

Строительные материалы и изделия Building materials and products

Научная статья
УДК 691
DOI: 10.14529/build230203

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ЕГО РАСТРЕСКИВАНИЯ

В.И. Логанина, *loganin@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
Пенза, Россия*

Аннотация. В работе исследуется вероятность разрушения поливинилацетатцементных покрытий в зависимости от их толщины и прочности сцепления с цементной подложкой. Приведены сведения о закономерностях изменения когезионной прочности лакокрасочных покрытий в зависимости от их толщины. Предложена модель изменения когезионной прочности покрытия от толщины. Рассмотрен процесс растрескивания покрытий с позиции статистической оценки вероятности разрушения. Предложена графическая модель вероятности когезионного разрушения в зависимости от толщины и прочности сцепления покрытий.

Ключевые слова: покрытие, растрескивание, вероятность, статистический анализ

Для цитирования. Логанина В.И. Влияние толщины лакокрасочного покрытия на вероятность его растрескивания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 2. С. 25–30. DOI: 10.14529/build230203

Original article
DOI: 10.14529/build230203

INFLUENCE OF PAINT COATING THICKNESS ON THE PROBABILITY OF CRACKING

V.I. Loganina, *loganin@mail.ru*

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

Abstract. The paper investigates the probability of cracking for polyvinyl acetate-cement coatings depending on their thickness and strength of adhesion to the cement substrate. Data on changes in the cohesive strength of paint coatings depending on their thickness is provided. A model is proposed for changing the cohesive strength of the coating depending on the thickness. A statistical assessment of the probability of destruction is conducted to examine cracking. A graphical model of the probability of cohesive failure depending on the thickness and adhesion strength of coatings is proposed.

Keywords: coating, cracking, probability, statistical analysis

For citation. Loganina V.I. Influence of paint coating thickness on the probability of cracking. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2023;23(2):25–30. (in Russ.). DOI: 10.14529/build230203

Введение

Одним из распространенных видов отделки фасадов зданий является окраска лакокрасочными материалами [1–3]. В процессе эксплуатации в результате воздействия внешней среды происходит разрушение покрытия. В работах [1–3] для анализа причин разрушения лакокрасочных покрытий фасадов зданий использовалась диаграмма Парето, т. е. выделились в первую очередь приоритетные факторы, которые попадают в 80 % куммулятивной кривой. Авторами установлено, что список видов разрушений покрытий, составляющих 80 % куммулятивной кривой, состоит в основном из растрескивания и отслаивания покрытий [4], однако нередко наблюдается одновременно три типа разрушения: когезионный (растрескивание), адгезионный (отслаивание) и смешанный [5–10].

Условия адгезионного и когезионного разрушений имеют вид:

– адгезионное разрушение:

$$R_a < R_k; \quad (1)$$

– когезионное разрушение:

$$R_k < R_a, \quad (2)$$

где R_a и R_k – адгезионная и когезионная прочность покрытий.

Зависимость вероятности отслаивания P_a от наблюдаемого значения когезионной прочности R_k и зависимость вероятности растрескивания P_k от наблюдаемого значения адгезионной прочности R_a имеет вид:

$$P_a(R_k) = \int_{-\infty}^{R_k} f(R_a) dR_a, \quad (3)$$

$$P_k(R_a) = \int_{-\infty}^{R_a} f(R_k) dR_k. \quad (4)$$

Значения когезионной и адгезионной прочности лакокрасочных покрытий на цементных основаниях зависят от большого числа факторов (шероховатость и пористость подложки, технологические факторы и т. д.), совокупность которых определяет вероятности того или иного типа разрушения [11].

Рассмотрим процесс разрушения покрытия с учётом соотношения его адгезионной и когезионной прочности, а также изменчивости его толщины [12–16].

Материалы и методы исследования

В работе применяли поливинилацетатцементную ПВАЦ краску. Предел прочности при растяжении (когезионную прочность) определяли в соответствии с ГОСТ 18299-72* на разрывной машине ИР 5057-50. Для оценки адгезионной прочности применяли метод отрыва штампа (нормальный отрыв) по ГОСТ 32299-2013. Оценку состояния покрытия проводили в соответствии с ГОСТ Р 9.414-2012. Толщину покрытия измеряли микрометром МКЦ-75.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим вероятность когезионного разрушения поливинилацетатцементного (ПВАЦ) покрытия, сформированного на цементной подложке. В табл. 1 приведены значения адгезионной и когезионной прочности ПВАЦ покрытия.

Таблица 1
Значения адгезионной и когезионной прочности ПВАЦ покрытия

№ п/п	R_k , МПа	R_a , МПа
1	1,4	1,0
2	1,7	1,3
3	1,8	1,4
4	1,8	1,4
5	1,9	1,5
6	1,9	1,5
7	2,0	1,6
8	2,0	1,6
9	2,0	1,7
10	2,1	1,7
11	2,1	1,7
12	2,2	1,8
13	2,2	1,8
14	2,2	1,8
15	2,3	1,8
16	2,3	1,9
17	2,3	1,9
18	2,5	2,1
19	2,5	2,1
20	2,8	2,4

Зависимость вероятности когезионного $P_k(R_a)$ разрушения покрытий приведена на рис. 1.

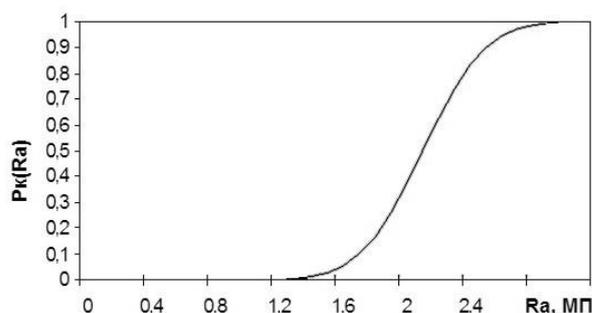


Рис. 1. Вероятность когезионного $P_k(R_a)$ разрушения ПВАЦ покрытия

Анализ полученных данных свидетельствует, что при значении адгезионной прочности до 1,3 МПа вероятность растрескивания ПВАЦ покрытия исключается. При значении прочности сцепления составляющей 2,1 МПа, вероятность растрескивания составляет 50 %. Таким образом, при достаточной прочности сцепления покрытия необходимо проведение исследований, направленных на повышение когезионной прочности.

На рис. 2 приведены результаты расчета вероятности растрескивания ПВАЦ покрытия в зави-

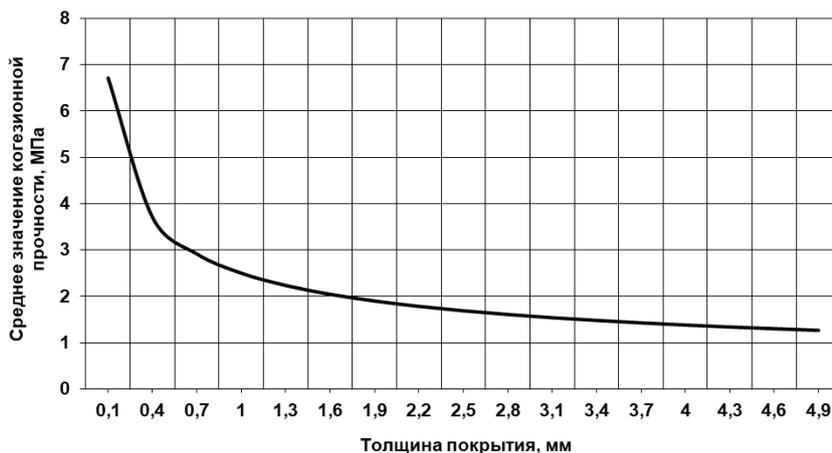


Рис. 2. Зависимость когезионной прочности ПВАЦ покрытий от их толщины

симости от его толщины. Обработка экспериментальных данных (рис. 2) показывает, что зависимость описывается уравнением Вейбулла:

$$\bar{R}_k = K \cdot h^{\frac{1}{n}}, \tag{7}$$

где h – толщина покрытия; K, n – коэффициенты.

После обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов зависимость (7) имеет вид

$$\bar{R}_k = 2,5 \cdot h^{\frac{1}{2,33}}. \tag{8}$$

Получена зависимость среднеквадратического отклонения величины R_k от толщины покрытия $\sigma_{R_k}(h)$, которая имеет вид:

$$\sigma_{R_k} = 0,4 - 0,15 \cdot e^{-h^{-1,8}}. \tag{9}$$

Величина когезионной прочности R_k является случайной и подчиняется нормальному закону распределения [17–19]:

$$f(R_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (A - B \cdot e^{-C \cdot h^d})} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(R_k - K \cdot h^{\frac{1}{n}})^2}{(A - B \cdot e^{-C \cdot h^d})^2}}. \tag{10}$$

Была рассчитана вероятность растрескивания от толщины при различной прочности сцепления R_a покрытия (рис. 3).

Вероятность растрескивания $P(R_k < R_a)$ как функция от толщины h и прочности сцепления R_a будет описываться поверхностью, представленной на рис. 4.

В табл. 2 приведены значения вероятности растрескивания для некоторых значений толщины и прочности сцепления покрытия.

Таким образом, вероятность растрескивания покрытия определяется значениями когезионной и адгезионной прочности и его толщины. Для повышения стойкости покрытий к растрескиванию следует стремиться к получению тонкослойных покрытий с высокими значениями когезионной прочности.

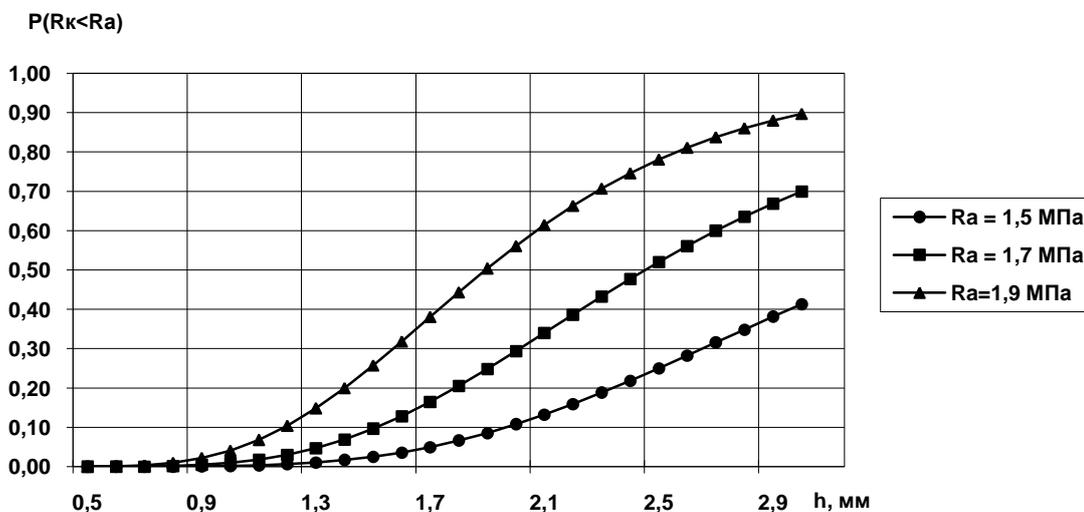


Рис. 3. Зависимость вероятности растрескивания от толщины ПВАЦ покрытия

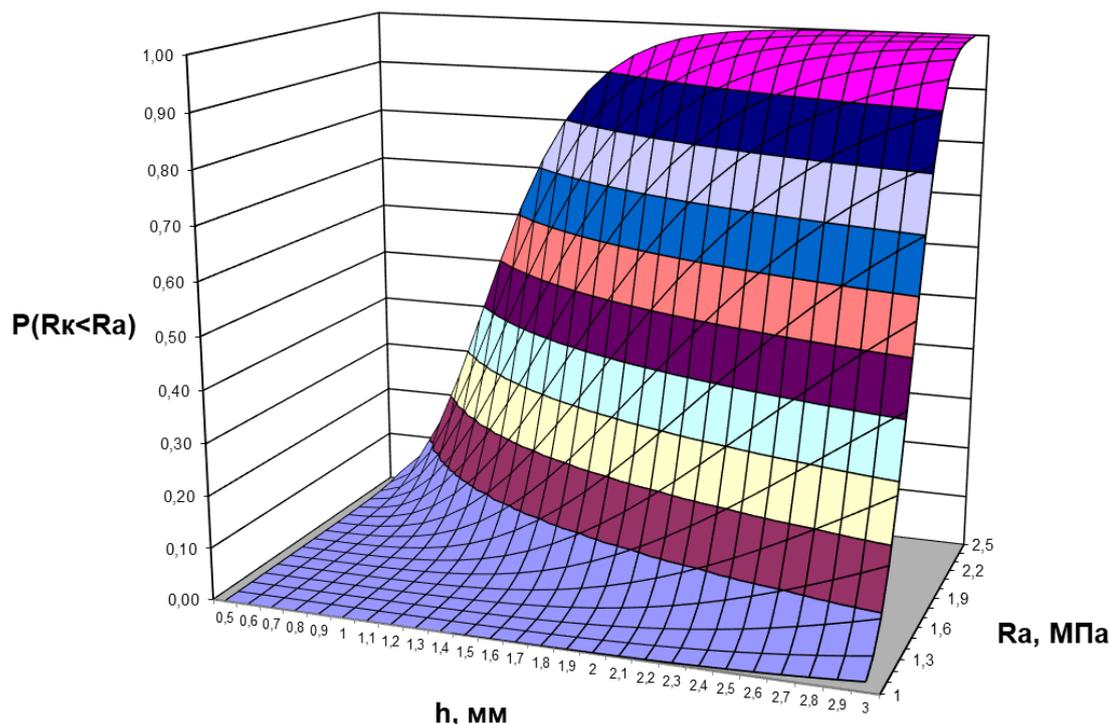


Рис. 4. Зависимость вероятности когезионного разрушения от толщины покрытия и прочности сцепления

Таблица 2
Некоторые значения вероятностей когезионного разрушения ПВАЦ покрытия

Значение адгезионной прочности, МПа		Толщина покрытия h , мм	
		0,5	3
R_a , МПа	1,0	$1,05 \times 10^{-9}$	0,019
	1,7	0,000012	0,6999
	2,5	0,014	0,9999

Выводы

Установлены закономерности изменения когезионной прочности от толщины покрытий.

Установлена зависимость вероятности растрескивания от толщины и прочности сцепления покрытий.

Список литературы

1. The distinctive charm of coating-architecture in the modern urban development / L. Han, J. Han, F. Sun, Y. Huo // *Advanced Materials Research*. 2011. Vols. 160–162. P. 880–885. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.160-162.880
2. Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Mazhitov Y.B. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls // *Case Studies In Construction Materials*. 2018. Vol. 9. P. e00173. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00173
3. Карякина М.И. Физико-химические основы образования и старения покрытий. М.: Химия, 1980. 216 с.
4. Uchaeva T.V., Loganina V.I. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. P. 213–216. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.01.001
5. Зубов П.И., Сухарева Л.А. Структура и свойства полимерных покрытий. М.: Химия, 1982. 256 с.
6. Сухарева Л.А. Прочность полимерных покрытий. М.: Химия, 1984. 240 с.
7. Loganina V.I. Assessment of the mechanism of adhesive destruction coatings // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. P. 841–846. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.841
8. Role of bond coat processing methods on the durability of plasma sprayed thermal barrier systems / E.J. Gildersleeve, V.V. Viswanathan, M.J. Lance et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 375. P. 782–792. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.065

9. Comparison of compressive fatigue performance of cementitious composites with different types of carbon nanotube / L. Li, X. Wang, H. Du, B. Han // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 165. P. 107178. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107178
10. Le J.-L., Bažant Z.P., Bazant M.Z. Unified nano-mechanics based probabilistic theory of quasibrittle and brittle structures: I. Strength, static crack growth, lifetime and scaling // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2022. Vol. 59 (7). P. 1291–1321. DOI: 10.1016/j.jmps.2011.03.002
11. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2022. 479 с.
12. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. М.: Наука, 1968. 368 с.
13. Gazi H., Alhan C. Reliability of elastomeric-isolated buildings under historical earthquakes with/without forward-directivity effects // *Engineering structures*. 2019. Vol. 195. P. 490–507. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.081
14. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete / P.S. Song, J.C. Wu, S. Hwang, B.C. Sheu // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35(2). P. 393–399. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.07.021
15. Oxidation and interfacial cracking behaviors of TBCs with double-layered bond coat on different substrate materials / K. Yan, H. Yu, Y. Xiang, Y. Guo, Y. Wu, Z. Li, J. Sun, Z. Li // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 209. P. 110770. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110770
16. Keerthana K., Kishen J.M.C. Micromechanics of fracture and failure in concrete under monotonic and fatigue loadings // *Mechanics of Materials*. 2020. vol. 148. P. 103490. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103490
17. Barbosa L.A.P., Gerke H.H. Structural heterogeneity of soil clods: Correlating Weibull parameters to fracture surface topography // *Geoderma*. 2022. Vol. 428. P. 116161. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116161
18. Afferrante L., Ciavarella M., Valenza E. Is Weibull's modulus really a material constant? Example case with interacting collinear cracks // *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43(17). P. 5147–5157. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.08.002
19. Fan Z., Sun Y. Detecting and evaluation of fatigue damage in concrete with industrial computed tomography technology // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. P. 794–805. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.016

References

1. Han L., Han J., Sun F., Huo Y. The distinctive charm of coating-architecture in the modern urban development. *Advanced Materials Research*. 2011;160–162:880–885. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.160-162.880
2. Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Mazhitov Y.B. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls. *Case Studies In Construction Materials*. 2018;9:e00173. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00173
3. Karyakina M.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya i stareniya pokrytiy* [Physical and chemical bases of formation and aging of coatings]. Moscow: Chemistry; 1980. 216 p. (In Russ.)
4. Uchaeva T.V., Loganina V.I. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions. *Case Studies in Construction Materials*. 2018;8:213–216. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.01.001
5. Zubov P.I., Sukhareva L.A. *Struktura i svoystva polimernykh pokrytiy* [Structure and properties of polymer coatings]. Moscow: Chemistry; 1982. 256 p. (In Russ.)
6. Sukhareva L.A. *Prochnost' polimernykh pokrytiy* [Strength of polymer coatings]. Moscow: Chemistry; 1984. 240 p. (In Russ.)
7. Loganina V.I. Assessment of the mechanism of adhesive destruction coatings. *Defect and Diffusion Forum*. 2021;410:841–846. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.841
8. Gildersleeve V E.J., Viswanathan V., Lance M.J., Haynes J.A., Pint B.A., Sampath S. Role of bond coat processing methods on the durability of plasma sprayed thermal barrier systems. *Surface and Coatings Technology*. 2019;375:782–792. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.065
9. Li L., Wang X., Du H., Han B. Comparison of compressive fatigue performance of cementitious composites with different types of carbon nanotube. *International Journal of Fatigue*. 2022;165:107178. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107178
10. Le J.-L., Bažant Z.P., Bazant M.Z. Unified nano-mechanics based probabilistic theory of quasibrittle and brittle structures: I. Strength, static crack growth, lifetime and scaling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2022;59(7):1291–1321. DOI: 10.1016/j.jmps.2011.03.002
11. Гмурман В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов* [Probability theory and mathematical statistics: a textbook for universities]. Moscow: Yurayt Publ. House; 2022. 479 p. (In Russ.)
12. Pugachev V.S. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostey* [Introduction to the theory of probability]. Moscow: Nauka; 1968. 368 p. (In Russ.)

13. Gazi H., Alhan C. Reliability of elastomeric-isolated buildings under historical earthquakes with/without forward-directivity effects. *Engineering structures*. 2019;195:490–507. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.081
14. Song P.S., Wu J.C., Hwang S., Sheu B.C. Assessment of statistical variations in impact resistance of high-strength concrete and high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(2):393–399. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.07.021
15. Yan K., Yu H., Xiang Y., Guo Y., Wu Y., Li Z., Sun J., Li Z. Oxidation and interfacial cracking behaviors of TBCs with double-layered bond coat on different substrate materials. *Corrosion Science*. 2022;209:110770. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110770
16. Keerthana K., Kishen J.M.C. Micromechanics of fracture and failure in concrete under monotonic and fatigue loadings. *Mechanics of Materials*. 2020;148:103490. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103490
17. Barbosa L.A.P., Gerke H.H. Structural heterogeneity of soil clods: Correlating Weibull parameters to fracture surface topograph. *Geoderma*. 2022;428:116161. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116161
18. Afferrante L., Ciavarella M., Valenza E. Is Weibull's modulus really a material constant? Example case with interacting collinear cracks. *International Journal of Solids and Structures*. 2006;43(17):5147–5157. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.08.002
19. Fan Z., Sun Y. Detecting and evaluation of fatigue damage in concrete with industrial computed tomography technology. *Construction and Building Materials*. 2019;223:794–805. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.016

Информация об авторе:

Логанина Валентина Ивановна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством и технология строительного производства», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия, loganin@mail.ru

Information about the author:

Valentina I. Loganina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Quality Management and Technology of Construction Production, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, loganin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2023, принята к публикации 21.02.2023.

The article was submitted 15.02.2023; approved after reviewing 21.02.2023.