

УДК 621.793.7: 533.924

Е. А. Зеленина, д-р техн. наук С. В. Лоскутов, д-р техн. наук А. В. Ершов

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

МЕТОД РАСЧЕТА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОДЛОЖКЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ НА ИЗГИБ

Разработан метод расчета прочностных и упругих характеристик плазменного покрытия на поверхности подложки при испытании образцов на изгиб в области квазиупругих деформаций. Выполнено исследование механических свойств плазменного покрытия ПРНХ15СР2. Определены экспериментальные зависимости изменения модуля упругости и напряжения в процессе деформации.

Ключевые слова: плазменное покрытие, модуль упругости, механическое напряжение, относительная деформация, нейтральная ось, момент инерции.

Введение

Признано, что применение плазменных покрытий для восстановления и упрочнения деталей машин является экономически целесообразным. Однако величина прочности сцепления и когезионной прочности покрытий не всегда удовлетворяет условию надежной работы детали. Прочность плазменных покрытий, наносимых в воздушной атмосфере, в несколько раз ниже прочности компактного материала подложки [1–3]. Поэтому разработка методов измерения механических характеристик покрытий является актуальной проблемой.

Возможной причиной снижения прочности покрытий могут быть деформации покрытия и подложки в процессе сборки и эксплуатации деталей, а также возникновение остаточных напряжений при перегреве поверхности в процессе плазменного напыления [4–8]. Поскольку в покрытии обычно возникают растягивающие остаточные термонапряжения, то значительный интерес для оценки работоспособности представляет не только прочность сцепления с подложкой, но и модуль упругости и когезионная прочность, а также характер их изменения в процессе деформации.

Из существующих методов измерения механических свойств используются испытания на растяжение-сжатие, а также на изгиб [4–5], которые предпочтительны для плоских образцов. Однако, их применение требует создания методики расчета физико-механических характеристик покрытия при существенном отличии свойств между покрытием и подложкой. Поэтому целью работы является разработка методики определения упругих и прочностных свойств покрытия на основании испытаний механических характеристик изгиба напыленного образца.

Методика эксперимента

При испытании на изгиб по консольной схеме, рис. 1, измеряется перемещение свободного конца об-

разца под действием силы P . Величина перемещения y определяется формулой

$$y = \frac{PL^3}{3EI}, \quad (1)$$

где L – длина образца, EI – жесткость сечения, E – модуль упругости, I – момент инерции поперечного сечения.

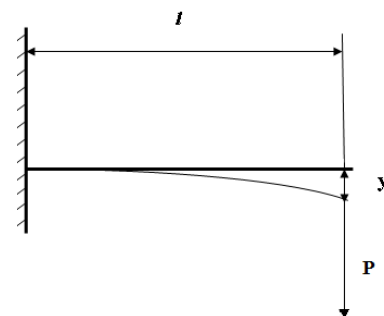


Рис. 1. Схема испытания образца с покрытием при изгибе

Если образец состоит из разнородных материалов, например, подложки и покрытия, то общая жесткость сечения равна сумме жесткостей составляющих частей:

$$EI = E_1I_1 + E_2I_2, \quad (2)$$

где индексы «1» и «2» относятся соответственно к подложке и покрытию.

Поперечное сечение образца представляет собой прямоугольник, составленный из двух прямоугольников с площадями S_1 и S_2 , с высотами h_1 и h_2 . Для определения положения нейтральной оси составим уравнение равновесия статических моментов сечения, рис. 2

$$bh_2E_2x_2 = bh_1E_1x_1, \quad (3)$$

где b – ширина поперечного сечения, E_1 и E_2 – модули упругости подложки и покрытия, x_1 и x_2 – расстояния от центров сечений до нейтральной оси, рис. 2.

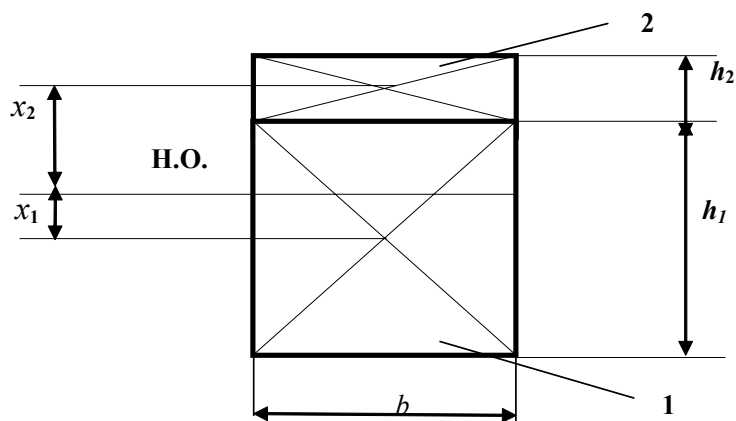


Рис. 2. Схема положений центров сечений подложки x_1 и покрытия x_2 относительно нейтральной оси (Н.О.) в поперечном сечении образца:

1 – подложка; 2 – покрытие; x_1, x_2 – расстояния от нейтральной оси до центров сечений подложки и покрытия

Для определения положения нейтральной оси относительно центра подложки определим связь между x_1 и x_2 в соответствии с рис. 2:

$$x_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} - x_1. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3) находим x_1 :

$$x_1 = \frac{E_2 h_2 (h_1 + h_2)}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2)}. \quad (5)$$

Момент инерции составных частей сечения относительно нейтральной оси определяется по теореме Штейнера:

$$I_1 = I_{10} + S_1 x_1^2, \quad I_2 = I_{20} + S_2 x_2^2, \quad (6)$$

где I_{10} и I_{20} – моменты инерции подложки и покрытия относительно центра сечений, например:

$$I_{10} = \frac{b h_1^3}{12}, \quad I_{20} = \frac{b h_2^3}{12}, \quad (7)$$

а S_1 и S_2 – площади поперечных сечений подложки и покрытия.

Модуль упругости покрытия определится из (2):

$$E_2 = \frac{EI - E_1 I_1}{I_2}. \quad (8)$$

Величина жесткости образца EI находится из формулы (1) при измерении перемещения y под действием силы P .

Для измерений использовались образцы из стали Ст3 шириной $b = 12,3$ мм, толщиной $h_1 = 1,5$ мм, на которые наносилось покрытие толщиной $h_2 = 0,6$ мм. Расчет положений центров сечений x_1 и x_2 относительно нейтральной оси и моментов инерции сечения I_1 и I_2 для $E_2/E_1 = 0,2; 0,3$ приведен в табл. 1.

Целью экспериментов было измерение перемещений стержня под действием изгибающей силы, рис. 1. Для измерения перемещений использовался часовой индикатор с ценой деления 0,01 мм. Величина изгибающей силы определялась подбором грузов. Результаты измерений перемещений образца с покрытием при изгибе и расчеты характеристик деформации для случаев растяжения и сжатия слоя покрытия приведены в табл. 2 и 3. Величина жесткости стержня, определенная по результатам измерений с использованием формулы (1), приведена в табл. 2 и 3. Модуль упругости покрытия определялся по формуле (8) при $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Моменты инерции подложки и покрытия принимались по данным табл. 1. Максимальная относительная деформация покрытия в точке защемления образца определялась из формулы для относительной деформации при изгибе стержня и формулы (1)

$$\varepsilon = \frac{PL \cdot y}{EI} = \frac{3y}{L^2} y, \quad (9)$$

где y – наибольшее расстояние точек покрытия от нейтральной оси поперечного сечения.

Для определения нормального напряжения в покрытии использовался закон Гука

$$\sigma = E \varepsilon. \quad (10)$$

Таблица 1 – Результаты расчета геометрических характеристик составного сечения

E_2/E_1	$x_1, \text{мм}$	$x_2, \text{мм}$	$I_{10}, \text{мм}^4$	$S_1, \text{мм}^2$	$I_1, \text{мм}^4$	$I_{20}, \text{мм}^4$	$S_2, \text{мм}^2$	$I_2, \text{мм}^4$
0,2	- 0,075	0,975	3,46	18,4	3,56	0,221	7,38	7,24
0,3	- 0,113	0,937	3,46	18,4	3,69	0,221	7,38	6,70

Діаграми розтягнення і сжаття зовнішнього шару покриття приведені на рис. 3 і 4.

Таблиця 2 – Розрахунок модуля пружості і максимального напруження розтягнення в покритті

P, H	$y, 10^{-3} \text{м}$	$EI, 10^{12} \text{Н} \cdot \text{м}^2$	$E_2, 10^4 \text{МПа}$	$\varepsilon, 10^{-4}$	$\sigma, \text{МПа}$
5,85	0,16	11,86	6,23	2,82	17,5
11,25	0,31	11,41	5,52	5,63	31,1
16,87	0,47	11,58	5,79	8,27	47,9
22,22	0,64	11,26	5,29	11,3	59,5
27,63	0,815	10,99	4,88	14,3	69,9
33,47	1,027	10,57	4,20	18,7	78,6

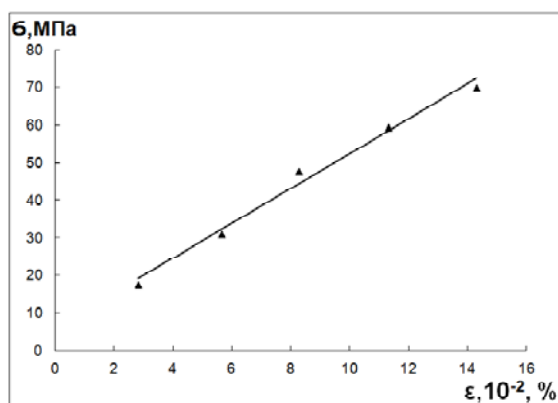


Рис. 3. Діаграма розтягнення зовнішнього шару покриття

Таблиця 3 – Розрахунок модуля пружості і напруження сжаття в покритті

P, H	$y, 10^{-3} \text{м}$	$EI, 10^{12} \text{Н} \cdot \text{м}^2$	$E_2, 10^4 \text{МПа}$	$\varepsilon, 10^{-4}$	$\sigma, \text{МПа}$
5,85	0,16	11,86	6,23	2,82	17,5
11,25	0,32	11,41	5,52	5,63	31,1
22,22	0,64	11,26	5,23	11,2	58,9
27,63	0,81	11,06	4,92	14,2	70,1
33,47	1,01	10,75	4,42	17,7	78,6
38,73	1,25	10,05	4,37	22,0	96,3

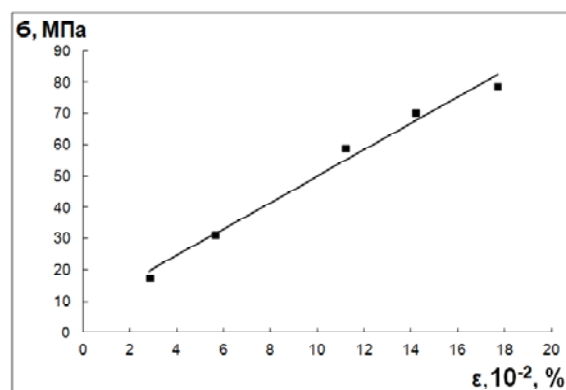


Рис. 4. Діаграма сжаття зовнішнього шару покриття

Аналіз отриманих результатів

Інтерес представляє змінення отриманих значень модуля пружості покриття і залежності напруження від відносної деформації. Величина модуля пружості при відносній деформації розтягнення і сжаття менше 0,1 % становить $(5,5-6) \cdot 10^4 \text{МПа}$, що приблизно в 3 рази менше відповідуючої величини для компактного матеріалу. При збільшенні відносної деформації від 0,1 % до 0,2 % відбувається зниження модуля пружості на (20–25) %, що пов'язано, по-видимому, з переходом в область неупругих деформацій. Зниження модуля пружості при розтягненні більш суттєво, ніж при сжатті, і відбувається при меншій навантаженні. Значення максимального напруження при розтягненні в еластичній області під дією сили $P = 33,47 \text{H}$ становило 78 МПа. При збільшенні відносної деформації до 0,4 % відбулося утворення видимої тріщини з частковим відшаруванням покриття. При сжатті покриття отримано найбільше напруження 96 МПа, однак при подальшому збільшенні навантаження вимірювання були некоректні внаслідок переходу в область неупругих деформацій підложки при $\varepsilon > 0,2 \%$. Для визначення міцності покриття при подальшому сжатті і розтягненні слід врахувати зниження модуля пружості підложки при напруженні вище межі пропорційності.

Висновки

1. Представлений метод розрахунок фізико-механічних характеристик покриття при випробуванні зразків на вигин дозволяє визначити еластичні і міцнісні характеристики покриття на підложці і оцінити надійність роботи деталей, відновлених методом плазменного напылення.

2. Показано, що в області квазіпружких деформацій підложки при $\varepsilon < 0,2 \%$, руйнування покриттів не відбувається. При цьому напруження розтягнення – сжаття в покритті близькі до 70–90 МПа, а модуль пружості приблизно в 3 рази менше, ніж у сталевій підложки. Руйнівна відносна деформація при розтягненні покриття становить приблизно 0,4 %. Для оцінки руйнівних напружень покриття при розтягненні і сжатті слід врахувати зниження модуля пружості підложки в області переходу до неупругої деформації.

Список літератури

1. Нанесення покриття / [В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С. Борисов і др.]. – К. : Аристей, 2005. – 204 с.
2. Кудинов В. В. Нанесення покриттів напыленням. Теорія, технологія і обладнання / В. В., Кудинов, Г. В. Бобров. – М. : Металлургія, 1992. – 432 с.
3. Балдаєв Л. Х. Сучасні тенденції отримання газотермічних покриттів / Л. Х., Балдаєв, В. І. Калита // Технологія металів. 2003. – № 2. – С. 17–20.
4. Проблеми порошкового матеріалознавства. Частина VI. Плазменно- лазерні покриття / [А. Н. Шмаков,

- В. Н. Анциферов, В. Я., Буланов, А. М. Ханов] // Екатеринбург. 2006. 588 с.
5. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов. – К. : Наукова Думка, 1987. – 210 с.
 6. Методы оценки служебных свойств защитных покрытий / [Л. Х. Балдаев, И. Ф. Арутюнова, Н. А. Волосов и др.] // Сварочное производство. – 2001. – № 9. – С. 35–38.
 7. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий. – М. : Машиностроение, 1990. 384 с.
 8. Теплофизическая модель и расчет остаточных напряжений в газотермических покрытиях / [А. Ф. Пузряков, В. А. Тарасов, Н. Ю. Липин и др.] // Технология машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 39–44.
 9. Игнатков Д. А. Определение характеристик упругости неоднородных материалов динамическим методом / Электронная обработка материалов. – 2011. – 47(1). – С. 53–62.

Одержано 16.12.2016

Зеленіна О.А., Лоскутов С.В., Єршов А.В. Метод розрахунку фізико-механічних характеристик плазмового покриття на підкладці при випробуванні зразків на вигин

Розроблено метод розрахунку міцнісних і пружних характеристик плазмового покриття на поверхні підкладки при випробуванні зразків на вигин у зоні квазіпружних деформацій. Виконано дослідження механічних властивостей плазмового покриття ПРHX15CP2. Визначено експериментальні залежності зміни модуля пружності і напруги в процесі деформації.

Ключові слова: плазмове покриття, модуль пружності, механічне напруження, відносна деформація, нейтральна вісь, момент інерції.

Zelenina E., Loskutov S., Ershov A. The method of calculating physical-mechanical characteristics of the plasma coating on a substrate when the test specimens in bending

The method of calculation of the strength and elastic characteristics of the plasma coating on the surface of the substrate when the test specimens in bending in the region of quasielastic deformation is given. Study on mechanical properties of plasma coatings ПРHX15CP2 is done. Defined experimental dependences of change of elastic modulus and strain in the deformation process are shown.

Key words: plasma coating, modulus of elasticity, stress, deformation, neutral axis, moment of inertia.