

УДК: 678.019

DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_135

**МОДЕЛЬ НОРМИРОВАНИЯ РАЗМЕРА ДЕФЕКТА
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ ПО ПРОЧНОСТИ,
УЧИТЫВАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЕГО НАНЕСЕНИЯ
НА ТЕХНИКУ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**A MODEL FOR NORMALIZING THE SIZE OF A FUNCTIONAL COATING
DEFECT IN STRENGTH, TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNOLOGICAL
MODE OF ITS APPLICATION TO SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT**

Канд. техн. наук А.Ю. Андрияшкин, Е.А. Изюмова, М.У. Рустамова

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, E.A. Izyumova, M.U. Rustamova

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

Показатели качества функционального покрытия техники специального назначения обусловлены его дефектностью. Выделены нормируемые размеры дефекта, определяющие состояние покрытия: максимальный размер дефекта, не приводящий к отказу; максимальный размер дефекта, не приводящий к предельному состоянию; максимальный размер дефекта, не влияющий на показатель качества покрытия. Разработана линейная модель нормирования размера дефекта покрытия по прочности. Модель показывает взаимосвязь размера дефекта покрытия с вероятностью наступления опасного события (отказ, предельное состояние). Рассмотрено влияние технологических режимов нанесения покрытия на нормирование размера по прочности. При оптимальном технологическом режиме нанесения покрытия коэффициент вариации прочности минимален и состоянию отказа соответствует максимальный размер дефекта.

Ключевые слова: функциональное покрытие, прочность, дефектность, нормирование, отказ, предельное состояние, технологический режим.

The quality indicators of the functional coating of special-purpose equipment are due to its defect. The normalized defect sizes that determine the condition of the coating are highlighted: the maximum defect size that does not lead to failure; the maximum defect size that does not lead to a limiting condition; the maximum defect size that does not affect the coating quality indicator. A linear model of normalizing the size of the coating defect in strength has been developed. The model shows the relationship between the size of the coating defect and the probability of a dangerous event (failure, limit state). The influence of technological modes of coating application on the normalization of size by strength is considered. With the optimal technological mode of coating, the coefficient of strength variation is minimal and the maximum size of the defect corresponds to the state of failure.

Keywords: functional coating, strength, defectiveness, rationing, failure, limit condition, technological mode.

В современной технике специального назначения (ТСН) применяются различные функциональные покрытия (ФП). ФП обладает комплексом свойств, обеспечивающим высокую надежность ТСН. Выбор ФП для конкретного образца ТСН основывается на анализе свойств ФП и их соответствия условиям эксплуатации, то есть ФП имеет целевое назначение: химически-, термо-, морозо-, огне-, радиационностойкое, антифрикционное, антиадгезионное, демпфирующее, камуфляжное и прочие. Качество ФП характеризуется большим числом показателей: прочность, водопоглощение, тепло- и электропроводность, износостойкость, коррозионная стойкость и другие.

Нанесенное на ТСН ФП имеет значения показателей качества, обеспечивающие его работоспособность при введении ТСН с ФП в эксплуатацию. Значения показателей качества ФП обусловлены его дефектностью, которая определяется конкретным технологическим режимом способа формирования ФП. Производственные дефекты (трещины, поры, раковины, расслоения) по-разному влияют на различные показатели качества, при этом размеры производственных дефектов не превышают нормативных значений, что обеспечивает нахождение контролируемых показателей качества в заданных технических требованиями границах.

В процессе эксплуатации ТСН из-за остаточных напряжений, внешних воздействий, старения материала и других факторов дефекты ФП увеличиваются в размерах, что приводит к изменению значений показателей качества и изменению состояния ФП. При достижении дефектностью ФП установленного нормативного значения происходит отказ по определенному показателю качества, заключающийся в нарушении его работоспособного состояния. Дальнейшее увеличение дефектности приводит ФП в предельное состояние, при котором дальнейшая эксплуатация ТСН с неработоспособным ФП недопустима или нецелесообразна. При достижении ФП предельного состояния из-за недопустимого отклонения показателей качества от нормативов дальнейшая эксплуатация ТСН должна быть прекращена вследствие неустранимого нарушения требований безопасности [1–7].

Одним из важных показателей качества ФП является прочность, обуславливающая необхо-

димый уровень надежности ТСН с ФП. Поэтому актуальна разработка модели нормирования размера дефекта ФП по прочности.

Обоснование норм дефектности функционального покрытия техники специального назначения

Дефектность ФП является интегральным показателем и учитывает одновременно величину, количество, виды и типы дефектов путем их приведения к эквивалентному относительно размеру (эквивалентной площади, длине или другому аналогичному показателю). Для простоты вместо производственной дефектности будем рассматривать производственный дефект с размером x . Размер дефекта x увеличивается и изменяется от производственного дефекта, имеющего размер, не влияющий на рассматриваемый показатель качества в начале эксплуатации, до опасного дефекта, имеющего размер, приводящий к отказу или к предельному состоянию ФП в конце эксплуатации [8–10].

Выделим нормируемые размеры дефекта, определяющие состояние ФП:

$X_{отк}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий к отказу по определенному показателю качества ФП;

$X_{пред}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий к предельному состоянию ФП по определенному показателю качества;

$X_{гар}$ — максимальный размер дефекта, не влияющий на показатель качества покрытия.

Дефекты ФП с размерами $x > X_{отк}$ влияют на надежность ТСН (наступает отказ), а с размерами $x > X_{пред}$ — на безопасность ТСН (наступает предельное состояние). Можно выделить значения допустимой вероятности опасного события по определенному показателю качества $[V_k]$, в частности $[V_{котк}]$ по надежности и $[V_{кпред}]$ по безопасности:

1) вероятность отказа по k -му показателю качества ФП $V_{котк} \leq [V_{котк}]$, где $[V_{котк}]$ — допустимая вероятность отказа по k -му показателю качества ФП;

2) вероятность возникновения опасного состояния по k -му показателю качества ФП $V_{кпред} \leq [V_{кпред}]$, где $[V_{кпред}]$ — допустимая вероятность возникновения предельного состояния по k -му показателю качества ФП.

Обычно для ФП допускаемая вероятность отказа составляет $[V_{\text{отк}}] = 10^{-2}-10^{-4}$, а допускаемая вероятность возникновения предельного состояния $[V_{\text{пред}}] = 0,5$.

Модель нормирования размера дефекта функционального покрытия по прочности

Рассмотрим линейную модель нормирования размера дефекта ФП по прочности (рис. 1) [8–10].

На этапе нанесения ФП его прочность изменяется в определенном диапазоне, значение производственной прочности обусловлено технологией изготовления и заданными технологическими параметрами. Готовое ФП имеет производственную прочность в диапазоне $\sigma_{0\min} \leq \sigma_{0\text{нач}} \leq \sigma_{0\text{max}}$, где $\sigma_{0\min}$, $\sigma_{0\text{нач}}$, $\sigma_{0\text{max}}$ — минимальная, начальная и максимальная производственная прочность ФП, Па. Примем, что изменение производственной прочности ФП подчинено нормальному закону распределения, тогда влияние технологии нанесения ФП на его прочность характеризуется коэффициентом вариации:

$$v_{\sigma} = \frac{1}{b_{\sigma}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{0\min}}{M_{\sigma 0}} \right), \quad (1)$$

где $M_{\sigma 0}$ — средняя производственная прочность ФП, Па; v_{σ} — коэффициент вариации прочности ФП; b_{σ} — коэффициент доверия (уровень доверия) по прочности ($b_{\sigma} = 2$ для уровня доверия 95 %; $b_{\sigma} = 3$ для уровня доверия 99,7 %).

Среднеквадратическое отклонение производственной прочности ФП $S_{\sigma 0}$:

$$S_{\sigma 0} = v_{\sigma} \cdot M_{\sigma 0}, \text{ (Па)}. \quad (2)$$

Примем допущение, что после введения ТСН с ФП в эксплуатацию прочность покрытия σ изменяется по линейному закону в зависимости от размера дефекта x :

$$\sigma = \sigma_{0\text{нач}} - u_{\sigma} \cdot x,$$

где u_{σ} — показатель, учитывающий изменение прочности в зависимости от размера дефекта, Па/м; x — размер дефекта, м.

С увеличением размера дефекта прочность ФП снижается и при размере дефекта $x > X_{\text{отк}}$

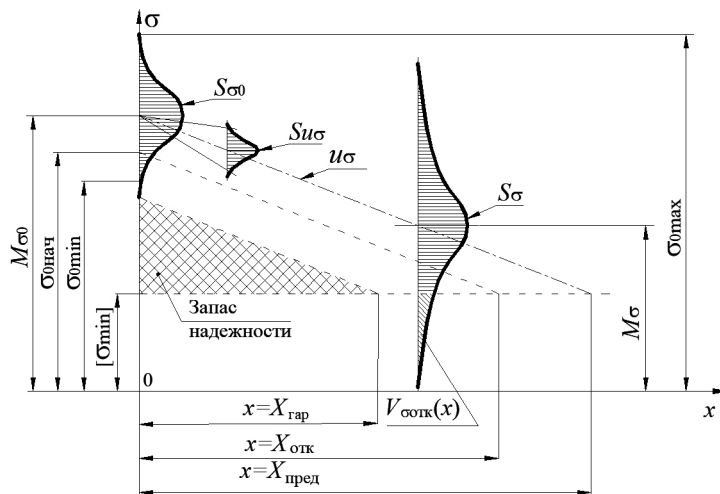


Рис. 1. Линейная модель нормирования размера дефекта по прочности ФП: $\sigma_{0\text{нач}}$ — начальная производственная прочность ФП; u_{σ} — показатель, учитывающий изменение прочности ФП в зависимости от размера дефекта; x — размер дефекта; $X_{\text{отк}}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий к отказу ФП; $X_{\text{пред}}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий к предельному состоянию ФП;

$X_{\text{гар}}$ — максимальный размер дефекта, не влияющий на прочность ФП; $[\sigma_{\min}]$ — допускаемая минимальная прочность ФП; $\sigma_{0\min}$ — минимальная производственная прочность ФП; M_{σ} — средняя прочность ФП;

$M_{\sigma 0}$ — средняя производственная прочность ФП; S_{σ} — среднеквадратическое отклонение прочности ФП;

$S_{\sigma 0}$ — среднеквадратическое отклонение производственной прочности ФП; $S_{u\sigma}$ — среднеквадратическое отклонение показателя, учитывающего изменение прочности ФП в зависимости от размера дефекта;

$V_{\text{отк}}(x)$ — вероятность отказа ФП по прочности

происходит отказ. Определим значение $X_{\text{отк}}$ из выражения:

$$X_{\text{отк}} = \frac{\sigma_{0\text{нач}} - [\sigma_{\min}]}{u_{\sigma}},$$

где $[\sigma_{\min}]$ — допускаемая минимальная прочность ФП, Па; $X_{\text{отк}}$ — размер дефекта, не приводящий к отказу ФП, м.

Если дефект имеет размер $x > X_{\text{пред}}$, то ФП находится в предельном состоянии. Определим значение $X_{\text{пред}}$ из выражения:

$$X_{\text{пред}} = \frac{M_{\sigma 0} - [\sigma_{\min}]}{u_{\sigma}}, \quad (3)$$

где $X_{\text{пред}}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий ФП в предельное состояние, м.

При эксплуатации ТСН прочность ФП распределена по нормальному закону с характеристиками:

– математическое ожидание:

$$M_{\sigma} = M_{\sigma 0} - u_{\sigma} \cdot x, \quad (4)$$

где M_{σ} — средняя прочность ФП, Па.

– среднеквадратическое отклонение:

$$S_{\sigma} = \left(S_{\sigma 0}^2 + (S_{u\sigma} \cdot x)^2 \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где S_{σ} — среднеквадратическое отклонение прочности ФП, Па; $S_{u\sigma}$ — среднеквадратическое отклонение показателя, учитывающего изменение прочности ФП в зависимости от размера дефекта, Па/м.

Значение допускаемой минимальной прочности ФП $[\sigma_{\min}]$ является границей его работоспособности, а также границей предельного состояния.

С учетом выражений (4) и (5) вероятность отказа ФП по прочности $V_{\text{отк}}(x)$:

$$V_{\text{отк}}(X_{\text{отк}} < x \leq X_{\text{пред}}) = 1 - \Phi \left(\frac{(M_{\sigma 0} - u_{\sigma} \cdot x) - [\sigma_{\min}]}{\left((S_{\sigma 0})^2 + (S_{u\sigma} \cdot x)^2 \right)^{0,5}} \right) \leq [V_{\text{отк}}], \quad (6)$$

где $[V_{\text{отк}}]$ — допускаемая вероятность отказа ФП по прочности.

Вероятность наступления предельного состояния ФП по прочности $V_{\text{спред}}(x)$:

$$V_{\text{спред}}(x > X_{\text{пред}}) = \quad (7)$$

$$= 1 - \Phi \left(\frac{(M_{\sigma 0} - u_{\sigma} \cdot x) - [\sigma_{\min}]}{\left((S_{\sigma 0})^2 + (S_{u\sigma} \cdot x)^2 \right)^{0,5}} \right) \leq [V_{\text{спред}}],$$

где $[V_{\text{спред}}]$ — допускаемая вероятность наступления предельного состояния ФП по прочности.

По значению минимальной производственной прочности ФП можно рассчитать запас надежности:

$$K_{\text{н}} = \frac{\sigma_{0\min} - u_{\sigma} \cdot x}{[\sigma_{\min}]}, \quad (8)$$

где $K_{\text{н}}$ — коэффициент запаса надежности.

Запас надежности уменьшается по мере увеличения размера дефекта, и не влияющий на прочность ФП максимальный размер дефекта может быть рассчитан из выражения (8) при условии $x = X_{\text{гар}}$ при $K_{\text{н}} = 1$:

$$X_{\text{гар}} = \frac{\sigma_{0\min} - [\sigma_{\min}]}{u_{\sigma}}, \quad (9)$$

где $X_{\text{гар}}$ — максимальный размер дефекта, не влияющий на прочность ФП, м.

Таким образом, предложенная модель показывает взаимосвязь между размером дефекта ФП и вероятностью наступления опасного события (отказ, предельное состояние).

Влияние технологических режимов нанесения функционального покрытия на нормирование размера дефекта по прочности

По разработанной модели проведем нормирование размера дефекта ФП по прочности. Рассмотрим нанесение ФП, например, газодинамическим напылением при трех различных технологических режимах. Технологический режим — это совокупность технологических параметров, определяющих показатели качества ФП. При газодинамическом напылении ФП к контролируемым технологическим параметрам относят расход и температуру напыляемой композиции, расход распыляющего газа, расстояние от распылителя до покрываемой поверхности, диаметр пятна напыления и прочие. При оптимальном сочетании технологических параметров дефектность ФП минимальна, что выражается

в минимальном коэффициенте вариации его прочности. Технологический режим газодинамического напыления, при котором коэффициент вариации прочности минимален, является оптимальным. Другие технологические режимы напыления, обеспечивающие больший коэффициент вариации прочности, являются не оптимальными.

Прочность ФП распределена по нормальному закону, при этом для всех трех случаев средняя прочность ФП одинакова $M_{\sigma 0} = \text{const}$, а из-за разных технологических режимов напыления минимальная начальная прочность ФП $\sigma_{0\text{min}}$ различна. В первом случае технологический режим напыления ФП обеспечивает минимальный разброс прочности (оптимальный режим), во втором — средний разброс прочности, в третьем — максимальный разброс прочности. Чем больше разброс прочности, тем минимальная производственная прочность ФП ниже, то есть $\sigma_{0\text{min}1} > \sigma_{0\text{min}2} > \sigma_{0\text{min}3}$. Оценим нормированные значения размера дефекта ФП при следующих исходных данных:

- средняя производственная прочность ФП: $M_{\sigma 0} = 10,0$ МПа;
- коэффициент доверия (уровень доверия) по прочности $b_{\sigma} = 3$;
- минимальная производственная прочность ФП: $\sigma_{0\text{min}1} = 9,0$ МПа; $\sigma_{0\text{min}2} = 7,0$ МПа; $\sigma_{0\text{min}3} = 5,0$ МПа;
- допускаемая минимальная прочность ФП $[\sigma_{\text{min}}] = 4,0$ МПа;

– показатель, учитывающий изменение прочности в зависимости от размера дефекта $u_{\sigma} = 2,0$ МПа/мм;

– среднее квадратическое отклонение показателя, учитывающего изменение прочности ФП в зависимости от размера дефекта $S_{u_{\sigma}} = 0,05$ МПа/мм;

– допускаемая вероятность отказа ФП по прочности: $[V_{\text{отк}}] = 10^{-2}$;

– допускаемая вероятность возникновения предельного состояния ФП по прочности $[V_{\text{пред}}] = 0,5$.

По выражению (1) получены значения коэффициента вариации прочности ФП для рассматриваемых трех технологических режимов напыления: $v_{\sigma 1} = 0,033$; $v_{\sigma 2} = 0,100$; $v_{\sigma 3} = 0,167$.

По выражению (2) получены значения среднего квадратического отклонения производственной прочности ФП: $S_{\sigma 01} = 0,33$; $S_{\sigma 02} = 1,00$; $S_{\sigma 03} = 1,67$.

По выражению (3) определим максимальный размер дефекта, не приводящий ФП в предельное состояние: $X_{\text{пред}} = 3,0$ мм.

По выражению (7) определим максимальный размер дефекта, не влияющий на прочность ФП: $X_{\text{гар}1} = 2,50$ мм; $X_{\text{гар}2} = 1,50$ мм; $X_{\text{гар}3} = 0,50$ мм.

По выражениям (6) и (7) оценим вероятность наступления опасного события V_{σ} по прочности от размера дефекта ФП x для трех технологических режимов напыления (рис. 2).

При допускаемой вероятности отказа ФП по прочности: $[V_{\text{отк}}] = 10^{-2}$ размер дефекта,

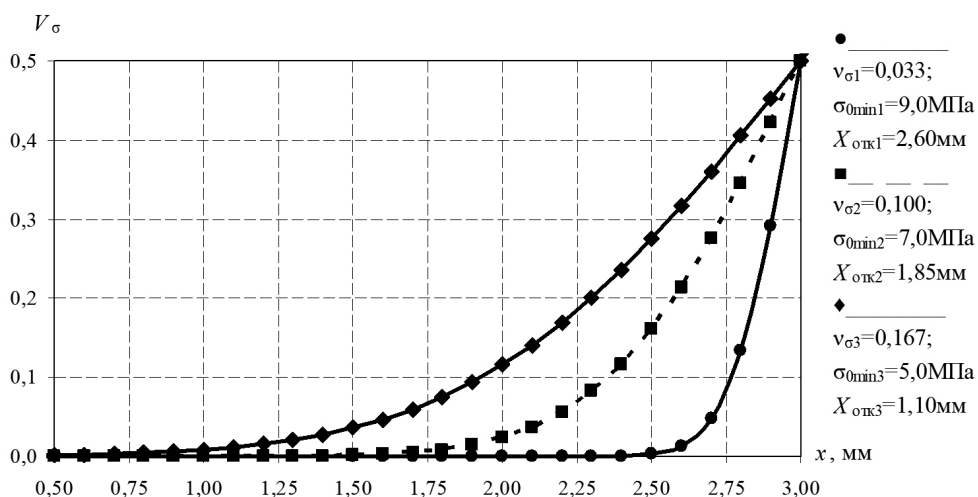


Рис. 2. Вероятность наступления опасного события по прочности V_{σ} от размера дефекта x ФП

не приводящий к отказу ФП: $X_{отк1} = 2,60$ мм; $X_{отк2} = 1,85$ мм; $X_{отк3} = 1,10$ мм.

При допускаемой вероятности возникновения предельного состояния ФП по прочности $[V_{спред}] = 0,5$ для трех технологических режимов напыления максимальный размер дефекта, не приводящий ФП в предельное состояние $X_{спред} = 3,0$ мм.

Таким образом, чем меньше значение коэффициента вариации прочности ФП, тем при большем значении размера дефекта наступает отказ ФП по прочности. Поэтому нанесение ФП на ТСН при оптимальном технологическом режиме обеспечивает повышение ее надежности.

Выводы

Работоспособность ТСН обусловлена значениями показателей качества ФП, которые зависят от его дефектности.

К опасным событиям при эксплуатации ТСН относятся отказ ФП и наступление предельного состояния ФП по определенному показателю качества. Основным показателем качества ФП, определяющим его работоспособность, является прочность.

К нормируемым размерам дефекта, определяющим состояние ФП, относятся: $X_{отк}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий к отказу по определенному показателю качества ФП; $X_{спред}$ — максимальный размер дефекта, не приводящий к предельному состоянию ФП по определенному показателю качества; $X_{гар}$ — максимальный размер дефекта, не влияющий на показатель качества покрытия.

Разработана модель нормирования размера дефекта ФП по прочности, которая показывает взаимосвязь между размером дефекта ФП и вероятностью наступления опасного события (отказ, предельное состояние).

Влияние технологического режима нанесения ФП на нормирование размера дефекта по прочности заключается в том, что чем меньше значение коэффициента вариации прочности ФП, тем при большем значении размера дефекта наступает отказ ФП по прочности. Нанесение ФП на ТСН при оптимальном технологическом режиме обеспечивает повышение ее надежности.

Литература

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. — СПб.: Наука. 2014. 412 с.
2. Ратнер С.Б., Ярцев В.П. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? — М.: Химия, 1992. 320 с.
3. Ярцев В.П., Киселёва О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации: учебное пособие. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 124 с.
4. Логанина В.И. Анализ видов и последствий отказа защитно-декоративных покрытий строительных конструкций // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2016. № 1 (2). С. 68–72.
5. Савич Е.К., Антипов Д.В. Повышение качества покрытий, нанесенных методом газотермического плазменного напыления на детали газотурбинных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 554–560.
6. Нечаев Л.М., Фомичева Н.Б., Канунникова И.Ю. Анализ причин отказов деталей металлообрабатывающего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 202–205.
7. Бышов Н.В., Ушанев А.И. Оценка вероятности растрескивания покрытия поверхности техники с учетом изменчивости его толщины // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2017. № 3 (35). С. 119–122.
8. Андриюшкин А.Ю., Кадочникова Е.Н., Афанасьев Е.О. Модель влияния дефекта на вероятность возникновения отказа изоляционного покрытия трубопровода по параметру прочности // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 2. С. 11–15.
9. Андриюшкин А.Ю., Кадочникова Е.Н. Модель влияния размера дефекта на вероятность возникновения отказа изоляционного покрытия трубопровода по параметру водопоглощение // Журнал «Проблемы управления

рисками в техносфере». — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 2020. № 3 (55). С. 72–76.

10. Андриюшкин А.Ю. Применение сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для снижения вероятности отказа многослойных функциональных покрытий: монография. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2021. 258 с.

References

1. Anastasiadi, G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality Management of industrial products. — SPb.: Nauka, 2014. 412 p.

2. Ratner S.B., Yartsev V.P. Physical mechanics of plastics. How do they predict performance? — M.: Chemistry, 1992. 320 p.

3. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Forecasting the behavior of building materials under unfavorable operating conditions: a textbook. — Tambov: Publishing House of the Tambov State Technical University. un-ta, 2009. 124 p.

4. Loganina V.I. Analysis of types and consequences of failure of protective and decorative coatings of building structures // Bulletin of PGUAS: construction, science and education. 2016. № 1 (2). Pp. 68–72.

5. Savich E.K., Antipov D.V. Improving the quality of coatings applied by the method of gas-thermal plasma spraying on parts of gas turbine engines // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. № 5. Pp. 554–560.

6. Nechaev L.M., Fomicheva N.B., Kanunnikova I.Y. Analysis of the causes of failures of metalworking tool parts // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2016. № 8-2. Pp. 202–205.

7. Byshov N.V., Ushanev A.I. Assessment of the probability of cracking of the coating of the surface of equipment, taking into account the variability of its thickness // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2017. № 3 (35). Pp. 119–122.

8. Andryushkin A.Yu., Kadochnikova E.N., Afanasyev E.O. Model of the effect of a defect on the probability of failure of the insulating coating of the pipeline according to the strength parameter // Scientific and analytical journal «Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia». — St. Petersburg. St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, 2020. № 2. P. 11–15.

9. Andryushkin A.Yu., Kadochnikova E.N. Model of the effect of the defect size on the probability of failure of the insulating coating of the pipeline according to the water absorption parameter // Journal «Problems of risk management in the technosphere». — St. Petersburg: Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020. № 3 (55). Pp. 72–76.

10. Andryushkin A.Yu. Application of supersonic gas dynamic spraying with multi-jet gas supply to reduce the probability of failure of multilayer functional coatings: Monograph. — St. Petersburg: BSTU «VOENMEH», 2021. 258 p.