пыли в данном исследовании на 11–16 % меньше, чем в предыдущем [23], что объясняется различными способами подготовки поверхности образцов перед проведением измерения с помощью спектрофотометра. В исследовании [23] образцы промывали перед проведением испытаний, в данной работе образцы после тщательной промывки дополнительно протирали мягкой тканью, чтобы удалить остатки песка и пыли с поверхности. Кроме того, наблюдается нелинейный характер изменения цветового расстояния: для системы на основе эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета экспериментальная зависимость аппроксимируется полиномом 3-й степени ($R^2 > 0,99$), для остальных исследованных систем – полиномом 2-й степени ($R^2 > 0,99$). Увеличение степени полинома не повышает значение коэффициента детерминации.

Изменение цветового расстояния системы ЛКП на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с пигментом красного цвета (рис. 1, II) составляет 15,78 усл. ед. Основной вклад вносят изменения хроматических показателей (97,7 %), при этом на долю показателя a (изменение цвета в диапазоне от зеленого до красного) приходится 75,5 %. Вклад

изменения светлоты в изменение цветового расстояния не превышает 2,3 %. Изменение светлоты L имеет линейный характер, а изменение показателей a, b – нелинейный (данные аппроксимируются полиномом 2-й степени ($R^2 > 0,99$)).

Для покрытия на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигмента серого цвета (рис. 1, IV) изменение цветового расстояния составляет 10,02 усл. ед. Однако характер изменения показателей L, a, b и их вклад в изменение цветового расстояния для систем с красным и серым пигментом существенно различаются.

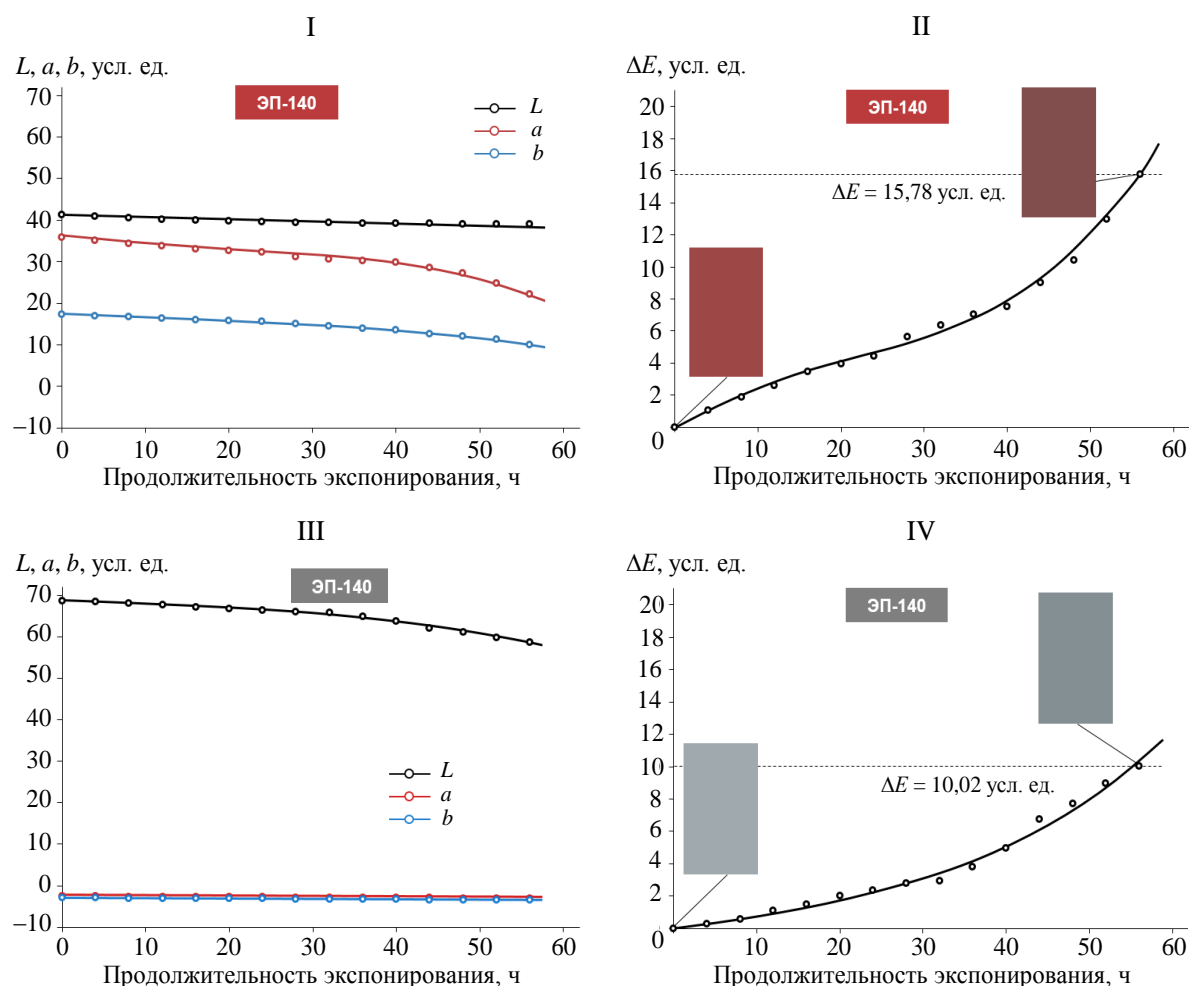


Рис. 1. Изменение светлоты L и хроматических показателей a, b (I, III), цветового расстояния ΔE и визуального отображения изменения цвета (II, IV) образцов с системой лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ЭП-140 с добавлением пигмента красного (I, II) и серого (III, IV) цвета при воздействии песка и пыли

Изменение хроматических показателей a, b линейно, не превышает 0,63 усл. ед., а их вклад в изменение цветового расстояния < 1 %. Основной вклад в изменение цветового расстояния вносит изменение светлоты L (99,3 %), которая изменяется нелинейно (аппроксимация полиномом 2-й степени ($R^2 > 0,99$)).

Для системы на основе эмали ВЭ-69 наблюдаются аналогичные различия при добавлении пигментов разных цветов. При добавлении пигмента красного цвета основной вклад в изменение ΔE вносят хроматические показатели a, b (94 %), а при добавлении пигмента серого цвета – светлота L (99,3 %).

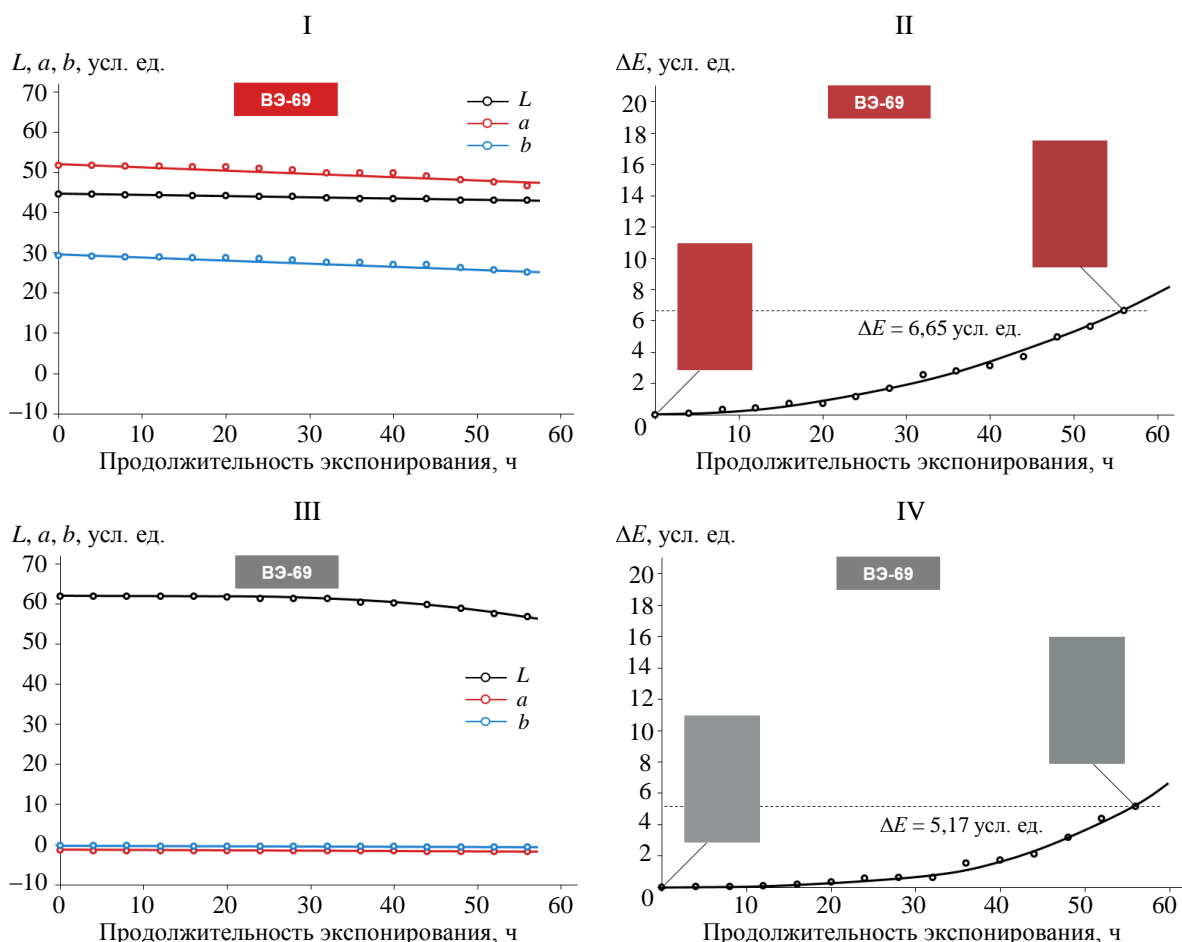


Рис. 2. Изменение светлоты L и хроматических показателей a, b (I, III), цветового расстояния ΔE и визуального отображения изменения цвета (II, IV) образцов с системой лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной эмали ВЭ-69 с добавлением пигмента красного (I, II) и серого (III, IV) цвета при воздействии песка и пыли

При добавлении красного пигмента изменение показателей L, a, b этой системы ЛКП носит линейный характер, а при добавлении серого пигмента – аналогично изменениям в системе на основе эмали ЭП-140: линейный характер изменения показателей a и b , нелинейный – показателя L . Значения показателей L, a, b и их вклад в изменение цветового расстояния для всех исследованных систем приведены в таблице.

Аналитические подходы, представленные в работах [28, 29], позволяют выявлять сущность физико-химических превращений и значимость факторов внешней среды в условиях различных климатических зон [30, 31]. Полученные в данной работе результаты демонстрируют чувствительность к эрозионному воздействию цветового расстояния ΔE и его составляющих: светлоты L и хроматических показателей a, b . Открывается перспектива количественного анализа влияния режимов эрозии, рецептуры покрытия, природы пигментов на разных этапах реальной работы ЛКП, защищающих элементы внешнего контура самолетов и вертолетов.

Очевидна также необходимость дальнейшего развития пробоотбора в практической колориметрии. Единообразная и обоснованная подготовка поверхности ЛКП может существенно снизить влияние влаги, загрязнений, проникших эрозионных частиц на результаты спектрофотометрических измерений и повысить достоверность полученных показателей.

Изменение светлоты L и хроматических показателей a, b исследованных систем при эрозионном воздействии

Показатель	Значение показателей для эмали			
	ЭП-140		ВЭ-69	
	красной	серой	красной	серой
L , усл. ед.	$\frac{41,36}{38,98}$	$\frac{68,71}{58,73}$	$\frac{44,59}{42,96}$	$\frac{61,92}{56,77}$
ΔL^* , усл. ед.	2,38	9,98	1,63	5,15
a , усл. ед.	$\frac{35,93}{22,22}$	$\frac{-2,57}{-3,16}$	$\frac{51,68}{46,67}$	$\frac{-1,49}{-1,78}$
Δa^* , усл. ед.	13,71	0,59	5,01	0,29
b , усл. ед.	$\frac{17,36}{9,92}$	$\frac{-2,91}{-3,54}$	$\frac{29,21}{25,15}$	$\frac{-0,31}{-0,66}$
Δb^* , усл. ед.	7,44	0,63	4,06	0,35
Цветовое расстояние ΔE , усл. ед.	15,78	10,02	6,65	5,17
Вклад в изменение ΔE^{**} , %, изменения показателя:				
L	2,3	99,3	6,0	99,3
a	75,5	0,3	56,7	0,3
b	22,2	0,4	37,3	0,4

* Абсолютное значение изменения показателя.

** Процентное отношение относительно суммы квадратов различий показателей L, a, b в соотношении (1).

Примечание. В числителе и знаменателе указаны значения показателей до и после эрозионного воздействия соответственно.

Например, при дальнейшем развитии методик исследований изменения цветовых показателей систем ЛКП дополнительно следует учитывать обнаруженный эффект «естественного старения», который заключается в следующем.

Перед началом исследований часть подготовленных образцов после измерения исходных параметров L, a, b плотно оборачивали непрозрачным упаковочным материалом и хранили в темном месте в нормальных условиях (температура 23 ± 2 °С, относительная влажность 50 ± 10 %). Через 36 мес. хранения измерены параметры L, a, b и рассчитано значение цветового расстояния. Выявлено, что при отсутствии прямых воздействий цветовое расстояние исследованных систем покрытий изменяется, причем вклад показателей L, a, b также различается для разных систем и пигментов (рис. 3).

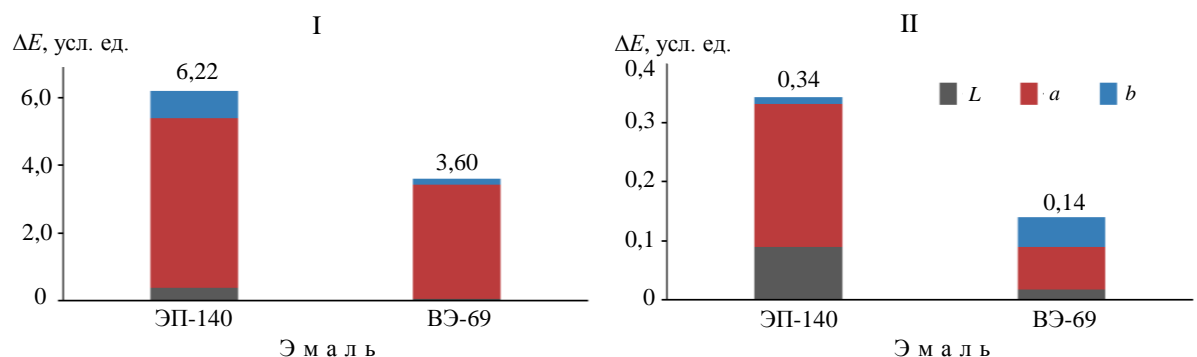


Рис. 3. Изменение цветового расстояния ΔE и вклад светлоты L , хроматических показателей a, b для систем лакокрасочных покрытий на основе эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 с добавлением пигмента красного (I) и серого (II) цвета

Видно, что для систем покрытий с добавлением пигмента красного цвета эффект «естественного старения» существенный – значения цветового расстояния составляют 6,22 и 3,60 усл. ед. для систем покрытий на основе эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 соответственно. Изменения цвета этих систем наблюдаются невооруженным глазом. При добавлении пигмента серого цвета изменения цветового расстояния незначительны: 0,34 и 0,14 усл. ед. для систем на основе эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 соответственно. Важно отметить, что основной вклад в изменение цветового расстояния (при нормировании на сумму квадратов различий в выражении (1)) при «естественном старении» вносит изменение хроматических показателей a , b : 94–98 и 75–87 % для систем покрытий с пигментом красного и серого цвета соответственно.

Заключения

Полученные результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

При эрозионном воздействии на образцы с системами ЛКП изменение показателей L , a , b неравнозначно и может иметь линейный или нелинейный характер в зависимости от типа эмали и цвета пигмента.

Для систем ЛКП с пигментом красного цвета основной вклад в изменение цветового расстояния вносит изменение хроматических показателей a , b (94,0–97,7 %), а для систем с пигментом серого цвета – изменение светлоты L (99,3 %).

Обнаруженный эффект «естественного старения» необходимо учитывать при разработке программ исследования климатического старения систем ЛКП.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
2. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
3. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
4. Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Двирная Е.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 2. Состояние защитных лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.
5. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2015. № 3. С. 16–18.
6. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review // Lubricants. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 66–89.
7. Zheng L., Fan J., Gong Q. et al. Sand Erosion Resistance and Failure Mechanism of Polyurethane Film on Helicopter Rotor Blades // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 22. P. 4386.
8. Khorshidi F.H., Najafi S.K., Najafi F. et al. Color and Gloss Changes of a Lignin-Based Polyurethane Coating under Accelerated Weathering // Journal of Renewable Materials. 2023. Vol. 12. No. 2. P. 1–10.
9. Kotnarowska D., Przerwa M., Szumiata T. Resistance to Erosive Wear of Epoxy-Polyurethane Coating Modified With Nanofillers // Journal of Materials Science Research. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 52–58.

10. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36. No. 4. P. 1–35.
11. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Кодаченко Е.Н., Железняк В.Г. Исследование влияния химической природы грунтовочного слоя на свойства системы покрытий на основе фторполиуретановой эмали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 09. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Zhang S.W., Deguo W., Weihua Y. Investigation of abrasive erosion of polymers // Journal of Materials Science. 1995. Vol. 30. No. 18. P. 4561–4566.
13. Hernández-Peña A., Gallardo-Hernández E.A., Farfan-Cabrera L.I. et al. Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering // Wear. 2023. Vol. 532–533. Art. 205105.
14. Wärmheim A., Saarimaa V., Heydari G. et al. Multiscale analysis of pigment effects on weathering of polyester coatings: from nanoscale chemistry to macroscale performance // Materials Degradation. 2025. Vol. 9. No. 1. Art. 66.
15. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
16. Cai G., Zhang D., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part II: Molecular structures and depth profile // Progress in Organic Coatings. 2018. Vol. 124. P. 25–32.
17. Molina M.T., Cano E., Ramírez-Barat B. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method // Heritage Science. 2023. Vol. 11. No. 1. Art. 94.
18. Chen J., Li B., Zeng X. et al. Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-Pollution Flashover Coating // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 3. Art. 751.
19. Pánek M., Reinprecht L. Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest // Journal of Coatings Technology and Research. 2019. Vol. 16. No. 2. P. 339–352.
20. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
21. Dao P.H., Nguyen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment // Vietnam Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 56. No. 3B. Art. 126.
22. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 4. Art. 476.
23. Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 4. Аддитивность воздействия климатических факторов // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 13. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-8-152-162.
24. Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 3. Сопоставление результатов натуральных и ускоренных испытаний с учетом эффекта сезонности // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-7-105-118.
25. Fairchild M.D. Color Appearance Models. Wiley, 2013. 480 p.
26. Schanda J. Colorimetry: Understanding the CIE System. Wiley, 2007. 398 p.
27. Ibraheem N.A., Hasan M.M., Khan R.Z., Mishra P.K. Understanding Color Models : A Review // ARPN Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 265–275.
28. Исупов В.В., Старцев О.В. Численные методы в динамической механической спектроскопии полимеров // Тез. докл. Междунар. конф. «Математические модели и численные методы механики сплошных сред», посвященной 75-летию выдающегося математика и механика, организатора науки, академика Николая Николаевича Яненко / под ред. Ю.И. Шокина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. С. 293–294.

29. Старцев О.В., Перепечко И.И. Молекулярная подвижность и релаксационные процессы в эпоксидной матрице композита. 1. Влияние типа армирующего наполнителя // *Механика композитных материалов*. 1984. № 3. С. 387–391.
30. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // *Тр. VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013*. Якутск, 2013. С. 5–7.
31. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // *Известия Алтайского государственного университета*. 2020. № 1 (111). С. 41–51.

References

1. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex systems of paint and varnish coatings for the protection of metal polymer composite materials, as well as their contact joints from the effects of aggressive factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2016 no. 6, pp. 32–35.
2. Nefedov N.I., Semenova L.V., Kuznecova V.A., Vereninova N.P. Paint coatings for protection of metallic and polymer composite materials against aging, corrosion and biodeterioration. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-393-404.
3. Zheleznyak V.G. Modern paint and varnish materials for use in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. (accessed: 08.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
4. Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Dvirnaya E.V., Veligodsky I.M. Investigation of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in moderately warm climate. Part 2. Condition of protective paint and varnish coatings. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 08, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.
5. Startsev V.O., Frolov A.S. Influence of climatic influence on color characteristics of paint and varnish coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
6. Wu L., Guo X., Zhang J. Abrasive Resistant Coatings – A Review. *Lubricants*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 66–89.
7. Zheng L., Fan J., Gong Q. et al. Sand Erosion Resistance and Failure Mechanism of Polyurethane Film on Helicopter Rotor Blades. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 22, p. 4386.
8. Khorshidi F.H., Najafi S.K., Najafi F. et al. Color and Gloss Changes of a Lignin-Based Polyurethane Coating under Accelerated Weathering. *Journal of Renewable Materials*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 1–10.
9. Kotnarowska D., Przerwa M., Szumiata T. Resistance to Erosive Wear of Epoxy-Polyurethane Coating Modified With Nanofillers. *Journal of Materials Science Research*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 52–58.
10. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 1–35.
11. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Kodachenko E.N., Zheleznyak V.G. Study of the influence of the primer layer's chemical nature on the properties of the coating system based on fluoropolyurethane enamel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Zhang S.W., Deguo W., Weihua Y. Investigation of abrasive erosion of polymers. *Journal of Materials Science*, 1995, vol. 30, no. 18, pp. 4561–4566.
13. Hernández-Peña A., Gallardo-Hernández E.A., Farfan-Cabrera L.I. et al. Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering. *Wear*, 2023, vol. 532–533, art. 205105.
14. Wärmheim A., Saarimaa V., Heydari G. et al. Multiscale analysis of pigment effects on weathering of polyester coatings: from nanoscale chemistry to macroscale performance. *Materials Degradation*, 2025, vol. 9, no. 1, art. 66.

15. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
16. Cai G., Zhang D., Jiang D., Dong Z. Degradation of fluorinated polyurethane coating under UVA and salt spray. Part II: Molecular structures and depth profile. *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 124, pp. 25–32.
17. Molina M.T., Cano E., Ramírez-Barat B. Testing protective coatings for metal conservation: the influence of the application method. *Heritage Science*, 2023, vol. 11, no. 1, art. 94.
18. Chen J., Li B., Zeng X. et al. Study on the Influence of Accelerated Aging on the Properties of an RTV Anti-Pollution Flashover Coating. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 3, art. 751.
19. Pánek M., Reinprecht L. Critical view on the possibility of color changes prediction in the surfaces of painted wood exposed outdoors using accelerated weathering in Xenotest. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 339–352.
20. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
21. Dao P.H., Nguyen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 56, no. 3B, art. 126.
22. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 476.
23. Startsev V.O. Climatic aging of paint coating systems. Part 4. Additivity of the impact of climate factors. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 13. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-8-152-162.
24. Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 3. Comparison of results of natural and accelerated climatic tests taking into account the effect of seasonality. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-7-105-118.
25. Fairchild M.D. *Color Appearance Models*. Wiley, 2013, 480 p.
26. Schanda J. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007, 398 p.
27. Ibraheem N.A., Hasan M.M., Khan R.Z., Mishra P.K. Understanding Color Models : A Review. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 265–275.
28. Isupov V.V., Startsev O.V. Numerical methods in dynamic mechanical spectroscopy of polymers. Abstract of reports. *Int. Conf. «Mathematical models and numerical methods of continuous media mechanics» dedicated to the 75th anniversary of the outstanding mathematician and mechanic, organizer of science, academician Nikolai Nikolaevich Yanenko*. Ed. Yu.I. Shokin. Novosibirsk: Publ. house of the SB of RAS, 1996, pp. 293–294.
29. Startsev O.V., Perepechko I.I. Molecular mobility and relaxation processes in the epoxy matrix of the composite. 1. Effect of the type of reinforcing filler. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1984, no. 3, pp. 387–391.
30. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic tests of materials, structural elements, machinery and equipment in conditions of extremely low temperatures. *Proc. of the VI Eurasian Symposium on the Problems of Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD–2013*. Yakutsk, 2013, pp. 5–7.
31. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composite materials in conditions of extremely cold climate. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (111), pp. 41–51.

Информация об авторах

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.08.2025.
The article was submitted 24.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.08.2025.