

В.Л. ФЕДЯЕВ,
д-р техн. наук
(ИММ ФИЦ КазНЦ РАН,
Казань),
Э.Р. ГАЛИМОВ,
д-р техн. наук,
А.В. БЕЛЯЕВ,
канд. техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань),
Л.В. СИРОТКИНА,
канд. хим. наук
(КГЭУ, Казань)
alexey-beljaev@mail.ru

Ресурс пористых функциональных покрытий

Рассматриваются вопросы оценки ресурса пористых функциональных покрытий с учетом их основных особенностей (малая толщина по сравнению с продольными и поперечными размерами, взаимодействие материалов покрытий и основы). При условии что эксплуатационная пригодность покрытий характеризуется средней толщиной, адгезионной прочностью, механическими и другими свойствами, оценивается влияние на эти показатели пористости материала покрытий. С использованием предложенных подходов определяется ресурс покрытий, эксплуатируемых в разных условиях.

Пористые функциональные покрытия, теоретико-экспериментальный метод, соотношения для оценки ресурса

Функциональные покрытия предназначены в первую очередь для защиты материала основы от негативного воздействия внешних факторов [1], таких, как механические и температурные нагрузки; химически, биологически агрессивные среды; световое, инфракрасное, ультрафиолетовое, радиационное излучение и т. д. [2, 3]. В связи с этим распространены антифрикционные, износостойкие, теплозащитные, противокоррозионные и другие покрытия, которые применяются в самолетостроении, судостроении, во многих других отраслях хозяйства [4–7]. При нанесении покрытий [8] используется широкий спектр материалов: разнообразные металлы и сплавы (цинкование, меднение, никелирование, хромирование, кобальтирование и т. д.); оксидные, фосфатные соединения; керамика; полимерные материалы и т. д. Одно из основных требований к материалу большинства покрытий – его максимальная сплошность, соответственно, минимальная пористость. Однако на практике при нанесении покрытий, особенно порошковых, вероятность появления пор очень высока. Для уменьшения их концентрации необходимо применять специальные меры, в том числе технологические [9, 10]. Однако пористость покрытий может быть полезной, например, пористость баббитовых покрытий рабочих поверхностей узлов трения скольжения [11], при теплоизоляции высоконагруженных элементов конструкций, защите их от определенных видов излучений. Таким образом, необходимо учитывать пористость материала функциональных покрытий при оценке ресурса [12].

В целом применительно к пористым материалам, изделиям из них вопросы оценки ресурса, долговечности рассматриваются в работе [2]. Установленные в этой работе закономерности распространяются и на покрытия. Выделяются следующие основные физико-химические свойства: механические (упругость, хрупкость, пластичность, твердость, предел прочности, усталостная прочность и т. д.), теплофизические свойства (теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, теплостойкость, термостойкость, жаростойкость, морозостойкость), электрические свойства (электропроводность), стойкость к воздействию радиационного, электромагнитного, других видов излучений; стойкость по отношению к химически агрессивным веществам; водостойкость, влагостойкость; стойкость в сильно разреженных газовых средах, вакууме.

Для пористых покрытий характерны химический состав, вид материала каркаса; его структура, в том числе пористость; внутренние напряжения; малость толщины; значительное различие факторов, действующих на внешнюю поверхность покрытий и внутреннюю, примыкающую к основе. Что касается тонкого слоя материала покрытия, находящегося на поверхности основы, в общем случае на этот слой действуют механические нагрузки (нормальные и касательные силы реакции со стороны основы); температурные (потоки тепла при наличии перепада температур), электростатические, химические и другие факторы [13].

В силу малой толщины покрытия внешний слой, контактирующий с окружающей средой, и внутренний слой, контактирующий с материалом основы, находятся в разных условиях. Целесообразно рассматривать их как составную часть покрытия, на материал которого действуют средние по толщине

механические $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$, температурные $\bar{t}$, $\bar{q}$ нагрузки, химические $\bar{\chi}$, биологические $\bar{\chi}_b$ и радиационные $\bar{\chi}_r$ факторы. В результате, с одной стороны, оценка ресурса покрытий значительно упрощается, с другой стороны, особенности поведения покрытий учитываются достаточно полно.

При эксплуатации покрытий с течением времени τ их первоначальная пористость m_0 меняется, уменьшаясь либо увеличиваясь. Данные процессы достаточно сложны, определяются химическим составом компонент материала покрытия, его строением и структурой, интенсивностью воздействия нагрузок $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$, $\bar{t}$, $\bar{q}$, $\bar{\chi}$, $\bar{\chi}_b$, $\bar{\chi}_r$. В частности, в простейшем случае, когда на покрытие действуют безразмерные сжимающие нагрузки $\eta = \eta(\tau)$, зависящие от $\bar{\sigma}$, пористость:

$$m = m(\tau) = m_0 - a_c \eta,$$

где a_c – коэффициент сжимаемости.

Предположим, что материал покрытия состоит из совокупности пористых цилиндрических тел, примыкающих друг к другу, расположенных на некотором основании [14]. Первоначальные высота и радиус цилиндров h_0 , r_0 , пористость цилиндров m_0 , пористость, обусловленная зазорами между цилиндрами m_{s0} , считаются известными. При условии что пористость m_0 мала, материал покрытия является бимодальным, рассмотрим деформирование слоя покрытия под действием штампа, который движется в сторону основания со скоростью $V = V_0(\tau)$. Со стороны штампа на торцы цилиндров действует контактное давление p_k , на боковые поверхности – давление p_0 .

В рамках бимодальной модели пористости материала покрытия будем различать текущую микропористость сжимающихся цилиндров $m(\tau)$ и макропористость $m_s(\tau)$, зависящую от размеров зазоров между деформируемыми цилиндрами.

Выделяя при сжатии цилиндров режимы малых и больших нагрузок для оценки изменения микропористости, получим зависимости

$$m(\tau) = m_0 - (1 + m_0)(1 - h(\tau)/h_0) \quad \text{или} \quad m(\tau) = m_0 - a_k \ln(p(\tau)/p_a), \quad (1)$$

где $h(\tau)$, $p(\tau)$ – текущие высота цилиндров, среднее контактное давление; p_a – атмосферное давление.

В свою очередь, функция $h(\tau)$, а также эффективный радиус цилиндров $r(\tau)$ представим в виде

$$h(\tau) = h_e(\tau) + h_p(\tau); \quad r(\tau) = r_e(\tau) + r_p(\tau). \quad (2)$$

Здесь h_e , r_e ; h_p , r_p характеризуют упругие и пластические деформации цилиндров; $h_e(\tau) = (p(\tau)/E_e)h_0$, E_e – модуль упругости; $r_e = \nu_e h_e$, ν_e – коэффициент Пуассона.

При пластическом деформировании

$$h_p(\tau) = h_0 - V_0 \tau; \quad r_p(\tau) = r_0 / (1 - h_e/h_0 - V_0 \tau/h_0)^{\alpha_0}, \quad (3)$$

где $\alpha_0 = 0,5 \left(1 - 3\tilde{p}_0 / \sqrt{3(1 - \tilde{p}_0^2)} \right)$, $\tilde{p}_0 = p_0/\sigma_T$, σ_T – предел текучести материала каркаса. В соответствии с условием пластичности

$$\tilde{p}(\tau) = p(\tau)/\sigma_T = 0,5 \left(\tilde{p}_0 + \sqrt{3(1 - \tilde{p}_0^2)} \right). \quad (4)$$

Связь между переменными $h(\tau)$ и $p(\tau)$ определяется формулами (1) – (4).

Соотношение для оценки изменения макропористости $m_s(\tau)$ с течением времени сжатия слоя покрытия, учитывая характер деформирования цилиндров, запишем в виде

$$m_s(\tau) = m_{s0} (1 - h(\tau)/h_{sk}),$$

где $h_{sk} \approx 0,78h_0$ – средняя высота сжатых цилиндров при их полном примыкании.

Таким образом, средняя по толщине пористость материала покрытия:

$$\bar{m}_0 \approx 0,8\bar{m}(\tau) + 0,2\bar{m}_s(\tau), \quad (5)$$

где $\bar{m}$, $\bar{m}_s$ – средняя по толщине покрытия микро- и макропористость.

Располагая зависимостью (5), проведем оценку ресурса покрытий τ_k . В общем случае эксплуатации покрытий [2, 13], воздействии на них указанных механических, температурных, химических и других нагрузок в течение времени τ происходит изменение механических (упругость, пластичность, текучесть, прочность), физико-химических (твердость, износостойкость, термостойкость и т. д.) свойств материала покрытий, характеризующихся показателями $G_c(\tau)$. Кроме того, толщина покрытия $H_c(\tau)$ уменьшается вследствие эрозии, коррозии, других факторов; ухудшается адгезия, уменьшается прочность адгезии $F_a(\tau)$. При этом скорость w деградации полезных свойств покрытий является функцией времени τ , а также средних по толщине показателей $\bar{\sigma}(\tau)$, $\bar{\epsilon}(\tau)$, $\bar{l}(\tau)$, $\bar{q}(\tau)$, $\bar{\chi}(\tau)$, $\bar{\chi}_b(\tau)$, $\bar{\chi}_r(\tau)$, $k_m(\tau)$, $k_c(\tau)$, характеризующих изменение химического состава (k_m), строения, структуры (k_c) каркаса. В простейшем случае этим показателям присваиваются средние за время τ_k значения.

Одно из возможных представлений w в соответствии с теоретико-экспериментальным методом – в виде показательной функции [15], например,

$$w = w(\tau, \bar{\sigma}, \bar{T}) = w_0 \exp(-(A - \gamma\bar{\sigma})/C\bar{T}), \quad (6)$$

где A , C , γ – экспериментальные коэффициенты, индивидуальные для конкретных материалов; $w_0 = w_0(\tau) = W_0(\bar{m}_0(\tau))$ – функция, зависящая от меняющейся с течением времени эксплуатации средней по толщине пористости $\bar{m}_0$ материала покрытия; $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\tau)$; $\bar{T} = \bar{T}(\tau)$ – функции, характеризующие средние напряжения в покрытии и температуру его материала.

Исходя из зависимости (6), выделим несколько вариантов определения ресурса сжимаемых покрытий при условии, что показателем их полезных свойств является предел прочности при сжатии.

Так, согласно имеющимся экспериментальным данным для бимодальных материалов [2] безразмерный предел прочности

$$\tilde{\sigma} = \sigma_c / \sigma_{0c} = \zeta_0 (1 - \zeta_1 \bar{m}_0(\tau)), \quad (7)$$

где σ_{0c} – предел прочности при сжатии материала каркаса деформируемых цилиндров; $\zeta_0 = \xi_0 (1 - \xi_1 \bar{c})$, $\bar{c} = 4,0\bar{m}(\tau)/\bar{m}_s(\tau)$; ξ_0 , ξ_1 , ζ_1 – эмпирические параметры.

В наиболее простом случае, когда w_0 , $\bar{\sigma}$, $\bar{T}$ – постоянные величины, ресурс покрытия τ_k определяется соотношением

$$\tau_k = \kappa_0 \exp((A - \gamma\bar{\sigma})/C\bar{T}), \quad (8)$$

где $\kappa_0 = -(L_k/w_0)(w_0 < 0)$, $L_k = Y_0 - Y_k$ – показатель качества покрытий, Y_0 , Y_k – показатели, в частности предел прочности при сжатии (7), характеризующие полезные свойства покрытий в начале эксплуатации и к ее концу.

При $w_0 = k_0 \exp(-k_1 \tau)$, $\bar{\sigma} = \text{const}$, $\bar{T} = \text{const}$, малом значении коэффициента k_1 согласно соотношению (8) приближенно

$$\tau_k \approx \kappa_1 \exp((A - \gamma\bar{\sigma})/C\bar{T}), \quad (9)$$

где $\kappa_1 = -L_k/k_0 (k_0 < 0)$.

Если $w_0 = \text{const}$, но параметры $\bar{\sigma}$, $\bar{T}$ зависят от времени τ , например, по линейному закону $\bar{\sigma} = \sigma_0 + \delta_1 \tau$, $\bar{T} = T_0 + \Theta_1 \tau$, то из формулы (9) при сравнительно малых значениях коэффициентов δ_1 , Θ_1 следует оценка ресурса покрытия

$$\tau_k \approx \left(-h_1 \pm \sqrt{h_1^2 - 4h_2(h_0 - \tilde{L}_k)} \right). \quad (10)$$

Здесь $h_0 = 1 - 2\tilde{\Theta}_1/a_k$; $h_1 = a_k$; $h_2 = \tilde{\Theta}_1 a_k$; $a_k = A^* \tilde{k}_1$; $A^* = \tilde{A}(1 - \gamma^*)$; $\tilde{A} = A/CT_0$; $\tilde{k}_1 = \tilde{\delta}_1 \gamma^*$; $\tilde{\delta}_1 = \delta_1/\sigma_0$; $\gamma^* = \tilde{\gamma}\sigma_0/\tilde{A}$; $\tilde{\gamma} = \gamma/CT_0$; $\tilde{\Theta}_1 = \Theta_1/T_0$; $\tilde{L}_k = 1 + 2\tilde{\Theta}_1/a_k - a_k L_k \exp(A^*)/w_0$.

На практике возможна ситуация, когда при определении ресурса необходимо учесть несколько показателей $Y_1, Y_2, \dots$, таких, как износ, прочность материала, адгезия покрытий и т. д. Один из вариантов решения данной проблемы – использование обобщенного критерия K , который относительно безразмерных переменных y_j записывается в виде

$$K = \sum_{j=1}^s (\gamma_j y_j),$$

где $y_j = Y_j/B_j$, B_j – характерная величина j -го показателя; γ_j – весовые коэффициенты, сумма которых равна единице.

Таким образом, в работе представлен подход для оценки ресурса пористых функциональных покрытий с использованием экспериментальных данных, методов математического моделирования. Основные этапы его проиллюстрированы примерами, приведены соотношения, характеризующие зависимость пористости материала покрытий, ресурса от внутренних факторов, интенсивности внешних (эксплуатационных) нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.А. и др. Исследование свойств пористых теплозащитных материалов в условиях резкого изменения давления, бароудара // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 4. С. 158–161.
2. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. Ресурс пористых технических материалов. Казань: Изд-во АН РТ, 2022. 136 с.
3. Гаврилова В.А., Кашапов Н.Ф., Фазлыяхматов М.Г. Нанесение защитного полимерно-порошкового покрытия на многоэлементный медицинский пьезоэлектрический датчик в поле коронного разряда // Изв. вузов. Физика. 2014. № 3-3. С. 114–118.
4. Галимов Э.Р. и др. Высокоэффективные технологии и оборудование для получения полимерных порошковых покрытий. Казань: Изд-во АН РТ, 2016. 252 с.
5. Кашапов Н.Ф., Шарифуллин С.Н. Многофункциональные покрытия оптических систем с повышенными оптико-механическими характеристиками [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogofunktsionalnye-pokrytiya-opticheskikh-sistem-s-povyshennymi-optiko-mehanicheskimi-harakteristikami/viewer> (дата обращения: 4.02.2024).
6. Галимов Э.Р. и др. Световозвращающие покрытия: технологии получения, структура, свойства. Казань: Изд-во АН РТ, 2021. 124 с.
7. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Определение весомости технологических операций и уровня расхода ресурса агрегатов и систем трактора // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2012. № 3 (25). С. 74–77.
8. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. Математическое описание физико-химических процессов, протекающих при нанесении полимерных порошковых покрытий струйными способами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 174–183.
9. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. СПб.: Химиздат, 2008. 448 с.
10. Fedyaev V.L. et al. Formation of Polymeric Powder Coatings / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 240. Article № 012014.
11. Fedyaev V.L. et al. Gas-Flame Spraying of Babbit Materials on Parts of Friction Units // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1588. Article № 012055.
12. Асланян И.Р., Еремкина М.С., Королев Д.Д. Повышение ресурса деталей газотурбинных двигателей, работающих в условиях фреттинга // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 3. С. 169–172.

13. Гимранов И.Р., Федяев В.Л., Галимов Э.Р. Оценка ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий // Вестник Югорского государственного университета. 2021. № 3 (62). С. 11–18.
14. Фасхутдинов М.Х., Федяев В.Л. Гусенично-колесные движители универсально-пропашных тракторов. Проблемы и перспективы. Казань: Изд-во АН РТ, 2021. 304 с.
15. Гойхман Б.Д., Смехунова Т.П. Прогнозирование изменений свойств полимерных материалов при длительном хранении и эксплуатации // Успехи химии. 1980. № 8. С. 1554–1573.

Поступила в редакцию 4.03.24

После доработки 31.08.24

Принята к публикации 2.09.24

Service Life of Porous Functional Coatings

V.L. FEDYAEV¹, E.R. GALIMOV², A.V. BELYAEV², AND L.V. SIROTKINA³

¹ Institute of Mechanics and Engineering, KSC of RAS, Kazan

² Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

³ Kazan State Power Engineering University, Kazan

The paper considers the issues of assessing the service life of porous functional coatings. The following main features are taken into account: a small thickness compared to longitudinal and transverse dimensions, interaction between the coating and base materials. Provided that the serviceability of coatings is characterized by the average thickness, adhesive strength, mechanical and other properties, the influence of porosity of the coating material on these parameters is assessed. Using the approaches proposed, the service life of coatings used under different conditions is determined.

Porous functional coatings, theoretical-experimental method, relations for the service life assessment