

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_63

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В
МНОГОСЛОЙНОМ ПОЛИМЕРНОМ ПОКРЫТИИ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗГИБА КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ**

**THEORETICAL ASSESSMENT OF INTERNAL STRESSES
IN A MULTILAYER POLYMER COATING OF SPECIAL-PURPOSE MACHINERY
BASED ON BENDING OF A CANTILEVER BEAM**

Канд. техн. наук А.Ю. Андрюшкин, М.И. Разнометов

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, M.I. Raznometov

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Внутренние напряжения существенно влияют на состояние полимерного покрытия техники специального назначения. Величина внутренних напряжений определяется усадкой, нанесенной на основу (подложку) полимерной композиции. Высокие внутренние напряжения ухудшают функциональные свойства полимерного покрытия, приводят к росту дефектности, сокращают срок его службы. Получено выражение для оценки внутренних напряжений в полимерном покрытии по радиусу изгиба консольной балки, учитывающее модули Юнга и толщины полимерного покрытия и металлической основы. Величина внутренних напряжений зависит от слоистой структуры полимерного покрытия. Проведено теоретическое определение внутренних напряжений в однослойном и многослойном полимерном покрытии одинаковой толщины по полученному выражению и по выражениям, предложенными другими исследователями. Показано, что при одинаковой толщине полимерного покрытия внутренние напряжения в шестислойном покрытии меньше на 14,7 %, чем в однослойном покрытии.

Ключевые слова: многослойное полимерное покрытие, внутренние напряжения, остаточные напряжения, структура покрытия, консольный метод, стрела прогиба.

Internal stresses significantly affect the condition of the polymer coating of special-purpose equipment. The magnitude of the internal stresses is determined by the shrinkage applied to the base (substrate) of the polymer composition. High internal stresses degrade the functional properties of the polymer coating, lead to an increase in defects, and shorten its service life. An expression is obtained for estimating the internal stresses in a polymer coating along the bending radius of a cantilever beam, taking into account the Young's modules and the thickness of the polymer coating and the metal base. The magnitude of the internal stresses depends on the layered structure of the polymer coating. The theoretical determination of internal stresses in single-layer and multilayer polymer coatings of the same thickness is carried out according to the expression obtained and according to the expressions proposed by other researchers. It is shown that with the same thickness of the polymer coating, the internal stresses in the six-layer coating are 14,7 % less than in the single-layer coating.

Keywords: multilayer polymer coating, internal stresses, residual stresses, coating structure, cantilever method, deflection boom.

Внутренние напряжения, возникающие в нанесенном на основу (подложку) полимерном покрытии, влияют на его состояние во время эксплуатации и функциональные свойства, обеспечивающие работоспособность техники специального назначения. Существенные значения внутренних напряжений повышают дефектность и снижают долговечность полимерного покрытия [1–9].

Чаще всего внутренние напряжения в полимерном покрытии оценивают экспериментально, например, консольным методом, который основан на измерении величины стрелы прогиба f (максимального прогиба) свободного конца консольно закрепленной в приспособлении упругой стальной ленты с полимерным покрытием или радиуса ее кривизны R (рис. 1) [10–17].

При измерении стрелы прогиба f консольной балки внутренние напряжения в полимерном покрытии определяются по выражению [ГОСТ 13036–67]:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{f \cdot E_{\text{ос}} \cdot H_{\text{ос}}^3}{3 \cdot L_{\text{пп}}^2 \cdot H_{\text{пп}} \cdot (H_{\text{ос}} + H_{\text{пп}})}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{вн}}$ — внутренние напряжения в полимерном покрытии, Па;

f — стрела прогиба консольной балки, м;

$E_{\text{ос}}$ — модуль Юнга стальной ленты, Па;

$H_{\text{ос}}$ — толщина стальной ленты, м;

$L_{\text{пп}}$ — длина полимерного покрытия, м;

$H_{\text{пп}}$ — толщина полимерного покрытия, м.

При измерении радиуса R изогнутой консольной балки внутренние напряжения в покрытии определяются по формуле Стонеля или Бреннер — Стендероффа [10–12]:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{E_{\text{ос}} \cdot H_{\text{ос}}^2}{6 \cdot R \cdot H_{\text{пп}}};$$

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{E_{\text{ос}}}{6 \cdot R \cdot H_{\text{пп}}} \cdot \left(H_{\text{ос}} + \left(\frac{E_{\text{пп}}}{E_{\text{ос}}} \right)^{\frac{5}{4}} \cdot H_{\text{пп}} \right), \quad (2)$$

где R — радиус изогнутой консольной балки, м;

$E_{\text{пп}}$ — модуль Юнга покрытия, Па.

Главной причиной, определяющей величину внутренних напряжений в полимерном покрытии, является усадка отверждающейся на металлической основе полимерной массы (рис. 2). Чем больше объем нанесенной полимерной массы, тем выше усадка и значительнее внутренние напряжения в покрытии. Относительная усадка полимера определяется по выражению [18, 19]:

$$\theta_o = \frac{h_{\text{ус}}}{h_{\text{пп}}},$$

где $h_{\text{ус}}$ — абсолютная усадка (величина уменьшения толщины) полимерной массы при отверждении, м;

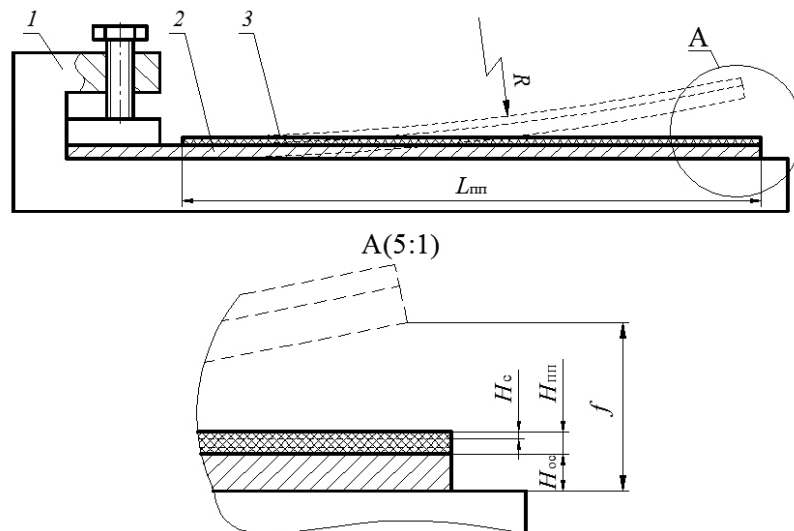


Рис. 1. Схема консольного метода оценки внутренних напряжений в полимерном покрытии по ГОСТ 13036–67:

1 — приспособление для консольного закрепления балки и оценки ее стрелы прогиба f ; 2 — стальная основа балки; 3 — полимерное покрытие балки; $L_{\text{пп}}$ — длина полимерного покрытия; $H_{\text{ос}}$ — толщина основы (стальной ленты); $H_{\text{пп}}$ — толщина многослойного полимерного покрытия; $H_{\text{с}}$ — толщина единичного слоя полимерного покрытия; f — стрела прогиба балки (максимальный прогиб); R — радиус изогнутой консольной балки

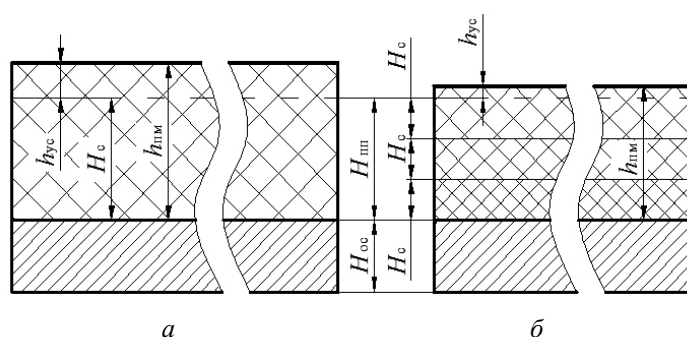


Рис. 2. Полимерное покрытие: а — однослойное; б — трехслойное; $H_{\text{пм}}$ — толщина отвержденного полимерного покрытия; $H_{\text{с}}$ — толщина отвержденного слоя полимерного покрытия; $h_{\text{пм}}$ — толщина полимерной массы; $h_{\text{ус}}$ — абсолютная усадка (величина уменьшения толщины) слоя полимерной массы при отверждении; $H_{\text{ос}}$ — толщина основы (подложки)

$h_{\text{пм}}$ — толщина полимерной массы, м;

θ_0 — относительная усадка полимера.

Уменьшить объем отверждающейся полимерной массы можно послойным нанесением покрытия необходимой толщины (рис. 2, б). В этом случае тонкий слой полимерной массы, имеющий малый объем, нанесен на ранее отвержденные полимерные слои, его усадка незначительна, и существенного прироста внутренних напряжений не происходит. Поэтому актуальна теоретическая оценка влияния слоистой структуры полимерного покрытия на величину внутренних напряжений.

Цель исследования: оценка влияния слоистой структуры полимерного покрытия на величину внутренних напряжений.

Задача исследования: теоретическое определение внутренних напряжений в многослойном полимерном покрытии при изгибе консольной балки.

Определение внутренних напряжений в полимерном покрытии по радиусу изгиба консольной балки

Нанесенная на металлическую основу полимерная масса при отверждении испытывает усадку, которой препятствует металлическая основа, что вызывает ее изгиб и соответствующие внутренние напряжения в отвержденном покрытии (рис. 1, 2). Следовательно, необходимо теоретически оценить внутренние напряжения в многослойном полимерном покрытии при изгибе консольной балки.

Для определения внутренних напряжений в многослойном полимерном покрытии рассмотрим консольно закрепленную балку, состоящую из металлической основы и нанесенного на нее многослойного полимерного покрытия (рис. 3). Введем систему координат (x, y, z) , поверхность контакта полимерного покрытия и металлической основы совместим с плоскостью xOy , а вертикальную плоскость симметрии балки — с плоскостью xOz . При соотношении размеров $B/L_{\text{пм}} \ll 1$; $H_{\text{ос}}/L_{\text{пм}} \ll 1$; $H_{\text{пм}}/L_{\text{пм}} \ll 1$ консольная балка испытывает чистый изгиб в плоскости xOz .

Для удобства все величины, относящиеся к полимерному покрытию ($z > 0$) будем отмечать индексом «1», а к металлической основе ($z < 0$) — индексом «2». Например, модуль упругости Юнга E_i ($i = 1, 2$), то есть модуль Юнга полимерного покрытия $E_{\text{пм}} = E_1$; а модуль Юнга металлической основы $E_{\text{ос}} = E_2$.

Примем, что относительная деформация материала полимерного покрытия θ_1 и металлической основы θ_2 зависят только от переменной z , то есть $\theta_i(z)$. Консольная балка находится в плоском напряженно-деформированном состоянии, характеризуемым напряжениями σ_{xi} , τ_{xzi} и перемещениями u_i , w_i [9–12]:

$$u_1 = u_2 = u(x) - z \frac{dw}{dx}, \quad w_1 = w_2 = w(x);$$

$$\sigma_{xi} = E_i \cdot \left(\frac{du}{dx} - z \frac{d^2w}{dx^2} \right) - E_i \cdot \theta_i(z); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xzi}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xzi}}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

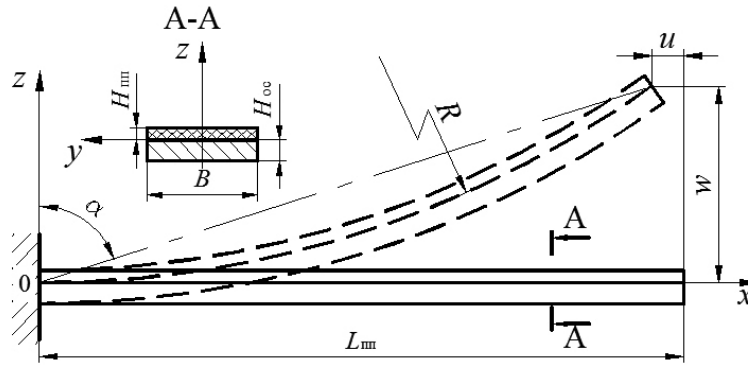


Рис. 3. Схема расчета внутренних напряжений в многослойном полимерном покрытии на основе изгиба консольно-закрепленной балки: x, y, z — координатные оси; α — угол между хордой изогнутой балки и плоскостью yOz ; u, w — перемещения свободного конца консольной балки вдоль осей x и z соответственно

$$\begin{aligned} \tau_{xz1}(z=0) &= \tau_{xz2}(z=0); \\ \tau_{xz1}(z=H_1) &= \tau_{xz2}(z=-H_2) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где u_i, w_i — проекции на неподвижные координатные оси (x, y, z) действующего смещения рассматриваемой точки балки, м;

E_i — модуль Юнга, Па;

$\theta_i(z)$ — относительная деформация материала, м;

σ_{xi} — нормальные напряжения, Па;

τ_{xzi} — касательные напряжения, Па.

Внутренние усилия, вызывающие напряжения в консольной балке:

$$\begin{aligned} N_x &= \int_0^{H_1} \sigma_{x1} dz + \int_{-H_2}^0 \sigma_{x2} dz; \\ M_x &= \int_0^{H_1} \sigma_{x1} \cdot z dz + \int_{-H_2}^0 \sigma_{x2} \cdot z dz; \\ Q_x &= \int_0^{H_1} \sigma_{xz1} dz + \int_{-H_2}^0 \sigma_{xz2} dz, \end{aligned} \quad (6)$$

где N_x — нормальное усилие, Н;

M_x — изгибающий момент, Н·м;

Q_x — перерезывающая сила, Н.

Из выражений (4) и (5) следует:

$$\frac{dN_x}{dx} = 0, \quad \frac{dM_x}{dx} = Q_x, \quad \frac{dQ_x}{dx} = 0.$$

Определим нормальное усилие и изгибающий момент через перемещения, подставив выражение (3) в формулу (6):

$$N_x = B \cdot \frac{du}{dx} - C \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} - n_0;$$

$$M_x = C \cdot \frac{du}{dx} - D \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} - m_0, \quad (7)$$

где $B = E_1 \cdot H_1 + E_2 \cdot H_2$;

$$C = 0,5 \cdot (E_1 \cdot H_1^2 - E_2 \cdot H_2^3);$$

$$D = 0,33 \cdot (E_1 \cdot H_1^3 + E_2 \cdot H_2^3);$$

$$n_0 = E_1 \cdot \int_0^{H_1} \theta_1 dz + E_2 \cdot \int_{-H_2}^0 \theta_2 dz;$$

$$m_0 = E_1 \cdot \int_0^{H_1} \theta_1 \cdot z dz + E_2 \cdot \int_{-H_2}^0 \theta_2 \cdot z dz.$$

Граничные условия на концах консольной балки:

$$x=0: u=w=\frac{dw}{dx}=0;$$

$$x=L_{\text{мп}}: N_x=M_x=Q_x=0. \quad (8)$$

Для рассматриваемого случая в выражении (7) $N_x=M_x=0$:

$$0 = B \cdot \frac{du}{dx} - C \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} - n_0;$$

$$0 = C \cdot \frac{du}{dx} - D \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} - m_0. \quad (9)$$

Тогда, с учетом граничных условий (8), из системы уравнений (9) можно определить перемещения $u(x)$ и $w(x)$:

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{m_0 \cdot C - n_0 \cdot D}{C^2 - B \cdot D} \cdot x; \\ w(x) &= 0,5 \cdot \frac{m_0 \cdot B - n_0 \cdot C}{C^2 - B \cdot D} \cdot X^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая, что перемещение конца консольной балки $u(x = L_{\text{ин}})$ мало (рис. 1, 3), то можно принять, что стрела прогиба $f \approx w(x = L_{\text{ин}})$. Тогда из имеющегося треугольника (рис. 3) можно через угол α определить радиус R изогнутой консольной балки.

Угол α между хордой изогнутой консольной балки и плоскостью yOz равен:

$$\alpha \approx \arctg\left(\frac{L_{\text{ин}}}{w(x = L_{\text{ин}})}\right),$$

где α — угол между хордой изогнутой консольной балки и плоскостью yOz , град.

Радиус R изогнутой консольной балки с учетом выражения (10):

$$R \approx \frac{0,5 \cdot (L_{\text{ин}}^2 + w(x = L_{\text{ин}})^2)^{0,5}}{\cos(\alpha)} \approx \frac{C^2 - B \cdot D}{m_0 \cdot B - n_0 \cdot C}, \quad (11)$$

где R — радиус изогнутой консольной балки, м.

Примем, что относительная деформация материала полимерного покрытия не зависит от переменной z , то есть $\theta_1(z) = \theta_0$, а относительная деформация металлической основы отсутствует, то есть $\theta_2(z) = 0$. Тогда по закону Гука внутренние напряжения в покрытии зависят только от свойств полимера:

$$\sigma_{\text{вн}} \approx -E_1 \cdot \theta_0. \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) получим:

$$\sigma_{\text{вн}} \approx \frac{1}{R} \cdot \frac{C^2 - B \cdot D}{H_1 \cdot C - 0,5 \cdot H_1^2 \cdot B}. \quad (13)$$

Таким образом, получено выражение (13) для оценки внутренних напряжений в полимерном покрытии по радиусу изгиба консольной балки, учитывающее модули Юнга и толщины полимерного покрытия и металлической основы.

Теоретическое определение внутренних напряжений в однослойном и многослойном полимерном покрытии одинаковой толщины

Проведем сравнительный расчет внутренних напряжений в однослойном и многослойном полимерном покрытии одинаковой толщины (рис. 2) при следующих исходных данных:

- толщина стальной основы $H_{\text{ос}} = 0,25$ мм;
- модуль Юнга стальной основы $E_{\text{ос}} = 196,0$ ГПа;
- длина полимерного покрытия $L_{\text{ин}} = 100,0$ мм;
- толщина полимерного покрытия $H_{\text{ин}} = 0,24$ мм;
- толщина слоя покрытия $H_{\text{с}} = 0,04$ мм;
- модуль Юнга полимера $E_{\text{ин}} = 2,2$ ГПа.

Проведен расчет внутренних напряжений по выражениям (1), (2), (13) однослойного и шестислойного полимерного покрытия. Необходимо отметить, что значения внутренних напряжений, рассчитанных по выражениям (2) Стонеля и Бреннер — Стендероффа весьма близки. Многослойное покрытие состоит из шести последовательно наносимых слоев. Каждый последующий слой наносится после усадки и отверждения предыдущего слоя (таблица).

Анализ результатов расчета показывает, что величина внутренних напряжений в многослойном покрытии существенно зависит от относительной усадки полимерной композиции, определяемой числом наносимых слоев. Значительные внутренние напряжения испытывает первый наносимый слой, в последующих слоях внутренние напряжения быстро снижаются, достигая минимума в последнем наносимом слое. При этом высокая интенсивность уменьшения внутренних напряжений наблюдается при числе слоев от 2 до 4, при числе слоев от 5 до 6 она незначительна.

По прогибу стрелы консольной балки f внутренние напряжения в шестислойном полимерном покрытии на 14,7 % меньше, чем в однослойном покрытии такой же толщины. Близкие численные результаты дают вычисления по выражениям (1) и (13). Необходимо отметить, что выражение (1) рекомендовано ГОСТ 13036–67 для оценки внутренних напряжений по результатам экспериментальных испытаний образцов. Выражения Стони и Бреннер — Стендероф-

**Результаты расчета внутренних напряжений
в однослойном и многослойном полимерном покрытии одинаковой толщины**

Параметр	Одно- слойное покрытие	Многослойное покрытие						Σ
		слой 1	слой 2	слой 3	слой 4	слой 5	слой 6	
Толщина слоя H_c , мм	0,24	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,24
Относительная усадка полимера θ_o	0,00065	0,00065	0,00033	0,00022	0,00016	0,00013	0,00011	—
Перемещения по (10) $u(x = L_{\text{пл}})$, мм	$-4,4 \cdot 10^{-3}$	$-5,4 \cdot 10^{-4}$	$-5,9 \cdot 10^{-4}$	$-6,3 \cdot 10^{-4}$	$-6,3 \cdot 10^{-4}$	$-7,0 \cdot 10^{-4}$	$-7,2 \cdot 10^{-4}$	$-3,8 \cdot 10^{-3}$
Перемещения по (10) $w(x = L_{\text{пл}}) = f$, мм	1,492	0,168	0,188	0,207	0,207	0,238	0,249	1,273
Внутр. напряжения в покрытии по (1) $\sigma_{\text{вн}}$, МПа	1,295	1,476	0,728	0,476	0,348	0,269	0,216	—
Внутр. напряжения в покрытии по (2) $\sigma_{\text{вн}}$, МПа	2,538	1,712	0,961	0,704	0,571	0,485	0,423	—
Внутр. напряжения в покрытии по (13) $\sigma_{\text{вн}}$, МПа	1,430	1,430	0,715	0,477	0,358	0,286	0,238	—

фа (2) дают более высокие значения внутренних напряжений в полимерном покрытии, чем выражение (13). Однако, с уменьшением толщины покрытия результаты вычислений по выражениям (2) и выражению (13) становятся ближе. Поэтому выражения (2) применимы для оценки внутренних напряжений в тонких покрытиях, когда $H_1 \ll H_2$.

Таким образом, снижению внутренних напряжений в полимерном покрытии способствует переход от однослойной к многослойной структуре покрытия.

Обсуждение результатов

Результаты теоретических расчетов (табл.) говорят о значительном влиянии слоистой структуры полимерного покрытия на величину внутренних напряжений. Рост числа слоев полимерного покрытия приводит к уменьшению усадки полимерной композиции и снижению внутренних напряжений. Внутренние напряжения интенсивно уменьшаются в интервале от 2 до 4 слоев. Дальнейшее увеличение числа слоев к интенсивному снижению внутренних напряжений не приводит. Результаты расчета по полученно-

му выражению (13) близки к результатам, вычисленным по эмпирическому выражению (1). Выражения (2) целесообразно использовать, если толщина полимерного покрытия значительно меньше толщины основы (подложки).

Уменьшение внутренних напряжений обуславливает долговечность многослойных покрытий, что обеспечивает надежность и живучесть техники специального назначения.

Таким образом, цель исследования достигнута — теоретически оценено влияние слоистой структуры полимерного покрытия на величину внутренних напряжений.

Список источников

1. Майсурадзе Н.В., Хозин В.Г. Пути повышения работоспособности эпоксидных полимеров // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2015. № 1 (3). С. 47–54.
2. Рогов В.Р., Анисимов В.Р., Исаченко Е.А. Направление развития технологий для повышения антикоррозионной устойчивости автотранспортных средств // Грузовик. 2019. № 8. С. 16–18.
3. Бобкова Т.И., Васильев А.Ф., Прудников И.С. и др. Функционально-градиентные по-

крытия, полученные с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. 2019. № 1 (97). С. 74–78.

4. Сергеевичев А.В., Онегин В.И. Физико-химические основы процессов формирования полимерных покрытий на твердой поверхности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 223. 2018. С. 213–227.

5. Гетманов А.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальное исследование механических свойств полимерных покрытий на образцах из алюминиевого сплава // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 72. С. 1–11.

6. Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н. Исследование адгезионной прочности полимерных дисперсно-наполненных защитных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 7 (139). С. 3–7.

7. Кирюшина В.В., Ковалева Ю.Ю., Степанов П.А., Коваленко П.В. Исследование влияния масштабного фактора на прочностные свойства полимерных композиционных материалов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019. № 1. С. 97–106.

8. Яновский Ю.Г., Валиев Х.Х., Корнев Ю.В. и др. Роль масштабного фактора при изучении механических свойств композиционных материалов с наполнителями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16, № 2. С. 291–304.

9. Барвинок В.А., Богданович В.И., Карасев В.М. Расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в многослойных покрытиях на деталях плоской формы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. № 2. С. 63–71.

10. Сироткина Н.М., Сироткина Н.С. Расчет внутренних напряжений в покрытиях на основе теории изгиба двухслойной балки // Математика. Механика. 2002. № 4. С. 222–225.

11. Долгов Н.А., Букетова Н.Н., Бесов А.В. Сравнение различных методов определения остаточных напряжений в полимерных покрытиях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 3, № 7 (57). С. 40–42.

12. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): учеб. пособие для студентов вузов. М.: Интернет Инжиниринг. 2004. 624 с.

13. Корягин С.И. Оптимизация остаточных напряжений в полимерных покрытиях // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. № 3. С. 100–104.

14. Талалай А.В., Волошкин А.Ф., Кочергин Ю.С. Внутренние напряжения в трехслойном защитном покрытии // Клеи. Герметики. Технологии. 2006. № 8. С. 23–28.

15. Газеев М.В., Ветошкин Ю.И., Газеева Е.А. Аэроионизационная сушка как способ снятия внутренних напряжений в лакокрасочных покрытиях // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 15. С. 88–90.

16. Головин В.А. Многослойные защитные полимерные покрытия. Обеспечение сплошности // Коррозия: материалы, защита. 2006. № 2. С. 28–36.

17. Кравченко И.Н., Шибкова Л.В., Шиян А.В. и др. Оценка влияния режимов напыления на уровень остаточных напряжений при послойном формировании покрытий повышенной толщины // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. № 7. С. 48–54.

18. 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.

19. 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.

References

1. Maisuradze N.V., Khozin V.G. Ways to improve the performance of epoxy polymers // Polymers in construction: scientific online journal. 2015. No 1 (3). Pp. 47–54.

2. Rogov V.R., Anisimov V.R., Isachenko E.A. The direction of technology development for improving the corrosion resistance of motor vehicles // Truck. 2019. No 8. Pp. 16–18.

3. Bobkova T.I., Vasiliev A.F., Prudnikov I.S. et al. Functional gradient coatings obtained by supersonic cold gas dynamic spraying // Questions of materials science. 2019. No 1 (97). Pp. 74–78.
4. Sergeevichev A.V., Onegin V.I. Physico-chemical foundations of the formation of polymer coatings on a solid surface // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. Issue 223. St. Petersburg: SPbGLTU, 2018. Pp. 213–227.
5. Getmanov A.G., Mamonov S.V., Martirosov M.I. et al. Experimental study of the mechanical properties of polymer coatings on aluminum alloy samples // The electronic journal «Proceedings of MAI». 2014. No 72. 1–11.
6. Radkevich M.M., Kudryavtsev V.N. Investigation of the adhesive strength of polymer dispersed-filled protective coatings // Hardening technologies and coatings. 2016. No 7 (139). Pp. 3–7.
7. Kiryushina V.V., Kovaleva Y.Y., Stepanov P.A. et al. Investigation of the influence of the scale factor on the strength properties of polymer composite materials // Izvestiya vuzov. Nuclear power engineering. 2019. No 1. Pp. 97–106.
8. Yanovsky Yu.G., Valiev H.H., Kornev Yu.V. et al. The role of the scale factor in studying the mechanical properties of composite materials with fillers // Mechanics of composite materials and structures. 2010. Vol. 16, No 2. Pp. 291–304.
9. Barvinok V.A., Bogdanovich V.I., Karasev V.M. Computational and experimental method for determining residual stresses in multilayer coatings on flat-shaped parts // Problems of mechanical engineering and automation. 2003. No 2. Pp. 63–71.
10. Sirotkina N.M., Sirotkina N.S. Calculation of internal stresses in coatings based on the theory of bending of a double-layer beam // Mathematics. Mechanics. 2002. No 4. Pp. 222–225.
11. Dolgov N.A., Buketova N.N., Besov A.V. Comparison of various methods for determining residual stresses in polymer coatings // East European Journal of Advanced Technologies. 2012. Vol. 3, No 7 (57). Pp. 40–42.
12. Bobrov G.V., Ilyin A.A. Application of inorganic coatings (theory, technology, equipment): A textbook for university students. Moscow: Internet Engineering, 2004. 624 p.
13. Koryagin S.I. Optimization of residual stresses in polymer coatings // Bulletin of the I. Kant Russian State University. 2007. No 3. Pp. 100–104.
14. Talalai A.V., Voloshkin A.F., Kochergin Yu.S. Internal stresses in a three-layer protective coating // Adhesives. Sealants. Technologies. 2006. No 8. Pp. 23–28.
15. Gazeev M.V., Vetoshkin Yu.I., Gazeeva E.A. Aeroionization drying as a way to relieve internal stresses in paint coatings // Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18, No 15. Pp. 88–90.
16. Golovin V.A. Multilayer protective polymer coatings. Ensuring continuity // Corrosion: materials, protection. 2006. No 2. Pp. 28–36.
17. Kravchenko I.N., Shibkova L.V., Shiy-an A.V. et al. Evaluation of the effect of spraying modes on the level of residual stresses during the layered formation of coatings of increased thickness // Repair. Recovery. Modernization. 2013. No 7. Pp. 48–54.
18. Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Romanat N. Theoretical substantiation of the layering of the functional coating of special-purpose equipment to reduce the likelihood of its failure in the presence of unacceptable manufacturing defects // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 3–4 (177–178). Pp. 104–108.
19. Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Bogdanov I.P. Theoretical assessment of the influence of the multilayeredness and uniformity of the functional coating of special-purpose equipment on its strength // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 1–2 (175–176). Pp. 138–144.