

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_155

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ

PREDICTION OF DEFECTS IN THE OPERATED POLYMER COATING

Канд. техн. наук А.Ю. Андриюшкин, Чжао Чэн, Чжэньнин Ли

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, Zhao Cheng, Zhenning Li

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Полимерное покрытие выполняет различные функции и обуславливает надежность и живучесть техники специального назначения. Эксплуатируемое полимерное покрытие техники специального назначения постепенно деградирует и разрушается. Деградирующее полимерное покрытие снижает надежность и живучесть техники специального назначения, поэтому актуально прогнозирование его дефектности (степени деградации). Выделены влияющие на рост дефектности эксплуатируемого полимерного покрытия факторы. Методом анализа размерностей получено критериальное уравнение для прогнозирования дефектности (степени деградации) полимерного покрытия от времени его эксплуатации. Проведен сравнительный расчет прогнозируемой дефектности полимерного покрытия по полученному критериальному уравнению и известному эмпирическому выражению, показавший близкие результаты.

Ключевые слова: полимерное покрытие, прогнозирование, дефектность, деградация, критериальное уравнение.

The polymer coating performs various functions and ensures the reliability and survivability of special-purpose equipment. The used polymer coating of special-purpose equipment is gradually degraded and destroyed. A degrading polymer coating reduces the reliability and survivability of special-purpose equipment, therefore it is important to predict its defects (degree of degradation). The factors influencing the growth of defects in the exploited polymer coating are highlighted. By the method of dimensional analysis, a criterion equation was obtained for predicting the defect (degree of degradation) of a polymer coating from the time of its operation. A comparative calculation of the predicted defects of the polymer coating was carried out according to the obtained criterion equation and the well-known empirical expression, which showed similar results.

Keywords: polymer coating, forecasting, defect, degradation, criterion equation.

Полимерные покрытия техники специального назначения выполняют различные функции, например маскировка, защита от химического воздействия или агрессивного воздействия окружающей среды и пр. Эксплуатируемые полимерные покрытия постепенно разрушаются и через некоторое время приходят в неработо-

способное состояние, что снижает надежность и живучесть техники специального назначения. Деградация полимерного покрытия выражается в изменении его состава и структуры. С течением времени наблюдается увеличение концентрации одних компонентов в составе полимерного покрытия и уменьшение других. В структуре

полимерного покрытия появляются и развиваются дефекты (поры, трещины, расслоения), растет его дефектность. Эти деструктивные процессы ухудшают показатели качества полимерного покрытия: прочность, изоляционную способность, химическую стойкость и пр. Поэтому актуально прогнозирование дефектности эксплуатируемого полимерного покрытия [1–13].

Целью исследования является нахождение методом анализа размерностей критериального уравнения для прогнозирования дефектности (степени деградации) эксплуатируемого полимерного покрытия.

Задачами исследования являются:

1. Анализ параметров, влияющих на изменение дефектности полимерного покрытия во время эксплуатации;
2. Установление методом анализа размерностей критериального уравнения для прогнозирования дефектности (степени деградации) эксплуатируемого полимерного покрытия;
3. Сравнительный расчет прогнозируемой дефектности полимерного покрытия по установленному критериальному уравнению и по известной эмпирической зависимости.

Установление критериального уравнения для прогнозирования дефектности (степени деградации) эксплуатируемого полимерного покрытия

Степень деградации показывает, насколько увеличилась дефектность полимерного покрытия, и может ли она быть определена как отношение разности текущей и начальной (производственной) дефектности к начальной дефектности. Выделим основные параметры, обуславливающие возникновение и рост дефектов полимерного покрытия: действующие напряжения σ_d ; время эксплуатации τ_3 ; температура эксплуатации T_3 ; теплостойкость $T_{ст}$; толщина H_n ; плотность ρ_n . Следовательно, степень деградации является функцией этих параметров [14, 15]:

$$D = \frac{g_t(\tau_3) - g_n}{g_n} = f(\sigma_d; \tau_3; T_3; T_{ст}; H_n; \rho_n), \quad (1)$$

где D — степень деградации полимерного покрытия;

g_t — текущая дефектность полимерного покрытия;

g_n — начальная дефектность полимерного покрытия;

σ_d — действующие напряжения в полимерном покрытии, Па;

τ_3 — время эксплуатации полимерного покрытия, с;

T_3 — температура эксплуатации полимерного покрытия, К;

$T_{ст}$ — теплостойкость полимерного покрытия, К;

H_n — толщина полимерного покрытия, м;

ρ_n — плотность полимерного покрытия, кг/м³.

Для получения зависимости (1) в виде критериального уравнения воспользуемся методом анализа размерностей (методом Рэлея) [14, 15]:

$$D = \frac{g_t(\tau_3) - g_n}{g_n} = C \cdot \left(\frac{T_3}{T_{ст}} \right)^a \cdot \sigma_d^{x_1} \cdot \tau_3^{x_2} \cdot H_n^{x_3} \cdot \rho_n^{x_4}, \quad (2)$$

где $\frac{T_3}{T_{ст}}$ — безразмерный симплекс;

a, x_1, x_2, x_3, x_4 — безразмерные показатели степеней;

C — безразмерный коэффициент.

Размерности представленных в выражении (2) величин в системе СИ следующие:

$$[\sigma_d] = \text{Па} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}; \quad [\tau_3] = \text{с}; \quad [T_3] = \text{К};$$

$$[T_{ст}] = \text{К}; \quad [H_n] = \text{м}; \quad [\rho_n] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (3)$$

Подставим размерности (3) в выражение (2):

$$D = \frac{g_t(\tau_3) - g_n}{g_n} = C \cdot \left(\frac{\text{К}}{\text{К}} \right)^a \cdot \left(\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^{x_1} \cdot (\text{с})^{x_2} \cdot (\text{м})^{x_3} \cdot \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)^{x_4}.$$

Суммируя показатели степеней при одинаковых единицах измерений, получим систему из трех уравнений:

$$\begin{aligned} [\text{кг}]: 0 &= x_1 + x_4; \\ [\text{м}]: 0 &= -x_1 + x_3 - 3 \cdot x_4; \\ [\text{с}]: 0 &= -2 \cdot x_1 + x_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Решение системы алгебраических уравнений (4) дает следующие зависимости для показателей степеней:

$$x_2 = 2 \cdot x_1; x_3 = -2 \cdot x_1; x_4 = -x_1. \quad (5)$$

Подставляя полученные зависимости (5) в выражение (2), получим критериальное уравнение:

$$D = \frac{g_t(\tau_3) - g_n}{g_n} = C \cdot \left(\frac{T_3}{T_{ст}} \right)^a \cdot \left(\frac{\sigma_d \cdot \tau_3^2}{H_n^2 \cdot \rho_n} \right)^{x_1}. \quad (6)$$

Из выражения (6) определим текущую дефектность полимерного покрытия:

$$g_t(\tau_3) = g_n + g_n \cdot C \cdot \left(\frac{T_3}{T_{ст}} \right)^a \cdot \left(\frac{\sigma_d \cdot \tau_3^2}{H_n^2 \cdot \rho_n} \right)^{x_1} \leq [g], \quad (7)$$

где $[g]$ — допустимая дефектность полимерного покрытия.

Значения коэффициента C и показателей степеней a и x_1 в выражении (7) определяют экспериментально.

Прогнозирование дефектности эксплуатируемого полимерного покрытия

Для определения значений коэффициента C и показателей степеней a и x_1 в выражении (7) можно рассчитать текущую дефектность полимерного покрытия по известным эмпирическим выражениям зависимости текущей дефектности эксплуатируемого полимерного покрытия от времени. Например, известно эмпирическое выражение для прогнозирования дефектности полимерного покрытия от времени эксплуатации, учитывающее начальную дефектность, агрессивность окружающей среды и срок службы, заявленный изготовителем [16–17]:

$$g_t(\tau_3) = (g_n)^{(1-(\tau_3/[\tau_3])K_{ар}} \leq [g], \quad (8)$$

где $K_{ар}$ — константа, характеризующая агрессивность окружающей среды ($K_{ар} > 0$);

$[\tau_3]$ — назначенный изготовителем срок службы полимерного покрытия, сутки.

Дадим прогноз увеличения дефектности полимерного покрытия по выражению (7) и (8) при следующих исходных данных:

- начальная дефектность $g_n = 0,02$;
- назначенный изготовителем срок службы $[\tau_3] = 700$ суток;
- константа, характеризующая агрессивность окружающей среды $K_{ар} = 5,0$;
- время эксплуатации $\tau_3 = 0 \div 500$ суток;
- температура эксплуатации полимерного покрытия $T_3 = 323$ K;
- теплостойкость полимерного покрытия $T_{ст} = 383$ K;
- действующие напряжения в полимерном покрытии $\sigma_d = 1,0$ МПа;
- толщина полимерного покрытия $H_n = 4,0$ мм;
- плотность полимерного покрытия $\rho_n = 1900,0$ кг/м³;
- безразмерный коэффициент $C = 1 \cdot 10^{-8}$;
- безразмерные показатели степеней $a = 0,0662$; $x_1 = 0,4253$.

Расчет по выражениям (7) и (8) показывает, что зависимости текущей дефектности полимерного покрытия от времени эксплуатации весьма близки (рисунок). Если принять допустимую дефектность полимерного покрытия $[g] = 20$ %, то в заданных условиях текущая дефектность достигнет допустимого значения через 90...110 суток, при этом степень деградации составит $D = 9,0$. При превышении текущей дефектности допустимого значения $g_t > [g]$ полимерное покрытие неработоспособно.

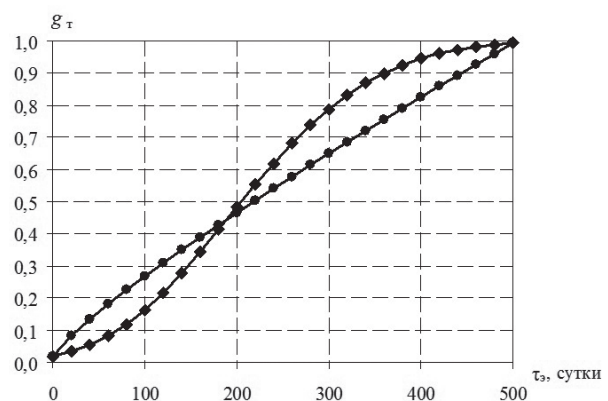


Рис. Зависимость текущей дефектности полимерного покрытия g_t от времени эксплуатации τ_3 :

- по выражению (7);
- ◆— по выражению (8)

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Установлены параметры, влияющие на увеличение дефектности полимерного покрытия техники специального назначения во время эксплуатации.

Методом анализа размерностей получено критериальное уравнение для прогнозирования дефектности (степени деградации) эксплуатируемого полимерного покрытия.

Проведен сравнительный расчет прогнозируемой дефектности полимерного покрытия по установленному критериальному уравнению и по известной эмпирической зависимости, показавший сходство результатов.

Список источников

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. СПб.: Наука, 2014. 412 с.

2. Рогов В.Р., Анисимов В.Р., Исаченко Е.А. Направление развития технологий для повышения антикоррозионной устойчивости автотранспортных средств // Грузовик. 2019. № 8. С. 16–18.

3. Сергеевичев А.В., Онегин В.И. Физико-химические основы процессов формирования полимерных покрытий на твердой поверхности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. СПб.: СПбГЛТУ. С. 213–227.

4. Королев В.П. Требования качества, надежности и безопасности для управления коррозионной защищенностью металлоконструкций и сооружений // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. Т. 4, № 3. С. 24–32.

5. Новоселова И.В., Патютко А.П. Обобщенная оценка свойств лакокрасочного покрытия // Лесотехнический журнал. 2013. № 3 (11). С. 99–103.

6. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартирозов М.И., Рабинский Л.Н. Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники // Электронный журнал «Труды МАИ», 2010. № 40. 10 с.

7. Кравцов В.В. Защита от коррозии внутренней поверхности стальных резервуаров: учеб. пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. 111 с.

8. Лапшин В.Ф., Буткин М.Г. Прогнозирование долговечности противокоррозионных покрытий // Железнодорожный транспорт. 2003. № 1. С. 48–49.

9. Суходоля А.В., Одинокоева И.В., Птицын Д.А. Прогнозирование долговечности лакокрасочных покрытий при эксплуатации транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2015. № 3. С. 35–37.

10. Потапчик А.Н., Егорова А.Л. Разработка метода прогнозирования долговечности антикоррозионных лакокрасочных покрытий // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 175–186.

11. Кравцов В.В., Макаренко О.А., Ибрагимов И.Г. Количественная оценка срока службы лакокрасочных покрытий на внутренних поверхностях стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7, № 2. С. 112–114.

12. Кравцов В.В., Сырлыбаев Х.Р., Шингаркина О.В., Алексеева Н.А. Оценка остаточной защитной способности лакокрасочных покрытий на внутренней поверхности стальных резервуаров // Территория Нефтегаз. 2012. № 3. С. 36–39.

13. Петров А.А., Садиев У.В. Прогнозирование долговечности конструкций ГТС с антикоррозионным и герметизирующим покрытием // Гидротехника. 2019. № 3 (56). С. 76–77.

14. Архипов В.А., Коноваленко А.И. Практикум по теории подобия и анализу размерностей: учеб.-метод. пособие. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2016. 93 с.

15. Крамаренко Н.В. Методы подобия в механике. Анализ размерностей: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2020. 212 с.

16. Андрияшкин А.Ю., Буцкин Е.Б., Кадочникова Е.Н. Прогнозирование срока службы антикоррозионных покрытий металлических конструкций объектов переработки, хранения и транспортировки углеводородов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 79–88.

17. Андрияшкин А.Ю., Кадочникова Е.Н., Пенев М.В. Прогнозирование сплошности маскировочных лакокрасочных покрытий вооружения и военной техники // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. 2024. № 4 (34). С. 135–144.

References

1. Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality management of industrial products. St. Petersburg: Nauka, 2014. 412 p.
2. Rogov V.R., Anisimov V.R., Isachenko E.A. The direction of technology development for increasing the anti-corrosion resistance of motor vehicles // *Truck*. 2019. № 8. Pp. 16–18.
3. Sergeevichev A.V., Onegin V.I. Physico-chemical foundations of the formation of polymer coatings on a solid surface // *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2018. Issue 223. Pp. 213–227.
4. Korolev V.P. Quality, reliability and safety requirements for corrosion protection management of metal structures and structures // *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*. 2018. Vol. 4. № 3. Pp. 24–32.
5. Novoselova I.V., Patyutko A.P. Generalized assessment of paint and varnish coating properties // *Forestry engineering magazine*. 2013. № 3 (11). Pp. 99–103.
6. Gavrilov D.G., Mamonov S.V., Martirosov M.I., Rabinsky L.N. Comparative characteristics of strength properties of samples with various types of coatings for aircraft products // *Electronic journal «Proceedings of MAI»*, 2010. № 40. 10 p.
7. Kravtsov V.V. Corrosion protection of the inner surface of steel tanks: A textbook. Ufa: Publishing house of USNTU, 2003. 111 p.
8. Lapshin V.F., Butkin M.G. Forecasting the durability of anticorrosive coatings // *Railway transport*. 2003. № 1. Pp. 48–49.
9. Sukhodolya A.V., Odinkova I.V., Ptit-syn D.A. Forecasting the durability of paint coatings during the operation of transport vehicles // *Construction and road vehicles*. 2015. № 3. Pp. 35–37.
10. Potapchik A.N., Egorova A.L. Development of a method for predicting the durability of anticorrosive paint coatings // *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology*. 2021. № 2 (247). Pp. 175–186.
11. Kravtsov V.V., Makarenko O.A., Ibragimov I.G. Quantitative assessment of the service life of paint coatings on the inner surfaces of steel tanks // *Oil and gas business*. 2009. Vol. 7. № 2. Pp. 112–114.
12. Kravtsov V.V., Syrlybaev H.R., Shingarkina O.V., Alekseeva N.A. Assessment of the residual protective ability of paint and varnish coatings on the inner surface of steel tanks // *The territory of Neftegaz*. 2012. № 3. Pp. 36–39.
13. Petrov A.A., Sadiev U.V. Forecasting the durability of GTS structures with anticorrosive and sealing coating // *Hydraulic Engineering*. 2019. № 3 (56). Pp. 76–77.
14. Arkhipov V.A., Konovalenko A.I. Practicum on similarity theory and dimensional analysis. Educational and methodical manual. Tomsk: Tomsk State University Press. 2016. 93 p.
15. Kramarenko N.V. Methods of similarity in mechanics. Dimensional analysis: a textbook. Novosibirsk: NSTU Publishing House. 2020. 212 p.
16. Andryushkin A.Yu., Bukikin E.B., Kadochnikova E.N. Forecasting the service life of anti-corrosive coatings of metal structures of objects of processing, storage and transportation of hydrocarbons // *Problems of risk management in the technosphere*. 2023. № 3 (67). Pp. 79–88.
17. Andryushkin A.Yu., Kadochnikova E.N., Penev M.V. Forecasting the continuity of masking paints and varnishes // *Scientific problems of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation*. 2024. № 4 (34). Pp. 135–144.