

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_119

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ
МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ЕГО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕФЕКТНОСТИ**

**THEORETICAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE
STRUCTURE OF A MULTILAYER COATING OF SPECIAL-PURPOSE
EQUIPMENT, TAKING INTO ACCOUNT ITS MANUFACTURING DEFECTS**

Канд. техн. наук А.Ю. Андрюшкин, Н.Ю. Хмелевской, А.Н. Шишленин

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, N.Yu. Khmelevskoy, A.N. Shishlenin

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

Надежность и живучесть техники специального назначения зависит от качества нанесенных на нее покрытий. Повышение качества покрытия достигается его послойным формированием из единичных слоев малой толщины. Производственная дефектность многослойного покрытия зависит от параметров структуры: число единичных слоев, и толщина единичного слоя. Проведено нормирование производственных дефектов покрытий. Предложена методика оценки производственной дефектности покрытия с учетом опасности дефектов различного вида. Разработан стохастический механизм образования дефектов в покрытии. Получены выражения для теоретического определения параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности. Показано влияние производственной дефектности покрытия на число единичных слоев и толщину единичного слоя.

Ключевые слова: многослойное покрытие, производственная дефектность, дефект, нормирование, отказ, предельное состояние.

The reliability and survivability of special-purpose equipment depends on the quality of the coatings applied to it. Improving the quality of the coating is achieved by its layer-by-layer formation from single layers of small thickness. The production defectiveness of a multilayer coating depends on the structure parameters: the number of single layers and the thickness of a single layer. Standardization of production defects in coatings was carried out. A method for assessing the production defectiveness of a coating is proposed, taking into account the danger of various types of defects. A stochastic mechanism for the formation of defects in the coating has been developed. Expressions are obtained for the theoretical determination of the parameters of the structure of a multilayer coating, taking into account its production defects. The influence of manufacturing defects in the coating on the number of single layers and the thickness of a single layer is shown.

Keywords: multilayer coating, manufacturing defect, defect, rationing, failure, limit condition.

Для обеспечения надежности и живучести техники специального назначения широко применяются различные покрытия, показатели качест-

ва которых (прочность, водопоглощение, износостойкость, коррозионная стойкость) обусловлены производственной дефектностью. Чаще всего из-

за усадочных явлений нанесенное на основу (подложку) покрытие подвержено растяжению, при этом случайно возникающие несплошности (поры, трещины, расслоения) неравномерно распределены по объему покрытия. Таким образом, разрушение покрытия из-за развития производственных дефектов носит вероятностный характер.

Количество дефектов и их размеры обусловлены технологией формирования покрытия, а также технологическими параметрами процесса. Конкретная технология характеризуется плотностью дефектов, то есть числом производственных дефектов, образующихся в объеме покрытия. Отклонения технологических параметров от оптимальных значений приводят к росту числа дефектов, а также возрастает вероятность появления недопустимых дефектов больших размеров, обуславливающих опасное событие: отказ покрытия по определенному показателю качества или наступление предельного состояния покрытия (разрушение покрытия), приводящего технику специального назначения в неработоспособное состояние [1–5].

Различные производственные дефекты по-разному влияют на показатели качества покрытия. Пористость полимерных покрытий в 1 % снижает прочность на 5 %, а усталостную долговечность — на 50 %. Поверхностные трещины снижают статическую прочность от 5 до 50 %, разнотолщинность покрытия уменьшает прочность от 5 до 25 % [3–7].

Снизить производственную дефектность покрытия можно последовательным нанесением на основу (подложку) единичных слоев, толщиной $H_{сл}$, достигая необходимой толщины покрытия (рис. 1):

$$H_{пок} = N_{сл} \cdot H_{сл}, \quad (1)$$

где $H_{пок}$ — толщина покрытия, м;

$N_{сл}$ — число единичных слоев, шт.;

$H_{сл}$ — толщина единичного слоя, м.

При формировании единичного слоя размер дефекта не может превышать его толщину. Кроме того, при нанесении последующего слоя материалом заполняются поверхностные дефекты (поры, трещины, сколы) предыдущего слоя. В многослойном покрытии вероятность появления недопустимых крупных дефектов уменьшается с увеличением числа единичных слоев. Поэтому актуально теоретическое определение

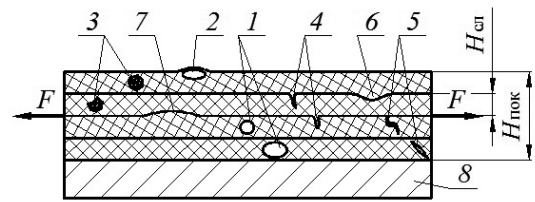


Рис. 1. Дефекты многослойного покрытия:
1 — пора; 2 — вздутие; 3 — инородное включение;
4 — поверхностная трещина; 5 — внутренняя трещина; 6 — вмятина; 7 — наплыв;
8 — подложка (основа); $H_{пок}$ — толщина покрытия;
 $H_{сл}$ — толщина единичного слоя;
 F — сила, растягивающая покрытие

параметров структуры (число единичных слоев и толщина единичного слоя) многослойного покрытия техники специального назначения с учетом его производственной дефектности.

Цель исследования: установление влияния производственной дефектности на структуру многослойного покрытия.

Задачи исследования.

1. Нормирование дефектов и оценка производственной дефектности покрытия.
2. Оценка опасности производственных дефектов различного вида.
3. Разработка стохастического механизма образования дефектов в покрытии.
4. Определение параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности.

Нормирование дефектов и оценка производственной дефектности покрытия

Рассмотрим производственный дефект с характерной площадью s . Введем множество нормированных значений размеров производственного дефекта $S_{норм}$, определяющих состояние покрытия, $S_{норм} = \{S_{гар}, S_{отк}, S_{пред}\}$ [8, 9]:

— при размере $s \leq S_{гар}$, где $S_{гар}$ — максимальная площадь дефекта, не влияющая на показатели качества покрытия;

— при $S_{гар} < s \leq S_{отк}$ размер дефекта находится в поле допуска, его наличие не приводит к отказу покрытия, где $S_{отк}$ — максимальная площадь дефекта, не приводящая к отказу покрытия по определенному показателю качества;

— при $S_{отк} < s \leq S_{пред}$ наблюдается отказ покрытия по показателю качества, но оно не переходит

в предельное состояние, где $S_{\text{пред}}$ — максимальная площадь дефекта, не приводящая к предельному состоянию покрытия по показателю качества;

– при $S_{\text{пред}} < s$ наблюдается предельное состояние покрытия по показателю качества, эксплуатация техники специального назначения с таким покрытием опасна и нецелесообразна.

Дефект с размерами $S_{\text{отк}} < s \leq S_{\text{пред}}$ влияет на надежность техники специального назначения (наступает отказ), а с размерами $s > S_{\text{пред}}$ — на безопасность и живучесть техники специального назначения (наступает предельное состояние). При формировании покрытия производственный дефект с размером $S_{\text{отк}} < s$ является недопустимым.

При большой площади покрытия его контроль проводят, предварительно разбив ее на одинаковые контролируемые участки (рис. 2) [8, 9]:

$$S_{\text{уч}} = \frac{S_{\text{пок}}}{N_{\text{уч}}},$$

где $S_{\text{пок}}$ — площадь всего покрытия, м²;

$S_{\text{уч}}$ — площадь одного участка покрытия, м²;

$N_{\text{уч}}$ — число участков покрытия, шт.

При нарушении технологии формирования покрытия обычно возникают множественные производственные дефекты определенного вида, например, область, состоящая из множества пор. Если расстояние между дефектами $L_{\text{мдеф}}$ меньше трехкратного максимального размера самого крупного дефекта, то эти множественные дефек-

ты рассматриваются как один групповой дефект. Если расстояние между дефектами $L_{\text{мдеф}}$ больше трехкратного максимального размера самого крупного дефекта, то дефекты рассматриваются отдельно, как два дефекта (рис. 2). В зависимости от расстояния между дефектами их разбивают на единичные и групповые дефекты [8, 9]:

$$N_{\text{деф}} = N_{\text{едеф}} + N_{\text{гдеф}},$$

где $N_{\text{деф}}$ — число производственных дефектов в покрытии, шт.;

$N_{\text{едеф}}$ — число единичных производственных дефектов, шт.;

$N_{\text{гдеф}}$ — число групповых производственных дефектов, шт.

Далее находят площадь каждого единичного $S_{\text{едеф}}$ и каждого группового дефекта $S_{\text{гдеф}}$ [8, 9]:

$$S_{\text{гдеф}} = L_{\text{деф}} \cdot B_{\text{деф}},$$

где $S_{\text{гдеф}}$ — площадь группового производственного дефекта определенного вида, м²;

$L_{\text{деф}}, B_{\text{деф}}$ — длина и ширина группового дефекта, равная расстоянию между двумя наиболее удаленными дефектами в рассматриваемом направлении.

Производственная дефектность покрытия (рис. 2) [9]:

$$g_{\text{деф}} = \frac{1}{N_{\text{уч}}} \cdot \sum_i^{N_{\text{уч}}} g_{\text{деф уч}} \leq [g_{\text{деф}}],$$

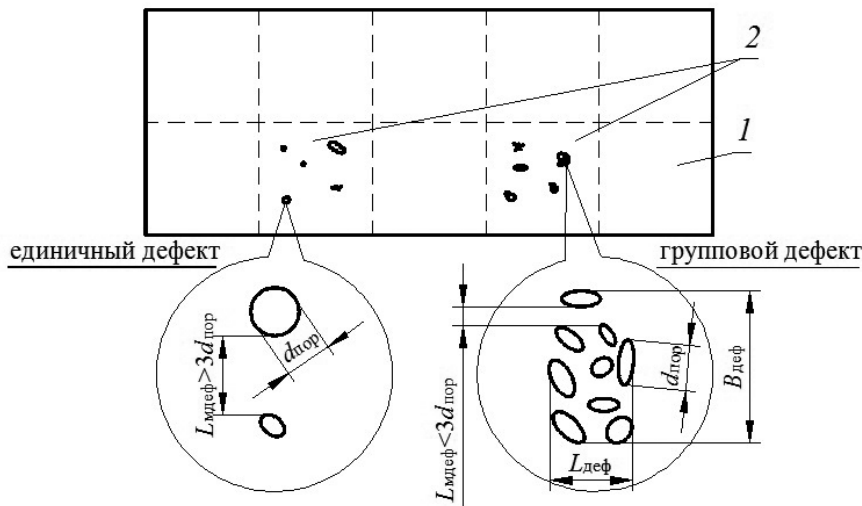


Рис. 2. Схема разбивки покрытия на контрольные участки: $d_{\text{пор}}$ — диаметр наибольшей поры; $L_{\text{мдеф}}$ — расстояние между соседними дефектами; 1 — контролируемый участок; 2 — участок с дефектами

где $g_{\text{деф}}$ — производственная дефектность покрытия;

$g_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ — производственная дефектность участка;

$[g_{\text{деф}}]$ — допускаемая производственная дефектность покрытия.

Производственная дефектность участка [9]:

$$g_{\text{деф}_{\text{уч}}} = \sum_i^{N_{\text{вд}}} (g_{\text{деф}_{\text{вд}}} \cdot k_{\text{опас}_{\text{вд}}}), \quad (2)$$

где $g_{\text{деф}_{\text{вд}}}$ — производственная дефектность определенного вида на участке;

$N_{\text{вд}}$ — число видов производственных дефектов на участке;

$k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$ — коэффициент опасности, характеризующий вид производственного дефекта.

Производственная дефектность определенного вида на участке $g_{\text{деф}_{\text{вд}}}$ [9]:

$$g_{\text{деф}_{\text{вд}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{сдеф}}} S_{\text{сдеф}_i} + \sum_{j=1}^{N_{\text{гдеф}}} S_{\text{гдеф}_j}}{S_{\text{уч}}} = \frac{S_{\text{деф}_{\text{уч}}}}{S_{\text{уч}}},$$

где $g_{\text{деф}_{\text{вд}}}$ — производственная дефектность определенного вида на участке;

$S_{\text{сдеф}}$ — площадь единичного производственного дефекта определенного вида, м^2 ;

$S_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ — площадь производственных дефектов определенного вида на участке, м^2 .

Определяемая по выражению (2) производственная дефектность участка $g_{\text{деф}_{\text{уч}}}$ учитывает размеры, количество, виды производственных дефектов, а также их опасность, путем приведения к эквивалентной относительной площади (эквивалентной относительной длине или объему или другому аналогичному показателю).

Далее выявляют участок с максимальной производственной дефектностью $g_{\text{деф}_{\text{уч}}}^{\text{max}}$, при этом покрытие можно считать годным, если

$$g_{\text{деф}_{\text{уч}}}^{\text{max}} \leq [g_{\text{деф}_{\text{уч}}}],$$

где $[g_{\text{деф}_{\text{уч}}}]$ — допускаемая производственная дефектность участка. Если на участке выявлен один дефект, то оценивают его максимальную площадь S_{max} и сопоставляют с нормированным значением площади $S_{\text{норм}}$, должно выполняться условие $S_{\text{max}} \leq S_{\text{норм}}$ [9].

По результатам производственного контроля покрытия можно оценить объемную плотность дефектности, характеризующую конкретную технологию формирования покрытия:

$$\rho_{\text{деф}} = \frac{g_{\text{деф}}}{W_{\text{пок}}} = \frac{g_{\text{деф}}}{S_{\text{пок}} \cdot H_{\text{пок}}},$$

где $\rho_{\text{деф}}$ — объемная плотность дефектности покрытия, м^{-3} ;

$W_{\text{пок}}$ — объем покрытия, м^3 .

Таким образом, нормированы дефекты покрытий, предложена методика оценки дефектности покрытия.

Оценка опасности производственных дефектов различного вида

Опасность производственных дефектов неодинакова, вид дефекта специфически влияет на показатели качества покрытия. Например, производственные дефекты многих видов являются в той или иной мере концентраторами напряжений, но при этом их воздействие на прочность покрытия различно. Охарактеризовать опасность производственного дефекта конкретного вида можно коэффициентом опасности $k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$, входящим в выражение (2) [9].

Для нормирования опасности производственных дефектов разного вида выбирают базовый вид дефекта, например пору, и принимают ее коэффициент опасности равным единице, то есть $k_{\text{опас}_{\text{пор}}} = 1$. Зная производственную дефектность определенного вида и производственную дефектность пор, можно найти коэффициент опасности [9]:

$$k_{\text{опас}_{\text{вд}}} = \frac{g_{\text{деф}_{\text{пор}}}}{g_{\text{деф}_{\text{вд}}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{опас}_{\text{вд}}}$ — коэффициент опасности, характеризующий вид производственного дефекта;

$g_{\text{деф}_{\text{пор}}}$ — производственная дефектность пор;

$g_{\text{деф}_{\text{вд}}}$ — производственная дефектность определенного вида.

Коэффициенты опасности для пор (прямая 1) и для трещин (прямая 2), можно определить по их влиянию, например, на прочность покрытия (рис. 3).

С увеличением производственной дефектности прочность покрытия уменьшается, при этом минимально допускаемое значение прочности $[\sigma_{\min}]$ достигается для пор при дефектности $g_{\text{деф.пор}} = 20\%$, а для трещин — $g_{\text{деф.тр}} = 5\%$. Учитывая, что для пор $k_{\text{опас.пор}} = 1$, тогда коэффициент опасности для трещин $k_{\text{опас.тр}}$ определим по выражению (3):

$$k_{\text{опас.тр}} = \frac{g_{\text{деф.пор}}}{g_{\text{деф.тр}}} = \frac{20}{5} = 4.$$

Таким образом, коэффициент опасности $k_{\text{опас.ад}}$ характеризует вид производственного дефекта и позволяет оценить дефектность покрытия, в котором находятся дефекты различного вида (поры, трещины, расслоения, сколы и другие).

Стохастический механизм образования дефектов в покрытии

Предположим, что растяжению силой F подвергается покрытие с объемной плотностью дефектности $\rho_{\text{деф}}$ (рис. 1), в объеме покрытия дефекты распределены по закону редких событий или распределению Пуассона. Если в произвольном объеме W покрытия имеется хотя бы один дефект, характерный размер которого превышает нормированное значение $s > S_{\text{норм}}$, то наблюдается соответствующее событие, например, отказ покрытия $s > S_{\text{отк}}$ или наступление предельного состояния $s > S_{\text{пред}}$ (разрушение покрытия). Вероятность появления дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$ [10–16]:

$$P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}) = 1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds, \quad (4)$$

где $P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}})$ — вероятность появления дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$;

$S_{\text{норм}}$ — нормированная площадь производственного дефекта, м^2 ;

$f(s)$ — плотность вероятности распределения размеров обнаруженных производственных дефектов в покрытии.

$$\begin{aligned} V(s > S_{\text{норм}} / W) &= \sum_{N_{\text{деф}}} \left(P_{N_{\text{деф}}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))^{N_{\text{деф}}} \right) = \\ &= \sum_{N_{\text{деф}}} \frac{(\rho_{\text{деф}} \cdot W)^{N_{\text{деф}}}}{N_{\text{деф}}!} \cdot \exp(-\rho_{\text{деф}} \cdot W) \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))^{N_{\text{деф}}} = 1 - \exp\left(-(\rho_{\text{деф}} \cdot W) \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))\right), \quad (6) \end{aligned}$$

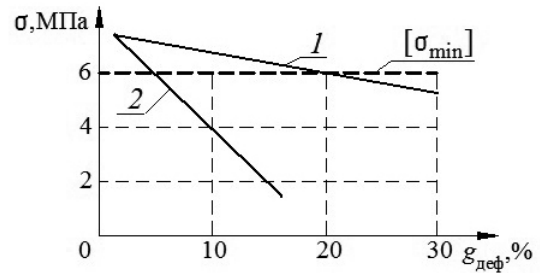


Рис. 3. Зависимость прочности покрытия от производственной дефектности определенного вида: 1 — поры; 2 — трещины;
 $g_{\text{деф}}$ — производственная дефектность;
 $[\sigma_{\min}]$ — минимально допускаемая прочность покрытия

Примем, что плотность вероятности распределения размеров обнаруженных производственных дефектов в покрытии подчиняется распределению Вейбулла [10–16]:

$$f(s) = \frac{m}{\theta} \cdot \left(\frac{s}{\theta}\right)^{(m-1)} \cdot \exp\left(-\left(\frac{s}{\theta}\right)^m\right), \quad (5)$$

где θ , m — параметр масштаба и параметр формы ($m > 0$) распределения Вейбулла.

По закону Пуассона вероятность того, что в произвольном объеме W покрытия находится $N_{\text{деф}}$ дефектов [15, 16]:

$$P_{N_{\text{деф}}} = \frac{\rho_{\text{деф}} \cdot W}{N_{\text{деф}}!} \cdot \exp(-\rho_{\text{деф}} \cdot W),$$

где $P_{N_{\text{деф}}}$ — вероятность нахождения $N_{\text{деф}}$ дефектов в произвольном объеме W покрытия.

Вероятность наличия в произвольном объеме W покрытия хотя бы одного дефекта, удовлетворяющего условию $s > S_{\text{норм}}$, равна произведению вероятностей: $P_{N_{\text{деф}}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))^{N_{\text{деф}}}$.

В произвольном объеме W покрытия может находиться различное число дефектов, тогда по формуле полной вероятности условная вероятность того, что объем W содержит, по крайней мере, один дефект с размером $s > S_{\text{норм}}$ [15–16]:

где $V(s > S_{\text{норм}}/W)$ — условная вероятность появления в произвольном объеме W покрытия дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$.

Из выражения (6) следует, что вероятность наступления в покрытии объемом W опасного события (отказ, предельное состояние) зависит от объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$, обусловленной технологией формирования покрытия, и вероятности появления дефекта с размером, превышающим нормативное значение, $P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}})$.

Условная плотность вероятности $f(s > S_{\text{норм}}/W)$ появления дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$ в произвольном объеме W покрытия представляет собой первую производную от функции условной вероятности $V(s > S_{\text{норм}}/W)$ [15, 16]:

$$\begin{aligned} f(s > S_{\text{норм}}/W) &= \frac{dV(s > S_{\text{норм}}/W)}{W} = \\ &= \rho_{\text{деф}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}})) \times \\ &\times \exp\left((- \rho_{\text{деф}} \cdot W) \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Можно рассчитать средний объем покрытия, содержащий, по крайней мере, один де-

фект с размером $s > S_{\text{норм}}$, согласно выражению (7):

$$W_{\text{ср}} = f\left(\frac{s > S_{\text{норм}}}{W}\right) \cdot W dW = \frac{1}{\rho_{\text{деф}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))}, \quad (8)$$

где $W_{\text{ср}}$ — средний объем покрытия, содержащий, по крайней мере, один дефект с размером $s > S_{\text{норм}}$, м³.

Подставим выражение (8) в выражение (6), найдем вероятность опасного события (отказ, предельное состояние) в покрытии объемом W [15, 16]:

$$V = 1 - \exp\left(-\frac{W}{W_{\text{ср}}}\right), \quad (9)$$

где V — вероятность опасного события (отказ, предельное состояние) в покрытии объемом W .

Прологарифмируем выражение (9) и найдем объем покрытия W , при котором наступает опасное событие (отказ, предельное состояние) с вероятностью V :

$$W = -W_{\text{ср}} \cdot \ln(1 - V) = \frac{-\ln(1 - V)}{\rho_{\text{деф}} \cdot (P_{\text{деф}}(s > S_{\text{норм}}))} = \frac{-\ln(1 - V)}{\rho_{\text{деф}} \cdot 1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds}. \quad (10)$$

Таким образом, по выражению (10) можно найти объем покрытия, в котором наступит опасное событие (отказ, предельное состояние) с вероятностью V , при данной технологии, характеризующейся объемной плотностью дефектности $\rho_{\text{деф}}$, при плотности вероятности распределения размеров обнаруженных производственных дефектов в покрытии $f(s)$, а также нормированных значений размеров производственного дефекта $S_{\text{норм}} = \{S_{\text{гар}}, S_{\text{отк}}, S_{\text{пред}}\}$.

Определение параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности

С учетом выражения (1) определим объемом $W_{\text{пок}}$ многослойного покрытия (рис. 1):

$$W_{\text{пок}} = S_{\text{пок}} \cdot H_{\text{пок}} = S_{\text{пок}} \cdot H_{\text{сл}} \cdot N_{\text{сл}} = W_{\text{сл}} \cdot N_{\text{сл}}, \quad (11)$$

где $W_{\text{пок}}$ — объем многослойного покрытия, м³;

$W_{\text{сл}}$ — объем единичного слоя, м³.

Для предотвращения наступления опасного события из-за появления в многослойном покрытии производственного дефекта с размером $s > S_{\text{норм}}$ необходимо выполнение условия: $W_{\text{сл}} < W$. Тогда из выражения (11) с учетом выражения (10) следует:

$$W_{\text{сл}} = \frac{W_{\text{пок}}}{N_{\text{сл}}} < \frac{-\ln(1 - V)}{\rho_{\text{деф}} \cdot 1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds}. \quad (12)$$

Разделим выражение (12) на площадь покрытия $S_{\text{пок}}$ и получим основной параметр структуры многослойного покрытия — толщину единичного слоя покрытия, при условии наличия дефектов с размером $s > S_{\text{норм}}$:

$$H_{\text{сл}}(s > S_{\text{норм}}) = \frac{H_{\text{пок}}}{N_{\text{сл}}} < \frac{-\ln(1 - V)}{S_{\text{пок}} \cdot \rho_{\text{деф}} \cdot \left(1 - \int_0^{S_{\text{норм}}} f(s) ds\right)}. \quad (13)$$

При заданной толщине покрытия $H_{\text{пок}}$ из выражения (13) определяем толщину единичного слоя, достижимую при выбранной технологии нанесения покрытия, $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}}) < H_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}})$, и число единичных слоев $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}})$:

$$N_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}}) = \frac{H_{\text{пок}}}{H_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}})}, \quad (14)$$

где $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{норм}})$ — толщина единичного слоя, достижимая при выбранной технологии нанесения покрытия, м.

Таким образом, с учетом производственной дефектности для конкретной технологии формирования многослойного покрытия определены параметры его структуры: число единичных слоев, толщина единичного слоя.

Расчет параметров структуры многослойного покрытия с учетом его производственной дефектности

Определим параметры структуры покрытия при следующих исходных данных:

- площадь покрытия $S_{\text{пок}} = 10,0 \text{ м}^2$;
- толщина покрытия $H_{\text{пок}} = 0,012 \text{ м}$;
- вероятность опасного события $V = 0,5$;
- объемная плотность дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}} = 240,0 \text{ м}^{-3}$;
- максимальная площадь дефекта, не влияющая на определенный показатель качества, $S_{\text{гар}} = 12,00 \text{ мм}^2$;
- максимальная площадь дефекта, не приводящая к отказу покрытия по определенному показателю качества, $S_{\text{отк}} = 17,45 \text{ мм}^2$;
- максимальная площадь дефекта, не приводящая к предельному состоянию покрытия по определенному показателю качества, $S_{\text{пред}} = 19,60 \text{ мм}^2$;
- параметры распределения Вейбулла: $\theta = 15$; $m = 5$.

Плотность вероятности распределения размеров обнаруженных дефектов в покрытии подчиняется распределению Вейбулла (5), тогда по выражению (4) определяем вероятность появления дефекта с размером, превышающим нормативное значение, $s < S_{\text{норм}}$:

- вероятность появления дефекта с размером $s < S_{\text{гар}}$ составляет $P_{\text{деф}}(s < S_{\text{гар}}) = 0,721$;
- вероятность появления дефекта с размером $s < S_{\text{отк}}$ составляет $P_{\text{деф}}(s < S_{\text{отк}}) = 0,119$;

- вероятность появления дефекта с размером $s < S_{\text{пред}}$ составляет $P_{\text{деф}}(s < S_{\text{пред}}) = 0,022$.

Определяем по выражениям (13) и (14) толщину единичного слоя и число слоев покрытия:

- отсутствие дефектов, влияющих на показатели качества покрытия, безопасное состояние покрытия: $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 0,41 \text{ мм}$; следовательно, $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 0,40 \text{ мм}$; $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 30 \text{ шт.}$;
- отсутствие дефектов, приводящих к отказу по показателю качества покрытия: $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 2,43 \text{ мм}$; следовательно, $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 2,40 \text{ мм}$; $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 5 \text{ шт.}$;
- отсутствие дефектов, приводящих к предельному состоянию по показателю качества покрытия: $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{пред}}) = 13,0 \text{ мм}$; следовательно, $H_{\text{сл}}(s < S_{\text{пред}}) = 12,0 \text{ мм}$; $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{пред}}) = 1 \text{ шт.}$

Анализ результатов расчета показывает, что формирование многослойного покрытия с малогабаритными дефектами $s < S_{\text{гар}}$, не влияющими на показатель качества, нетехнологично и трудоемко из-за большого числа единичных слоев $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{гар}}) = 30 \text{ шт.}$ Нанесение покрытия с дефектами, имеющими размер $s < S_{\text{отк}}$, то есть не приводящими к отказу покрытия, технологично и целесообразно, так как число единичных слоев $N_{\text{сл}}(s < S_{\text{отк}}) = 5 \text{ шт.}$

На параметры структуры многослойного покрытия существенно влияет технология его формирования, характеризуемая объемной плотностью дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$. При использованных выше исходных данных, оценим зависимость параметров структуры многослойного покрытия с дефектами, имеющими размер $s < S_{\text{отк}}$, то есть не приводящих к отказу, от объемной плотности дефектности покрытия, варьируемой в диапазоне $\rho_{\text{деф}} = 100 \div 500 \text{ м}^{-3}$. Увеличе-

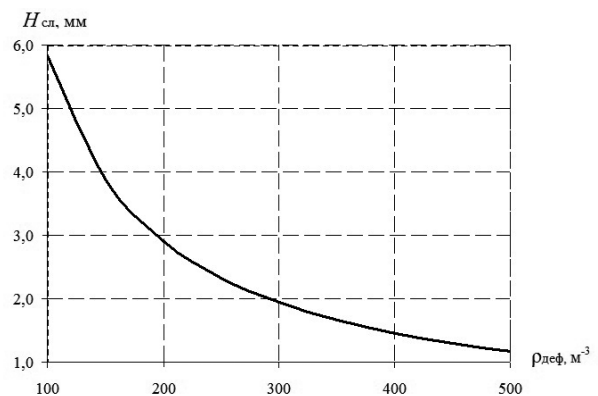


Рис. 4. Зависимость толщины единичного слоя $H_{\text{сл}}$ от объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$

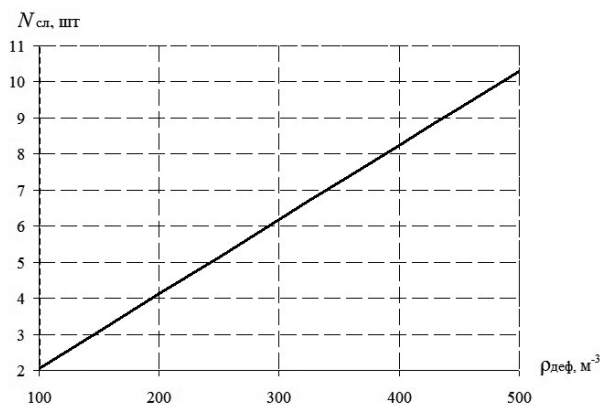


Рис. 5. Зависимость числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$ от объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$

ние объемной плотности дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$ со 100 м^3 до 500 м^3 приводит к уменьшению толщины единичного слоя в 5 раз (рис. 4) и увеличению числа единичных слоев в 5 раз (рис. 5).

Результаты расчета показывают, что объемная плотность дефектности покрытия $\rho_{\text{деф}}$, характеризующая конкретную технологию, существенно влияет на параметры структуры (толщина единичного слоя и число единичных слоев) многослойного покрытия, а следовательно, на качество покрытия.

Список источников

1. Анастасиади Г.П., Окрепилов В.В., Сильников М.В. Управление качеством промышленной продукции. СПб.: Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 2014. 412 с.
2. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2010. 103 с.
3. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2008. 334 с.
4. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
5. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушений. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
6. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций

ций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23–32.

7. Бутусова Е.Н., Мишакин В.В. Исследование влияния старения на зарождение трещин коррозионного растрескивания под напряжением малоуглеродистой стали // Вопросы материаловедения. 2019. № 2 (98). С. 102–109.

8. Нефедов С.В., Панов М.Ю., Силкин В.М., Столов В.П. Вероятностный анализ допустимых уровней дефектности участков линейной части магистральных газопроводов // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2014. № 1 (17). С. 35–40.

9. Андрияшкин А.Ю. Применение сверхзвукового газодинамического напыления при многоструйной подаче газа для снижения вероятности отказа многослойных функциональных покрытий: монография. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2021. 258 с.

10. Шульга С.Н. Методика оценки живучести и определение остаточного ресурса подкраново-подстропильных ферм с трещиноподобными дефектами // Наука и безопасность. 2014. № 4 (13). С. 2–32.

11. Насонов М.Ю. Методика оценки остаточного ресурса металлоконструкций горных машин при наличии растущих трещин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 3 (91). С. 33–36.

12. Кучерявый В.И., Власов В.П., Коновалов М.Н. Моделирование циклической трещиностойкости элементов конструкции // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2016. № 1 (3). С. 6–10.

13. Арутюнян А.Р., Арутюнян Р.А. Коррозионный рост трещин и усталостная прочность сложных технических систем // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 9 (44). С. 42–48.

14. Логанина В.И. Влияние толщины лакокрасочного покрытия на вероятность его растрескивания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Т. 23. № 2. С. 25–30.

15. Андрияшкин А.Ю., Изюмова Е.А., Богданов И.П. Теоретическая оценка влияния многослойности и однородности функционального покрытия техники специального назначения на его прочность // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 1–2 (175–176). С. 138–144.

16. Андрияшкин А.Ю., Изюмова Е.А., Романат Н. Теоретическое обоснование многослойности функционального покрытия техники специального назначения для снижения вероятности его отказа при наличии недопустимых производственных дефектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 3–4 (177–178). С. 104–108.

References

- Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality management of industrial products. St. Petersburg: St. Petersburg publishing and bookselling company Nauka, 2014. 412 p.
- Nikolaeva E.A. Fundamentals of fracture mechanics. Perm: Publishing house of Perm State Technical University, 2010. 103 p.
- Botvina L.R. Destruction: kinetics, mechanisms, general patterns. M.: Science. Institute of Metallurgy and Materials Science named after. A.A. Baikov RAS. 2008. 334 p.
- Makhutov N.A. Safety and risks: systemic research and development. Novosibirsk: Science, 2017. 724 p.
- Matvienko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
- Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 1. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials // Control. Diagnostics. 2007. No 4. Pp. 23–32.
- Butusova E.N., Mishakin V.V. Study of the influence of aging on the initiation of stress corrosion cracking cracks in low-carbon steel // Questions of materials science. 2019. No 2 (98). Pp. 102–109.
- Nefedov S.V., Panov M.Yu., Silkin V.M., Stolov V.P. Probabilistic analysis of acceptable levels of defects in sections of the linear part of main gas pipelines // Scientific and technical collection of News of Gas Science. 2014. No 1 (17). Pp. 35–40.
- Andryushkin A.Yu. The use of supersonic gas-dynamic spraying with multi-jet gas supply to reduce the probability of failure of multilayer functional coatings: Monograph. St. Petersburg: BSTU «VOENMEKH» named after D.F. Ustinov. 2021. 258 p.
- Shulga S.N. Methodology for assessing survivability and determining the residual life of crane-rafter trusses with crack-like defects // Science and safety. 2014. No 4 (13). Pp. 2–32.
- Nasonov M.Yu. Methodology for assessing the residual life of metal structures of mining machines in the presence of growing cracks // Bulletin of Kuzbass State Technical University. 2012. No 3 (91). Pp. 33–36.
- Kucheryavyi V.I., Vlasov V.P., Kononov M.N. Modeling of cyclic crack resistance of structural elements // Resources of the European North. Technologies and economics of development. 2016. No 1 (3). Pp. 6–10.
- Harutyunyan A.R., Harutyunyan R.A. Corrosion crack growth and fatigue strength of complex technical systems // Engineering and Construction Journal. 2013. No 9 (44). Pp. 42–48.
- Loganina V.I. The influence of the thickness of the paint coating on the probability of its cracking // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture. 2023. Vol. 23. No 2. Pp. 25–30.
- Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Bogdanov I.P. Theoretical assessment of the influence of multilayering and homogeneity of the functional coating of special-purpose equipment on its strength // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 1–2 (175–176). Pp. 138–144.
- Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Romanat N. Theoretical justification for multi-layer functional coating of special-purpose equipment to reduce the likelihood of its failure in the presence of unacceptable production defects // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 3–4 (177–178). Pp. 104–108.