

И. Р. Гимранов, В. Л. Федяев, Э. Р. Галимов

ОЦЕНКА РЕСУРСА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассматриваются вопросы оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий. Отмечаются преимущества и недостатки этих покрытий по отношению к традиционным лакокрасочным покрытиям, необходимость определения ресурса при выборе рациональных вариантов их применения. Выделяется контрольный объем покрытия, ограниченный внешней поверхностью, на которую воздействует окружающая среда, и внутренней, контактирующей с подложкой. Называются основные факторы, действующие на эти поверхности. С целью упрощения последующего анализа изменений свойств покрытий при условии, что поперечные размеры их существенно меньше продольных, внешние и внутренние нагрузки заменяются на средние, действующие на внутренний слой материала покрытия. Обсуждаются особенности поведения совокупности свойств материала с течением времени эксплуатации его. В качестве основных показателей функциональности покрытий выбирается средняя толщина, параметр, характеризующие отдельные механические и физико-химические свойства, адгезионная прочность слоя покрытия к материалу подложки. Предполагается, что данные показатели зависят от времени, в частности, степенным образом, при этом коэффициенты соответствующих соотношений определяются с учетом действующих на материал эксплуатационных нагрузок, внутренних факторов, таких как микротрещины, поры, внутренние напряжения и т. д. В силу того, что значимость названных показателей может быть разной, стремясь, тем не менее, учесть все, для получения количественной оценки ресурса рассматриваемых покрытий предполагается ввести комплексный (интегральный) критерий – сумму показателей с весовыми множителями. Пределы изменения этих множителей от 0 до 1, в каждом конкретном случае величина их определяется экспертно. При известных критических значениях показателей получено относительно времени уравнение, решение которого является количественной оценкой ресурса покрытий. Следует отметить, что при необходимости предложенная методика может быть представлена в виде компьютерной программы, которая позволит существенно упростить оценку ресурса полимерных порошковых покрытий с учетом особенностей материала покрытий, технологий их нанесения, действия на покрытия эксплуатационных факторов, требований к их функциональности.

Ключевые слова: ресурс; полимерные порошковые покрытия; эксплуатационные факторы; показатели функциональности покрытий; комплексный критерий.

I. R. Gimranov, V. L. Fedyayev, E. R. Galimov

EVALUATION OF RESOURCE OF FUNCTIONAL POLYMER POWDER COATINGS

The issues of estimating the resource of polymer powder coatings are considered. The control volume of the coating is allocated, limited by the external surface on which the environment acts, and the internal surface in contact with the substrate. The main factors acting on these surfaces are called. Provided that the transverse dimensions of the coatings are significantly smaller than the longitudinal ones, external and internal loads are replaced by average loads acting on the inner layer of the coating material. As the main indicators of the functionality of the coatings, the following are selected: average thickness; parameters that characterize the mechanical and physico-chemical properties of the coating material; adhesive strength. It is assumed that these indicators depend on time, in particular, in a power-law way. In this case, the coefficients of the correspond-

ing ratios are determined taking into account the operating loads acting on the material, as well as internal factors (microcracks, pores, internal stresses). To obtain a quantitative assessment of the resource of coatings, a complex (integral) criterion is proposed – the sum of indicators with weight multipliers, the limits of change of which are from 0 to 1. In each specific case, the values of the indicators are determined by experts. For known critical values of the indicators, a ratio is obtained that allows us to quantify the resource of coatings.

Keywords: resource; polymer powder coatings; operational factors; indicators of the functionality of coatings; complex criterion.

Введение

Функциональные покрытия, которые применяются в современном производстве, весьма разнообразны, отличаются используемыми материалами, технологиями их нанесения на подложку. Поверхность данных покрытий обладает необходимыми физико-механическими, химическими, другими свойствами, такими как требуемая твердость, износостойкость, стойкость к коррозии, температурным нагрузкам, высокая отражательная способность и т. д.

Одними из перспективных материалами функциональных покрытий являются порошки полимеров, полимерные порошковые композиции (ППК) [1–3]. По сравнению с традиционными лакокрасочными материалами при использовании ППК может быть уменьшена площадь покрасочных цехов, упрощено хранение и транспортировка этих материалов, повышена производительность труда, степень механизации и автоматизации производственных процессов, уменьшена техногенная нагрузка на окружающую среду, пожарная опасность производства. Вместе с тем, при использовании ППК необходимо применять более сложное технологическое оборудование, в первую очередь, теплотехническое: сушильные и нагревательные печи с соответствующими системами, а также дозаторы, другие устройства.

Кроме того, зачастую ужесточаются требования к качеству подготовки рабочих поверхностей изделий перед нанесением покрытий. Для обеспечения высоких эксплуатационных показателей этих покрытий, например, адгезионной прочности, следует грунтовать данные поверхности, использовать ступенчатые режимы формирования покрытий, добавлять в порошки специальные присадки.

В силу того, что имеется большое количество порошковых материалов, технологий их нанесения в каждом конкретном случае применения полимерных порошковых покрытий стоит задача рационального выбора наиболее эффективного покрытия. При этом необходимо принять во внимание, прежде всего, назначение покрытия, способность выполнять свои функции. Во-вторых, несомненно, важны также условия эксплуатации изделий с соответствующими покрытиями, внешние факторы, действующие на них, причем не только по отдельности, но и в совокупности. Известно, что при одновременном воздействии разных факторов в материале покрытия могут протекать качественно иные процессы. В-третьих, следует учесть ресурс покрытия – время, в течение которого эксплуатируемое покрытие обеспечивает выполнение требуемых функций.

Сложность оценки ресурса покрытия состоит в том, что на величину его влияют два основных обстоятельства: старение материала покрытия [4–6] и изменение с течением эксплуатации адгезии, адгезионной прочности [7–9].

Цель исследования – разработка методики оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий с учетом названных обстоятельств.

Методика проведения исследований

Настоящая работа базируется, в основном, на методах математического моделирования. Согласно данным методам изменение свойств полимерных порошковых покрытий в течение эксплуатации рассматривается как процесс, в определенной степени, аналогичный техноло-

гическому. При этом выделяются наиболее значимые величины, параметры, характеризующие воздействие внешних факторов на покрытия. Предполагается, что связь между показателями механических, физико-химических, других свойств покрытий и этими параметрами представляется математически, в виде формул. Соответствующие соотношения получаются в результате анализа данных, приведенных в научно-технической литературе. При необходимости уточнения, конкретизации либо, наоборот, обобщения их проводятся физические, вычислительные эксперименты, дополнительные исследования.

Далее рассматриваются наиболее важные эксплуатационные показатели, например, толщина покрытия, прочность адгезии, изменение их с течением времени. Устанавливается в виде определенных формул зависимость этих показателей от времени, величин, характеризующих свойства материала покрытий, интенсивность воздействия на покрытия внешних факторов.

В производственных условиях, когда целесообразен одновременный учет нескольких эксплуатационных показателей, в работе используются методы, характерные для задач производственной оптимизации. Вводится комплексный критерий, включающий в себя выделенные показатели и множители их значимости. Этот критерий приравнивается выражению, включающему в себя названные множители и значения эксплуатационных показателей, определенных в соответствии с функциональными требованиями к покрытиям. Получается уравнение, в результате решения которого находится ресурс покрытия.

Результаты исследований

В общем случае полимерные покрытия, находящиеся на рабочих поверхностях изделий, характеризуются тем, что поперечные размеры (толщина) сравнительно малы, материал покрытия может быть пористым либо вследствие издержек технологий [10–12] либо в результате специально принятых мер. Например, теплоизолирующие или антифрикционные покрытия. Основное же отличие их от изделий из полимерных материалов состоит в том, что на разные, находящиеся близко друг к другу поверхности покрытия: внешнюю, контактирующую с окружающей средой, и внутреннюю, на которой материал покрытия примыкает к материалу подложки, действуют разные факторы [13]. При эксплуатации покрытий в земных условиях к первым относятся механические нагрузки в виде давления, сил трения, ударов; температурные факторы, воздействие химически агрессивных компонентов, в том числе воды, биологических составляющих, излучения и т. д. На внутреннюю поверхность слоя материала со стороны подложки действуют нормальные и касательные силы реакции, тепло (холод), температурные градиенты, термонапряжения, электростатические силы, химические, электрохимические факторы.

Таким образом, если в слое покрытия выделить контрольный объём, средняя поверхность которой обладает определенной кривизной, то среднюю толщину, части внешней, внутренней поверхностей этого объёма можно обозначить через H_c , S_0 , S_i соответственно. Именно на данные поверхности действуют названные выше факторы. Естественно предположить, что какое – либо воздействие через боковые поверхности на материал рассматриваемого объёма отсутствует.

Введем далее обозначения интенсивности (величины) воздействия на внешнюю поверхность S_0 контрольного объёма давления (σ_0), трения (ϵ_0), удара (σ_{0s} , ϵ_{0s}); температуры (t_0 , q_0), химических компонентов (x_0), биологических факторов ($x_{0в}$), излучения (x_{0r}). Применительно к внутренней поверхности обозначим S_i аналогичным образом через σ_i , ϵ_i напряжения, обусловленные силами реакции со стороны подложки; t_i , q_i – температуру, тепловой поток; ϵ_{it} – касательные термонапряжения, σ_e – напряжения, вызванные разницей зарядов частиц материала покрытия и подложки, x_i – величину, характеризующую интенсивность химических, электрохимических реакций.

Следует заметить, что в зависимости от условий эксплуатации покрытий названные величины могут быть стационарными (квазистационарными), не меняющимися с течением времени, либо нестационарными, переменными во времени. В общем, они могут меняться по площади поверхности S_0, S_i , однако целесообразно рассматривать их средние по соответствующей площади значения.

Детальный учет влияния на эксплуатационные свойства покрытий выделенных факторов представляет большие трудности. Поэтому, учитывая малую толщину слоя покрытия H_c , предположим, что на материал его действуют средние по толщине слоя механические нагрузки $\bar{\sigma} = 0.5(\sigma_0 + \sigma_i) + \bar{\sigma}_{0s} + 0.5\sigma_e$, $\bar{\varepsilon} = 0.5(\varepsilon_0 + \varepsilon_i) + \bar{\varepsilon}_{0s} + 0.5\varepsilon_{it}$; температурные нагрузки $\bar{t} = 0.5(t_0 + t_i)$; $\bar{q} = 0.5(q_0 + q_i)$, химические $\bar{x} = 0.5(x_0 + x_i)$, биологические $\bar{x}_g = 0.5x_{0g}$, радиационные $\bar{x}_r = 0.5x_{0r}$ факторы. Здесь $\bar{\sigma}_{0s}, \bar{\varepsilon}_{0s}$ – приведенные (усредненные по конкретному объёму и времени) ударные нагрузки.

Помимо описанных внешних факторов, действующих на материал покрытия, поведение его с течением времени эксплуатации зависит также от вида этого материала, наличия слабых связей в макромолекулах, микротрещин и пор, внутренних напряжений и пр. Соответственно, параметры, характеризующие величину этих внутренних факторов, обозначим следующим образом: k_m, c_m, g_m и s_m .

В присутствии внутренних факторов, при воздействии на покрытие отдельных либо совокупности внешних нагрузок в материале покрытия могут протекать следующие процессы [14]:

1. При механическом воздействии на покрытие со стороны как внешней, так и внутренней поверхностей ($\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$) возможно механическое разрушение материала покрытия, утончение толщины H_c , отслаивание пленки от подложки, изменение механических, физико-химических, теплофизических свойств материала.

2. Повышенная температура (\bar{t}, \bar{q}), действие механических нагрузок на покрытие, неуравновешенность исходной структуры материала может привести к образованию более сложных структур (структурированию), как следствие, к ухудшению адгезии.

3. Вместе с тем, при действии данных, а также ряда других внешних факторов, например, излучения (\bar{x}_r) наблюдается деструкция (деградация) полимеров – разрушение макромолекул материала, деполимеризация его, когда мономерные звенья отрываются от полимерных цепей либо образуются осколки макромолекул (статистическая деструкция).

4. При контакте покрытия с агрессивной средой (вода, водные растворы солей, кислот, щелочей; спирты, растворители, кислород, озон и другие агрессивные газы), характеризуемой параметром \bar{x} , а также с микроорганизмами (бактерии, микробы), продуктами их жизнедеятельности (\bar{x}_g), в том числе, при наличии высоких температур (\bar{t}, \bar{q}), излучения (\bar{x}_r) может происходить активное изменение свойств полимеров, разрушение компонентов материала покрытий.

5. В силу особенностей состава, структуры полимерных материалов, содержания в них жидких, летучих, химически не связанных с пленкообразователем компонентов, последние могут испаряться, выпотевать на внешней поверхности покрытия, вымываться из его объёма, что приводит с течением времени к изменению состава материала, отдельных эксплуатационных показателей.

В целом, при эксплуатации рассматриваемых покрытий, действии на них совокупности факторов с течением времени происходит, во-первых, поверхностный износ, материала покрытия, уменьшение его толщины H_c как вследствие эрозии, коррозии, так и разрушения материала покрытия. В последнем случае в начале в нем возникают, растут первичные трещины, затем трещины быстро развиваются, часть материала покрытия разрушается.

Во-вторых, изменяются механические и физико-химические свойства материала покрытия. Основные механические свойства полимеров: упругость, пластичность, текучесть, прочность, характеризуемые модулем Юнга, модулем сдвига, коэффициентом Пуассона, пределом прочности при растяжении, сжатии, изгибе, ударе, другими показателями. К физико-

химическим относятся твердость, износостойкость, водостойкость, влагостойкость, газопроницаемость, теплостойкость и термостойкость, жаро- и морозостойкость, стойкость по отношению к агрессивным средам. Соответственно, выделяются следующие показатели: плотность, пористость, проницаемость, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент теплового расширения материала и т. д.

В-третьих, изменяется адгезия, прочность адгезии F_a , характеризующая связь, прилипание покрытия к материалу подложки либо дополнительного слоя (грунтовки). Применительно к покрытиям различают собственно адгезию, когда адгезив (покрытие) сцепляется с субстратом (подложкой), и механическую адгезию, обусловленную проникновением адгезива в трещины, поры субстрата. На практике чаще всего действуют оба этих механизма. Адгезия зависит от физико-химических свойств материала покрытия и подложки, шероховатости поверхности последней, степени ее чистоты, а также размеров частиц наносимого полимерного порошка, температуры адгезива, поверхности субстрата, пористости покрытия, других факторов. В соответствии с [15] текущая прочность адгезии определяется напряженно-деформированным состоянием материала адгезива и субстрата вблизи поверхности их контакта; наличием жидких, газообразных компонентов в адгезиве; величиной модуля Юнга и модуля сдвига обоих материалов, действием на покрытие нормальных и касательных нагрузок, температурой материалов.

Ресурс покрытий зависит от условий эксплуатации, воздействия на покрытия совокупности факторов, достаточно подробно рассмотренных выше, а также от требований, предъявляемых к их свойствам, функциональности [16–18]. Выбор соответствующих свойств, требований к ним обусловлен техническими задачами, которые призвано решать конкретное покрытие. Например, в качестве таких требований могут быть условия уменьшения средней толщины слоя покрытия до $H_{ск}$ при сохранении его прочности, водостойкости, снижения прочности адгезии до $F_{ак}$.

Принимая во внимание сказанное, выделим в качестве основных показателей эксплуатационной пригодности рассматриваемых функциональных покрытий среднюю толщину слоя покрытия H_c , величину G_c , характеризующую сплошность, прочность, коррозионную стойкость, другие свойства покрытий (по выбору), и прочность адгезии покрытий F_a . Далее предположим, что показатели H_c , G_c , F_a зависят от времени τ , в течение которого эксплуатируется покрытие:

$$H_c = H_c(\tau), \quad G_c = G_c(\tau), \quad F_a = F_a(\tau).$$

Очевидно, что достижение критических значений этих показателей произойдет за разное время. В этой ситуации целесообразно ввести комплексный (интегральный) критерий [19; 20], зависящий от H_c , G_c , F_a :

$$K = K(\tau) = f(H, G, F), \quad (1)$$

где f – некоторая функция.

В данном соотношении размерности H_c и F_a соответственно, м и Па. Водостойкость, например, характеризуется водопоглощением, определяемом по массе поглощенной воды за единицу времени через единицу площади поверхности. Следовательно, имеет размерность кг/(с · м²). Учитывая это обстоятельство, перейдем в (1) к безразмерным переменным, принимая за размерность времени τ величину τ_0 , толщины $H_c - h_0$, показателя $G_c - g_0$ – его полиномиальное значение g_0 , прочности адгезии $F_a - f_0$ – величину f_0 . Относительно безразмерных переменных $\tilde{\tau} = \tau/\tau_0$, $\tilde{h}_c = H_c/h_0$, $\tilde{g}_c = G_c/g_0$, $\tilde{f}_a = F_a/f_0$ соотношение (1) запишем в виде:

$$K = K(\tilde{\tau}) = f(\tilde{h}_c, \tilde{g}_c, \tilde{f}_a).$$

В простейшем случае ориентируясь на методики производственной оптимизации [19], представим выражение для безразмерного показателя K следующим образом:

$$K = \alpha \tilde{h}_c + \beta \tilde{g}_c + \gamma \tilde{f}_a. \quad (2)$$

Здесь α, β, γ – весовые коэффициенты, характеризующие значимость соответствующего показателя ($0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1, \alpha + \beta + \gamma = 1$), которые определяются экспертно.

Далее предположим, что в (2) зависимости функций $\tilde{h}_c = \tilde{h}_c(\tilde{\tau}), \tilde{g}_c = \tilde{g}_c(\tilde{\tau}), \tilde{f}_a = \tilde{f}_a(\tilde{\tau})$ от безразмерного времени $\tilde{\tau}$, других параметров известны. В частности они могут быть близки к линейным. Для каждого из этих показателей в соответствии с имеющимися требованиями к качеству покрытий выделим критические значения $\tilde{h}_{ck}, \tilde{g}_{ck}, \tilde{f}_{ak}$, определим величину

$$K_0 = \alpha \tilde{h}_{ck} + \beta \tilde{g}_{ck} + \gamma \tilde{f}_{ak}.$$

После чего найдем ресурс покрытия $\tilde{\tau}_k$ как решение относительно $\tilde{\tau}$ уравнения:

$$\alpha \tilde{h}_c(\tilde{\tau}) + \beta \tilde{g}_c(\tilde{\tau}) + \gamma \tilde{f}_a(\tilde{\tau}) = K_0. \quad (3)$$

Так, если $\tilde{h}_c(\tau) = a_0 + a_1 \tilde{\tau}, \tilde{g}_c = b_0 + b_1 \tilde{\tau}, \tilde{f}_a = c_0 + c_1 \tilde{\tau}$, то из (3) следует:

$$\tilde{\tau}_k = (K_0 - D_0) / D_1, \quad (4)$$

где $D_0 = \alpha a_0 + \beta b_0 + \gamma c_0, D_1 = \alpha a_1 + \beta b_1 + \gamma c_1$.

В размерной форме ресурс τ_k рассматриваемых покрытий оценивается соотношением:

$$\tau_k = \tau_0 \tilde{\tau}_k. \quad (5)$$

Обсуждение результатов

В соответствии с предложенным подходом оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий в материале покрытия выделяется контрольный объем. С учетом особенностей воздействия на внешнюю и внутреннюю поверхности этого объема механических, тепловых, химических и других нагрузок оценивается их интенсивность. Кроме того, принимается во внимание совокупность внутренних факторов, таких как слабые связи в макромолекулах полимеров, разрывы сплошности, внутренние напряжения и прочее. Далее качественно обсуждаются возможные последствия воздействия названных факторов на материал. Могут быть получены, в принципе, и количественные оценки.

На следующем этапе исследований выбираются, по нашему мнению, основные эксплуатационные показатели рассматриваемых покрытий: средняя толщина, величина, характеризующая механические, физико-химические свойства материала, и прочность адгезии покрытий. Данные показатели непосредственно либо опосредованно зависят от внешних и внутренних факторов, действующих на покрытие, от их интенсивности и времени воздействия, поэтому являются функциями переменных, характеризующих эти факторы, а также времени эксплуатации покрытий τ (см. (1)).

Приведенные рассуждения естественны. Новизна результатов настоящей работы состоит в том, что с целью одновременного учета названных показателей при оценке ресурса покрытий вводится комплексный (интегральный) критерий K (2). С использованием его, после определенных преобразований получается уравнение (3), решения которого (4), (5) представляют собой зависимости для оценки ресурса покрытий. Важно, что эти соотношения содержат критические значения показателей H_c, G_c, F_a , обусловленные соответствующими требованиями, результаты экспертной оценки значимости данных показателей, коэффициенты $a_0, b_0, c_0, a_1, b_1, c_1$, зависящие определенным образом от параметров $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}, \bar{t}, \bar{g}, \bar{x}, \bar{x}_e; k_m, c_m, g_m, s_m$, характеризующих интенсивность, величину внешних и внутренних факторов, влияющих на поведение покрытий при их эксплуатации.

Заключение

Предложен подход, разработаны основные положения оценки ресурса функциональных полимерных порошковых покрытий. В рамках данного подхода по отношению к слою покрытия выделены основные внешние и внутренние факторы, влияющие на свойства матери-

ала покрытий при их эксплуатации, проанализированы возможные последствия воздействия этих факторов. В качестве основных показателей состояния покрытий, их работоспособности принята средняя толщина, величина, характеризующая механические и физико-химические свойства материала покрытий, прочность адгезии. Представлен включающий в себя названные показатели критерий, позволяющий оценивать ресурс покрытий с учетом критических значений данных показателей, результатов экспертной оценки значимости их, параметров, характеризующих действующие по ходу эксплуатации нагрузки и текущее состояние материала.

Литература

1. Яковлев, А. Д. Порошковые краски / А. Д. Яковлев. – Ленинград : Химия, 1987. – 216 с. – Текст : непосредственный.
2. Порошковые краски. Технология покрытий : перевод с английского / под редакцией А.Д. Яковлева. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2001. – 253 с. – Текст : непосредственный.
3. Полимерные порошковые покрытия специального назначения / Э. Р. Галимов, Э. В. Зверев, Э. Е. Тукбаев [и др.]. – Казань : Офсет Сервис, 2021. – 164 с. – Текст : непосредственный.
4. Энциклопедия полимеров : в 3 томах / главный редактор В. А. Кабанов. – Москва : Советская энциклопедия, 1977. – Т. 3. – 1152 с.
5. Эмануэль, Н. М. Химическая физика молекулярного разрушения и стабилизации полимеров / Н. М. Эмануэль, А. Л. Бучаченко. – Москва : Наука, 1988. – 368 с. – Текст : непосредственный.
6. Справочник по композиционным материалам : в 2 книгах / под редакцией Дж. Любина. – Москва : Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 584 с. – Текст : непосредственный.
7. Зимон, А. Д. Адгезия пленок и покрытий / А. Д. Зимон. – Москва : Химия, 1977. – 352 с. – Текст : непосредственный.
8. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – Москва : Химия, 2003. – 392 с. – Текст : непосредственный.
9. Белый, В. А. Адгезия полимеров к металлам / В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Ю. М. Плескачевский. – Минск : Наука и техника, 2007. – 288 с. – Текст : непосредственный.
10. Губайдуллин, Д. А. Математическое моделирование неизотермических процессов струйного напыления полимерных порошковых композиций и формирования защитных покрытий / Д. А. Губайдуллин, В. Л. Федяев, И. В. Моренко. – Текст : непосредственный // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2016. – Т. 17, № 4. – С. 1–14.
11. Губайдуллин, Д. А. Математическое моделирование процессов, протекающих при получении пористых композиционных материалов, формировании покрытий / Д. А. Губайдуллин, В. Л. Федяев, И. В. Моренко. – Текст : непосредственный // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 1–12.
12. Formation of polymeric powder coatings / V. L. Fedyayev, E. R. Galimov, N. Ya. Galimova [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 240. – P. 012014.
13. Высокоэффективные технологии и оборудование для получения полимерных порошковых покрытий / Э. Р. Галимов, Э. Е. Тукбаев, В. Л. Федяев [и др.]. – Казань : АН РТ, 2016. – 252 с. – Текст : непосредственный.
14. Протасов, В. Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности / В. Н. Протасов. – Москва : Недра, 1985. – 192 с. – Текст : непосредственный.
15. Басин, В. Е. Адгезионная прочность / В. Е. Басин. – Москва : Химия, 2001. – 208 с. – Текст : непосредственный.
16. Сухарев, Л. А. Долговечность полимерных покрытий / Л. А. Сухарев. – Москва : Химия, 1984. – 240 с. – Текст : непосредственный.

17. Суходоля, А. В. Современные подходы к прогнозированию долговечности лакокрасочных покрытий строительных и дорожных машин / А. В. Суходоля, Н. В. Одинокова. – Текст : непосредственный // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 5. – С. 26–29.

18. Исследования стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В. Т. Ерофеев, И. В. Смирнов, П. В. Воронов [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11. – С. 911–924.

19. Хог, Э. Прикладное оптимальное проектирование / Э. Хог, Я. Арора. – Москва : Мир, 1983. – 478 с. – Текст : непосредственный.

20. Ахмадиев, Ф. Г. Математическое моделирование и методы оптимизации : учебное пособие / Ф. Г. Ахмадиев, Р. М. Гильфанов. – Казань : Издательство Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2017. – 178 с. – Текст : непосредственный.