

УДК 667.6

doi: 10.53816/23061456_2024_11–12_152

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НАПЫЛЕННЫХ НА АЛЮМИНИЕВУЮ ОСНОВУ МНОГОСЛОЙНЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕХНИКИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF
MULTILAYER POLYMER COATINGS SPRAYED ON AN ALUMINUM BASE
FOR SPECIAL PURPOSE EQUIPMENT**

Канд. техн. наук А.Ю. Андрюшкин, В.В. Булыгин, Чжэньнин Ли

Ph.D. A.Yu. Andryushkin, V.V. Bulygin, Zhenning Li

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

Долговечность техники специального назначения обусловлена механическими свойствами нанесенного на нее полимерного покрытия. Однородность состава и структуры многослойного полимерного покрытия определяет его механические свойства. Экспериментально исследовано влияние на модуль упругости образца, состоящего из алюминиевой основы с двухсторонним многослойным полимерным покрытием, числа единичных слоев этого покрытия при растяжении. Получены эмпирические зависимости модуля упругости образца и модуля упругости полимерного покрытия от числа единичных слоев. Установлено, что при увеличении числа единичных слоев одинаковой толщины с двух до восьми модуль упругости полимерного покрытия существенно возрастает. Увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия более восьми нецелесообразно, так как к повышению модуля упругости не приводит.

Ключевые слова: многослойное полимерное покрытие, модуль упругости, механические свойства, однородность, растяжение образцов, структура покрытия.

The durability of special-purpose equipment is determined by the mechanical properties of the polymer coating applied to it. The uniformity of the composition and structure of a multilayer polymer coating determines its mechanical properties. An experimental study was made of the effect on the elastic modulus of a sample consisting of an aluminum base with a double-sided multilayer polymer coating and the number of single layers of this coating under tension. Empirical dependences of the elastic modulus of the sample and the elastic modulus of the polymer coating on the number of unit layers were obtained. It has been established that when the number of single layers of the same thickness increases from two to eight, the elastic modulus of the polymer coating increases significantly. Increasing the number of single layers of polymer coating more than eight is not advisable, since it does not lead to an increase in the elastic modulus.

Keywords: multilayer polymer coating, modulus of elasticity, mechanical properties, uniformity, stretching of samples, coating structure.

Для изготовления техники специального назначения широко применяют алюминиевые, магниевые, титановые сплавы и различные стали. При эксплуатации техники специального назначения механические свойства металлических конструкций ухудшаются, что обусловлено воздействием нагрузок и агрессивной окружающей среды. Нанесение полимерных покрытий обеспечивает металлической конструкции защиту от внешних воздействий, прочность, долговечность и необходимые функциональные свойства [1–3].

Рационально на крупногабаритную технику специального назначения полимерные покрытия наносить напылением. Для обеспечения высокого качества полимерного покрытия применяют напыление жидких полимерных композиций высокоскоростным воздушным потоком. В этом случае струи жидких полимерных композиций дробятся на капли малых размеров, которые перемешиваются между собой в факеле распыления и формируют однородную реакционную смесь на покрываемой металлической основе. После отверждения реакционной смеси образуется однородное полимерное покрытие [4–7].

Неоднородность напыленной на покрываемую металлическую основу реакционной смеси обуславливает возникновение в полимерном покрытии внутренних напряжений и различных дефектов (пор, трещин, расслоений), снижающих его прочность. Для исключения появления опасных экстремальных дефектов больших размеров рекомендуется послойное напыление полимерного покрытия, так как размеры дефекта не мо-

гут превышать толщину единичного слоя. Поэтому актуальна оценка влияния на механические свойства напыленного полимерного покрытия его слоистой структуры [8–13].

Цель исследования: установление взаимосвязи между слоистой структурой двухстороннего полимерного покрытия на алюминиевой основе и модулем упругости этого покрытия.

Задача исследования: определение модуля упругости двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе при растяжении образцов.

Экспериментальные образцы и методы исследования

Экспериментальное исследование механических свойств напыленных на алюминиевую основу многослойных полимерных покрытий проведено на образцах (рис. 1). Материал основы образца — лента из отожженного алюминиевого сплава АД1-М с размерами $0,5 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$; $H_{\text{Al}} = 0,5 \text{ мм}$; $B_{\text{Al}} = 20 \text{ мм}$; $L_{\text{Al}} = 200 \text{ мм}$. Лента из алюминиевого сплава АД1-М по ГОСТ 13726–97 имеет следующие механические характеристики: предел прочности образца при растяжении $\sigma_b = 60,0 \text{ МПа}$; условный предел текучести образца при растяжении $\sigma_{0,2} = 20,0 \text{ МПа}$; модуль упругости (модуль Юнга) $E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; относительное удлинение $\delta = 20 \%$ (рис. 2).

Распыляемая композиция наносилась на основу с помощью распылителя, перемещаемого со скоростью $0,15 \text{ м/с}$, расстояние от распылителя

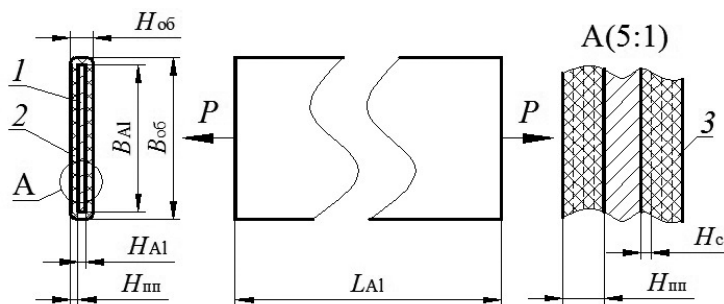


Рис. 1. Образец для испытаний: 1 — образец — алюминиевая лента $0,5 \text{ мм} \times 20 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$ (основа или подложка); 2 — напыленное многослойное покрытие; 3 — единичный слой покрытия; P — сила растяжения образца; $H_{\text{об}}$ — толщина образца; $B_{\text{об}}$ — ширина образца; $H_{\text{нп}}$ — толщина многослойного покрытия с одной стороны образца; $H_{\text{с}}$ — толщина единичного слоя покрытия; H_{Al} — толщина алюминиевой ленты; B_{Al} — ширина алюминиевой ленты; L_{Al} — длина алюминиевой ленты

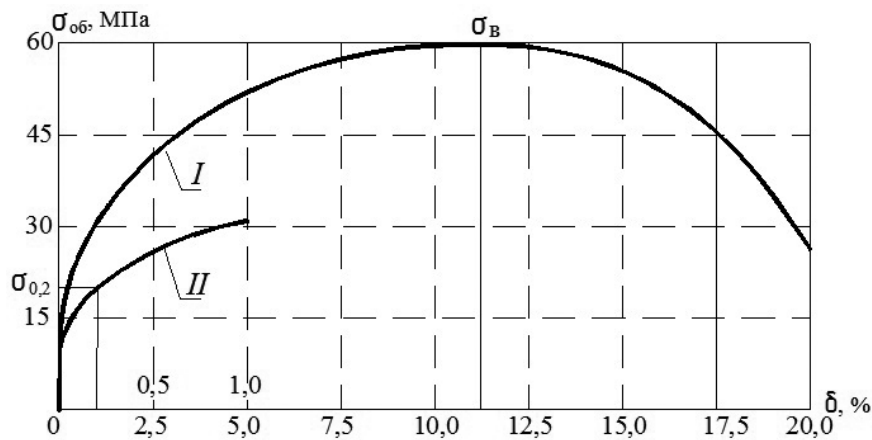


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца из отожженного алюминиевого сплава АД1-М без покрытия:

I — полная диаграмма; *II* — диаграмма до предела текучести;

$\sigma_{об}$ — растягивающие напряжения в образце; σ_v — предел прочности образца при растяжении;

$\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести образца при растяжении;

δ — относительное удлинение образца при растяжении

до поверхности основы составляло 500 мм. Распылитель содержит 8 сверхзвуковых сопел подачи распыляющего воздуха, расположенных равномерно по окружности вокруг канала подачи распыляемой композиции диаметром 1,2 мм. Геометрия сверхзвуковых сопел характеризуется критерием Маха на срезе $M_v = 1,5$. В качестве распыляющего газа использовался воздух, подаваемый под давлением 1,0 МПа. Распыляемая композиция подавалась в распылитель под давлением 0,1 МПа.

Полимерное покрытие образца напылялось послойно с двух сторон основы (рис. 1). Были изготовлены образцы с числом единичных слоев $N_{сл} = 2, 4, 6, 8, 10, 12$, толщина единичного слоя постоянна $H_c = \text{const}$. Напыленный единичный слой отверждался при комнатной температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ до степени высыхания 1 по ГОСТ 19007–73, после чего напыляли следующий единичный слой. Полное отверждение напыленного многослойного полимерного покрытия осуществлялось в течение 24 часов до степени высыхания 5 и более по ГОСТ 19007–73.

Толщина многослойного полимерного покрытия:

$$H_{\text{пп}} = N_{\text{сл}} \cdot H_c,$$

где H_c — толщина единичного слоя, м;

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

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

Толщину отвержденного полимерного покрытия образца измеряли толщиномером NOVOTEST ТП-1.

Геометрические размеры образца измеряли электронным микрометром Мегеон 80800, точность измерения 0,001 мм; диапазон измерений: 0÷25 мм.

Модуль упругости образца определяли при растяжении на разрывной машине Shimadzu AGX.

Методика статистической обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных по растяжению образцов, состоящих из двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе, проходит по следующей методике.

На первом этапе испытаний определяли площадь поперечного сечения F_{Al} и модуль упругости E_{Al} алюминиевой ленты.

Площадь поперечного сечения алюминиевой ленты:

$$F_{\text{Al}} = B_{\text{Al}} \cdot H_{\text{Al}}, \quad (1)$$

где F_{Al} — площадь поперечного сечения алюминиевой ленты, м^2 ;

H_{Al} — толщина алюминиевой ленты, м;

B_{Al} — ширина алюминиевой ленты, м.

По результатам испытаний на растяжение десяти образцов алюминиевой ленты определили среднее значение модуля упругости:

$$E_{Al} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{Al i}}{N}, \quad (2)$$

где $E_{Al i}$ — значение модуля упругости i -го образца алюминиевой ленты, Па;

E_{Al} — среднее значение модуля упругости образцов алюминиевой ленты, Па;

N — число образцов ($N = 10$), шт.

На втором этапе испытаний определяли модуль упругости образцов, состоящих из алюминиевой основы с двухсторонним полимерным покрытием. Испытания проводили на десяти образцах с одинаковым числом единичных слоев полимерного покрытия.

Измеряли ширину $B_{об i}$ и толщину $H_{об i}$ образцов, толщину напыленного многослойного полимерного покрытия $H_{пн i}$. Рассчитывали площадь поперечного сечения образца $F_{об}$ и площадь поперечного сечения многослойного полимерного покрытия $F_{пн}$.

Площадь поперечного сечения i -го образца:

$$F_{об i} = B_{об i} \cdot H_{об i}, \quad (3)$$

где $H_{об i}$ — толщина i -го образца, м;

$B_{об i}$ — ширина i -го образца, м;

$F_{об i}$ — площадь поперечного сечения i -го образца, м².

Среднее значение площади поперечного сечения образцов:

$$F_{об} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{об i}}{N}, \quad (4)$$

где $F_{об}$ — среднее значение площади поперечного сечения образцов, м²;

N — число образцов ($N = 10$), шт.

Площадь поперечного сечения полимерного покрытия i -го образца:

$$F_{пн i} = F_{об i} - F_{Al}, \quad (5)$$

где $F_{пн i}$ — площадь поперечного сечения полимерного покрытия i -го образца, м².

Среднее значение площади поперечного сечения полимерного покрытия:

$$F_{пн} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{пн i}}{N}, \quad (6)$$

где $F_{пн}$ — среднее значение площади поперечного сечения полимерного покрытия образцов, м²;

N — число образцов ($N = 10$), шт.

При растяжении образца в нем возникают напряжения:

$$\sigma_{об} = \frac{P}{F_{об}} = \varepsilon \cdot E_{об}, \quad (7)$$

где $\sigma_{об}$ — растягивающие напряжения в образце, Па;

P — сила растяжения образца, Н;

ε — относительное удлинение образца;

$E_{об}$ — модуль упругости образца, Па.

При растяжении образца алюминиевая основа и двухстороннее полимерное покрытие деформируются одинаково, то есть имеют одинаковое относительное удлинение ε , тогда с учетом выражений (1), (2), (4), (6) и (7) можно записать уравнение:

$$F_{об} \cdot E_{об} = F_{пн} \cdot E_{пн} + F_{Al} \cdot E_{Al} = (F_{об} - F_{Al}) \cdot E_{пн} + F_{Al} \cdot E_{Al}, \quad (8)$$

где $E_{пн}$ — среднее значение модуля упругости многослойного полимерного покрытия образцов, Па;

$E_{об}$ — среднее значение модуля упругости образцов, Па.

По результатам испытаний на растяжение образцов с одинаковым числом единичных слоев полимерного покрытия определили среднее значение модуля упругости:

$$E_{об} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{об i}}{N}, \quad (9)$$

где N — число образцов ($N = 10$), шт.;

$E_{об i}$ — значение модуля упругости i -го образца, Па.

Далее проводили статистическую обработку результатов испытаний образцов. Среднее

квадратическое отклонение модуля упругости образцов:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (E_{обi} - E_{об})^2}, \quad (10)$$

где S — среднее квадратическое отклонение модуля упругости образцов, Па.

Коэффициент вариации модуля упругости образцов:

$$v = \frac{S}{E_{об}}. \quad (11)$$

Доверительный интервал модуля упругости образцов $\Delta E_{об}$:

$$\Delta E_{об} = \frac{t_T \cdot S}{\sqrt{N}}, \quad (12)$$

где $\Delta E_{об}$ — доверительный интервал модуля упругости образцов, Па;

t_T — значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы $(N-1)$ и уровне значимости 0,05 (доверительная вероятность $P = 0,95$) ($t_T = 2,262$ при $N = 10$).

Допускаемые отклонения отдельных значений модуля упругости образца должны находиться в пределах $E_{об} \pm \Delta E_{об}$.

Нормальность распределения результатов испытаний оценивали по асимметрии и эксцессу:

$$As = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{обi} - E_{об})^3}{N \cdot S^3}; \quad Ex = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{обi} - E_{об})^4 - 3}{N \cdot S^4}, \quad (13)$$

где As — асимметрия;

Ex — эксцесс.

Дисперсии асимметрии и эксцесса рассчитывали по выражениям:

$$D(As) = \frac{6 \cdot (N-1)}{(N+1) \cdot (N+3)}; \quad (14)$$

$$D(Ex) = \frac{24 \cdot N \cdot (N-2) \cdot (N-3)}{(N-1)^2 \cdot (N+32) \cdot (N+5)},$$

где $D(As)$ — дисперсия асимметрии;

$D(Ex)$ — дисперсия эксцесса.

Результаты испытаний распределены нормально, если выполняются условия:

$$|As| \leq 3 \cdot \sqrt{D(As)}; \quad (15)$$

$$|Ex| \leq 5 \cdot \sqrt{D(Ex)}.$$

Из выражения (8) рассчитывали модуль упругости многослойного полимерного покрытия образцов с одинаковым числом единичных слоев:

$$E_{\text{пн}} = \frac{F_{об} \cdot E_{об} - F_{Al} \cdot E_{Al}}{F_{\text{пн}}} = \frac{F_{об} \cdot E_{об} - F_{Al} \cdot E_{Al}}{F_{об} - F_{Al}}. \quad (16)$$

Определение модуля упругости двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе при растяжении образцов

На первом этапе испытаний по выражению (1) определяли площадь поперечного сечения алюминиевой ленты $F_{Al} = 10 \text{ мм}^2$ и по выражению (2) модуль упругости алюминиевой ленты $E_{Al} = 70108,21 \text{ МПа}$.

На втором этапе испытаний определяли модуль упругости образцов, состоящих из алюминиевой основы с двухсторонним полимерным покрытием, при числе единичных слоев $N_{сл} = 2, 4, 6, 8, 10, 12$.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали в программе Excel.

Измеряли ширину $B_{обi}$ и толщину $H_{обi}$ образцов, толщину напыленного многослойного полимерного покрытия $H_{\text{пнi}}$. По выражениям (3), (4) рассчитывали площадь поперечного сечения образца $F_{об}$ и по выражениям (5), (6) площадь поперечного сечения многослойного полимерного покрытия $F_{\text{пн}}$ (табл.).

По выражениям (9)–(15) проводили статистическую обработку и оценивали среднее значение модуля упругости образцов $E_{об}$ (табл., рис. 3).

По выражению (16) рассчитывали модуль упругости многослойного полимерного покрытия образцов с одинаковым числом единичных слоев $E_{\text{пн}}$ (табл., рис. 4).

Таблица

Результаты эксперимента по определению модуля упругости двухстороннего многослойного полимерного покрытия на алюминиевой основе при растяжении образцов

Число единичных слоев покрытия $N_{\text{сл}}$, шт.	2	4	6	8	10	12
Среднее значение площади поперечного сечения образцов $F_{\text{об}}$, мм ²	15,82	21,36	27,48	33,76	40,19	46,79
Среднее значение площади поперечного сечения покрытия $F_{\text{пл}}$, мм ²	5,82	11,36	17,48	23,76	30,19	36,79
Модуль упругости образца № 1 $E_{\text{об1}}$, МПа	44442,33	36867,01	24742,59	23252,65	18229,76	16795,04
Модуль упругости образца № 2 $E_{\text{об2}}$, МПа	45659,04	31613,68	27915,37	22225,41	19830,86	15751,28
Модуль упругости образца № 3 $E_{\text{об3}}$, МПа	45112,63	31601,36	28067,35	20880,33	19024,86	15787,36
Модуль упругости образца № 4 $E_{\text{об4}}$, МПа	44056,50	33496,74	25431,90	23294,96	18367,54	15909,94
Модуль упругости образца № 5 $E_{\text{об5}}$, МПа	48954,45	32079,02	30694,54	22615,30	17601,15	17050,93
Модуль упругости образца № 6 $E_{\text{об6}}$, МПа	48997,60	30881,07	27956,96	21395,68	18066,74	20214,97
Модуль упругости образца № 7 $E_{\text{об7}}$, МПа	42599,23	35966,40	24786,80	23846,35	18433,22	16483,76
Модуль упругости образца № 8 $E_{\text{об8}}$, МПа	41789,62	35778,62	25027,70	24166,83	20437,53	16041,94
Модуль упругости образца № 9 $E_{\text{об9}}$, МПа	46372,44	34061,62	25785,27	20680,37	21020,7	17022,03
Модуль упругости образца № 10 $E_{\text{об10}}$, МПа	42846,91	37363,13	28857,22	21295,30	20758,3	17068,97
Среднее значение модуля упругости образца $E_{\text{об}}$, МПа	45083,08	33970,87	26926,57	22365,32	19177,07	16812,62
Среднее квадратичное отклонение модуля упругости S , МПа	2489,70	2396,18	2048,21	1260,60	1236,53	1309,67
Коэффициент вариации модуля упругости v	0,055	0,071	0,076	0,056	0,064	0,078
Доверительный интервал модуля упругости $\Delta E_{\text{об}}$, МПа	1780,90	1714,00	1465,10	901,71	884,50	936,82
Нормальность распределения	Норм.	Норм.	Норм.	Норм.	Норм.	Норм.
Среднее значение модуля упругости покрытия $E_{\text{пл}}$, МПа	2072,75	2164,30	2226,51	2271,51	2309,32	2324,46

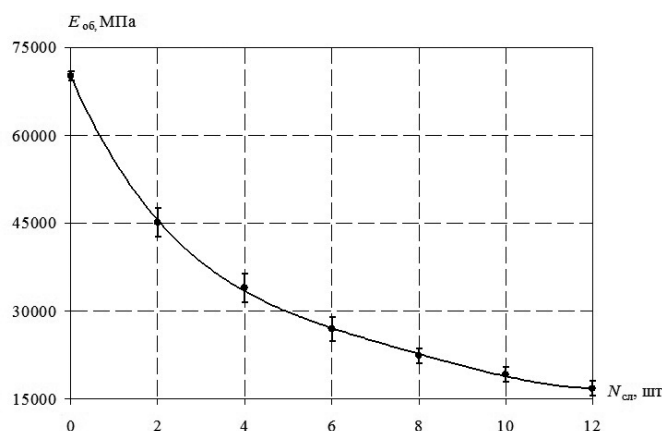


Рис. 3. Зависимость среднего значения модуля упругости образцов $E_{\text{об}}$ от числа единичных слоев $N_{\text{сл}}$:

• — экспериментальные данные

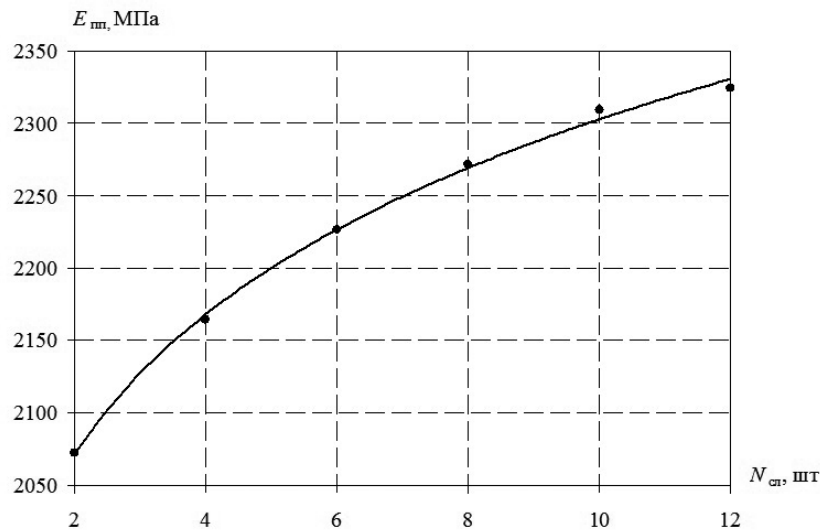


Рис. 4. Зависимость среднего значения модуля упругости многослойного полимерного покрытия $E_{мн}$ от числа единичных слоев $N_{сл}$: • — экспериментальные данные

Зависимость среднего значения модуля упругости образцов $E_{об}$ от числа единичных слоев $N_{сл}$ хорошо аппроксимируется полиномиальной зависимостью (рис. 3):

$$E_{об} = 6,83 \cdot N_{сл}^4 - 218,65 \cdot N_{сл}^3 + 2669,70 \cdot N_{сл}^2 - 16773,0 \cdot N_{сл} + 70008,0.$$

Увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия с 2 до 12 приводит к существенному снижению модуля упругости образцов на 62,5 %, так как модуль упругости полимерного покрытия на порядок меньше модуля упругости алюминиевой основы.

Зависимость модуля упругости полимерного покрытия $E_{пп}$ от числа единичных слоев $N_{сл}$ хорошо аппроксимируется степенной зависимостью (рис. 4):

$$E_{пп} = 1979,20 \cdot N_{сл}^{0,0658}.$$

Увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия с 2 до 12 приводит к росту модуля упругости полимерного покрытия на 10,8 %. Дальнейшее увеличение числа слоев ($N_{сл} > 12$ шт.) к повышению модуля упругости полимерного покрытия не приводит.

Таким образом, увеличение числа единичных слоев полимерного покрытия повышает его модуль упругости при растяжении.

Обсуждение результатов

Опытные данные говорят о значительном влиянии слоистой структуры напыленного полимерного покрытия на его механические свойства. С увеличением числа единичных слоев одинаковой толщины модуль упругости полимерного покрытия возрастает. Значительное повышение модуля упругости наблюдается при увеличении числа единичных слоев с 2 до 8, незначительное повышение — с 8 до 12, повышение практически отсутствует — при числе единичных слоев более 12.

Причиной повышения механических свойств напыленного полимерного покрытия является его высокая однородность, которая обеспечивается малым размером распыленных высокоскоростным воздушным потоком капель полимерной композиции. Вероятность возникновения опасного дефекта в однородном по составу и структуре полимерном покрытии крайне мала. Структура полимерного покрытия, состоящая из 6–8 единичных слоев, обуславливает высокие значения показателей его механических свойств, в том числе модуля упругости, что обеспечивает долговечность техники специального назначения.

Таким образом, цель исследования достигнута — установлена взаимосвязь между слоистой структурой двухстороннего полимерного по-

крытия на алюминиевой основе и модулем упругости этого 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. Гайдар С.М. Теория и практика создания средств защиты сельскохозяйственной техники от коррозии. М.: ФГНУ «Росинформоагротех», 2011. 310 с.

3. Рогов В.Р., Анисимов В.Р., Исаченко Е.А. Направление развития технологий для повышения антикоррозионной устойчивости автотранспортных средств // Грузовик. 2019. № 8. С. 16–18.

4. Бобкова Т.И., Васильев А.Ф., Прудников И.С., Фармаковский Б.В. Функционально-градиентные покрытия, полученные с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. 2019. № 1 (97). С. 74–78.

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

6. 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.

7. 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.

8. Гаврилов Д.Г., Мамонов С.В., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Сравнительная характеристика прочностных свойств образцов с различными типами покрытий для изделий авиационной техники // Труды МАИ. 2010. Вып. № 40. С. 1–14.

9. Зезин Ю.П., Ломакин Е.В., Мамонов С.В. и др. Определение модуля упругости покрытий по результатам испытаний на растяжение и из-

гиб трехслойных образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 8. С. 61–63.

10. Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н., Чистяков П.В. и др. Определение упругих характеристик полимерных покрытий по результатам испытаний на растяжение и изгиб плоских образцов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Математика. Механика. Информатика». 2012. Т. 12. Вып. 3. С. 74–80.

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

12. Соляев Ю.О., Лурье С.А., Рабинский Л.Н. и др. Экспериментально-теоретическое исследование влияния полимерных порошковых покрытий на механические свойства стальных пластин // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. № 2. С. 197–205.

13. Андрюшкин 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

1. Anastasiadi G.P., Okrepilov V.V., Silnikov M.V. Quality management of industrial products. Publisher: St. Petersburg publishing and bookselling company «Nauka». St. Petersburg. 2014. 412 p.

2. Gaidar S.M. Theory and practice of creating means of protecting agricultural machinery from corrosion. M.: Federal State Scientific Institution «Rosinformoagrotech». 2011. 310 p.

3. Rogov V.R., Anisimov V.R., Isachenko E.A. Direction of development of technologies for increasing the anti-corrosion resistance of motor vehicles // Truck. 2019. No 8. Pp. 16–18.

4. Bobkova T.I., Vasiliev A.F., Prudnikov I.S., Farmakovskiy B.V. Functional gradient coatings obtained using supersonic cold gas–dynamic spraying // Questions of materials science. 2019. No 1 (97). Pp. 74–78.

5. Sergeevichev A.V., Sergeevichev A.V., Onegin V.I. Physico-chemical foundations of the processes of forming polymer coatings on hard surfaces // News of the St. Petersburg Forestry Academy. Vol. 223. 2018. Pp. 213–227.
6. Kiryushina V.V., Kovaleva Yu.Yu., Stepanov P.A., Kovalenko P.V. Study of the influence of the scale factor on the strength properties of polymer composite materials // News of universities. Nuclear energy. 2019. No 1. Pp. 97–106.
7. 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. T. 16. No 2. Pp. 291–304.
8. Gavrilov D.G., Mamonov S.V., Martirosov M.I., Rabinsky L.N. Comparative characteristics of the strength properties of samples with various types of coatings for aircraft products // Proceedings of MAI. Issue No 40. M.: MAI, 2010. Pp. 1–14.
9. Zezin Yu.P., Lomakin E.V., Mamonov S.V. et al. Determination of the elastic modulus of coatings based on the results of tensile and bending tests of three-layer samples // Factory laboratory. Diagnostics of materials. Vol. 78. No. 8. 2012. Pp. 61–63.
10. Martirosov M.I., Rabinsky L.N., Chistyakov P.V. et al. Determination of the elastic characteristics of polymer coatings based on the results of tensile and bending tests of flat samples // News of Saratov University. New episode. Series «Mathematics. Mechanics. Computer science». Vol. 12. Issue 3. 2012. Pp. 74–80.
11. Getmanov A.G., Mamonov S.V., Martirosov M.I., Rabinsky L.N. Experimental study of the mechanical properties of polymer coatings on aluminum alloy samples // Proceedings of MAI. Issue No 72. 2014. Pp. 1–11.
12. Solyaev Yu.O., Lurie S.A., Rabinsky L.N. et al. Experimental and theoretical study of the influence of polymer powder coatings on the mechanical properties of steel plates // Mechanics of composite materials and structures. 2015. Vol. 21. No 2. Pp. 197–205.
13. Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Romanat N. Theoretical justification for the multi-layer functional coating of special-purpose equipment to reduce the likelihood of its failure in the presence of unacceptable manufacturing defects // Issues of defense technology. Episode 16: Technical means of countering terrorism. 2023. No 3–4 (177–178). Pp. 104–108.