

УДК 621.793.7: 533.924

Е. А. Зеленина¹, д-р физ.-мат. наук С. В. Лоскутов¹,
д-р техн. наук А. В. Ершов¹, С. Н. Мацюк²

¹Запорожский национальный технический университет, ²АО «Мотор Сич»
г. Запорожье

НАПРЯЖЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИЗГИБЕ ПОДЛОЖКИ

Исследованы механические характеристики порошкового плазменного покрытия на поверхности подложки при испытании на изгиб в области упругопластических деформаций. Разработана методика определения зависимостей модуля упругости и напряжения в процессе деформации. Обнаружено положение максимума напряжения на диаграмме растяжения, которое связано с образованием микротрещины и потерей несущей способности покрытия.

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

Введение

Плазменные покрытия используются для восстановления и упрочнения деталей машин, ресурс и надежность которых зависит от износостойкости и прочности поверхностного слоя. Установлено, что прочность плазменных покрытий, наносимых в воздушной атмосфере, в несколько раз ниже прочности компактного материала подложки [1–3]. Поэтому вопрос повышения прочности плазменных покрытий и разработка методов измерения механических характеристик покрытий является актуальной проблемой.

Основными причинами снижения прочности покрытий являются значительная пористость, наличие оксидов, деформация покрытия и подложки в процессе сборки и эксплуатации деталей, а также возникновение остаточных напряжений при перегреве поверхности в процессе плазменного напыления [4–5]. Поскольку в покрытии обычно возникают растягивающие остаточные термонапряжения, то значительный интерес для оценки работоспособности представляет не только прочность сцепления с подложкой, а и модуль упругости и когезионная прочность, а также характер их изменения в процессе деформации.

Методы измерения механических свойств покрытия на подложке при испытании на растяжение-сжатие, а также и на изгиб, применяются в области упругих деформации [6–7]. Однако, их применение при неупругих деформациях, для определения разрушающего напряжения, при существенном отличии свойств покрытия и подложки, требует улучшения методики расчета физико-механических характеристик покрытия.

Целью работы является разработка методики и определение деформационных и прочностных

свойств покрытия на основании измерений характеристик упругой и неупругой деформации изгиба напыленного образца и подложки.

Методика эксперимента

Выполнялись испытания на изгиб по консольной схеме, рис. 1, при измерении перемещения свободного конца образца под действием силы P . Величина перемещения y определяется формулой [8]:

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

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

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 к подложке и покрытию, соответственно.

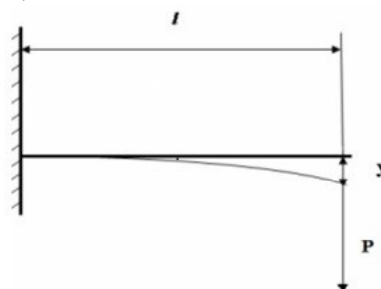


Рис. 1. Схема испытания образца при изгибе

Поперечное сечение образца представляет собой прямоугольник, соединенный из двух прямоугольников с площадями S_1 и S_2 , с высотами h_1 и h_2 . Для определения положения нейтральной оси составим уравнения 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.

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

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

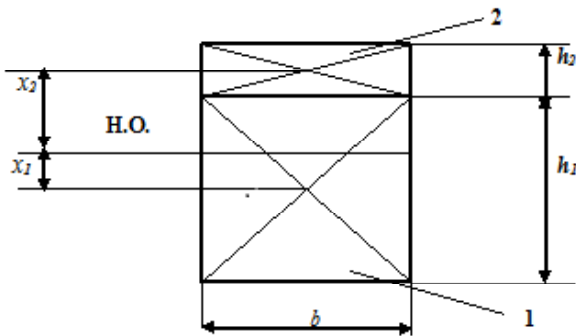


Рис. 2. Положение центров сечений подложки x_1 покрытия x_2 относительно нейтральной оси в поперечном сечении образца. 1 – подложка; 2 – покрытие; x_1, x_2 – расстояния от нейтральной оси до центров сечений подложки и покрытия

Подставив (4) в (3) находим x_1 :

$$x_1 = \frac{E_2h_2(h_1 + h_2)}{2(E_1h_1 + E_2h_2)}, \quad (5)$$

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

$$I_1 = I_{10} + S_1x_1^2, \quad I_2 = I_{20} + S_2x_2^2, \quad (6)$$

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

$$I_{10} = \frac{bh_1^3}{12}, \quad I_{20} = \frac{bh_2^3}{12}; \quad (7)$$

S_1 и S_2 – площади поперечных сечений подложки и покрытия.

Модуль упругости покрытия определится из (2):

$$E_2 = \frac{EI - E_1I_1}{I_2}. \quad (8)$$

Величина жесткости сечения образца EI находится из формулы (1) при измерении перемещения y под действием силы P . В качестве подложки использовались образцы из холоднокатаной 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 нейтральных осей x_1 и x_2 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). Предварительно выполнялись измерения изгибной жесткости подложки без покрытия относительно центра тяжести сечения в зависимости от перемещения образца под действием поперечной силы. Затем с помощью данных табл.1 определялась жесткость сечения относительно нейтральной оси E_1I_1 . В первом приближении предполагалось, что $E_2/E_1 = 0,3$. Результаты испытания образцов на растяжение и сжатие порошкового плазменного покрытия ПРНХ15СР2 и определение модуля упругости приведены в табл. 2 и 3.

Относительная деформация при изгибе покрытия в точке защемления образца зависит от отношения момента силы к изгибной жесткости поперечного сечения [8]:

$$\varepsilon = \frac{PL \cdot Y}{EI}, \quad (9)$$

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

Таблица 1 – Расчет геометрических характеристик составного сечения образца

| 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 |

Таблица 2 – Результаты испытания образца и расчет характеристик изгиба при деформации растяжения образца плазменного покрытия ПРНХ15СР2 длиной 45 мм

| $P, \text{Н}$ | $y, 10^{-3} \text{м}$ | $EI, 10^{-1} \text{Н} \cdot \text{м}^2$ | $E_1 I_1, 10^{-1} \text{Н} \cdot \text{м}^2$ | $E_2 I_2, 10^{-1} \text{Н} \cdot \text{м}^2$ | $E_2, 10^4 \text{МПа}$ | $\varepsilon, 10^{-4}$ | $\sigma \text{МПа}$ |
|---------------|-----------------------|---|--|--|------------------------|------------------------|---------------------|
| 5,85 | 0,18 | 9,87 | 6,71 | 3,16 | 4,99 | 3,30 | 16,5 |
| 11,25 | 0,36 | 9,49 | 6,24 | 3,25 | 5,13 | 6,61 | 33,9 |
| 16,87 | 0,53 | 9,63 | 6,10 | 3,53 | 5,57 | 9,73 | 54,2 |
| 22,22 | 0,72 | 9,37 | 5,90 | 3,47 | 5,48 | 13,2 | 72,3 |
| 27,63 | 0,92 | 9,11 | 5,70 | 3,41 | 5,38 | 16,9 | 90,9 |
| 33,47 | 1,167 | 8,78 | 5,35 | 3,43 | 5,41 | 21,3 | 115 |
| 38,73 | 1,49 | 7,89 | 4,83 | 3,06 | 4,83 | 27,3 | 131 |
| 44,17 | 2,00 | 6,71 | 4,640 | 2,07 | 3,27 | 36,7 | 119 |
| 49,47 | 2,54 | 5,90 | 4,53 | 1,37 | 2,16 | 46,6 | 100 |

Таблица 3 – Результаты испытания образца и расчет характеристик изгиба при деформации сжатия образца плазменного покрытия ПРНХ15СР2 длиной 45 мм

| $P, \text{Н}$ | $y 10^{-3} \text{м}$ | $EI 10^{-1} \text{Н} \cdot \text{м}^2$ | $E_1 I_1 10^{-1} \text{Н} \cdot \text{м}^2$ | $E_2 I_2, 10^{-1} \text{Н} \cdot \text{м}^2$ | $E_2 10^4 \text{МПа}$ | $\varepsilon 10^{-4}$ | $\sigma \text{МПа}$ |
|---------------|----------------------|--|---|--|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| 5,85 | 0,17 | 10,45 | 6,71 | 3,74 | 5,90 | 3,11 | 18,3 |
| 11,25 | 0,33 | 10,35 | 6,37 | 3,98 | 6,28 | 6,04 | 37,9 |
| 22,22 | 0,75 | 8,99 | 5,80 | 3,19 | 5,04 | 13,7 | 69,0 |
| 33,47 | 1,13 | 8,68 | 5,35 | 3,33 | 5,26 | 21,4 | 112 |
| 44,17 | 1,55 | 8,65 | 4,75 | 3,90 | 6,16 | 28,4 | 175 |
| 55,0 | 1,98 | 8,43 | 4,61 | 3,82 | 6,04 | 36,3 | 219 |
| 66,29 | 2,42 | 8,32 | 4,57 | 3,75 | 5,93 | 44,3 | 262 |
| 77,32 | 2,82 | 8,33 | 4,08 | 4,25 | 6,71 | 51,7 | 347 |
| 88,81 | 3,26 | 8,27 | 3,77 | 4,50 | 7,11 | 59,7 | 424 |
| 100,6 | 3,82 | 7,99 | 3,48 | 4,51 | 7,13 | 70,0 | 499 |

Совместное решение (1) и (9) дает зависимость относительной деформации от прогиба стержня:

$$\varepsilon = \frac{3Y}{L^2} y \cdot \quad (10)$$

Нормальное напряжение в покрытии определяется по закону Гука:

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon \cdot \quad (11)$$

Результаты расчета относительной деформации и напряжения при растяжении и сжатии покрытия приведены в табл. 2 и 3. Графический вид диаграммы растяжения-сжатия на рис.3 показывает, что несущая нагрузка и деформация покрытия при сжатии в несколько раз больше, чем при растяжении.

Анализ полученных результатов

Испытания образцов плазменного покрытия ПРНХ15СР2 показали, что модули упругости при деформации растяжения и сжатия меньше 0,2 % составляют $(5-6) \cdot 10^4$ МПа, что примерно в 3 раза меньше соответствующей величины для компактного материала. Диаграммы напряжений при растяжении и сжатии совпадают при относительной деформации меньше 0,2 %. При дальнейшем растяжении происходит монотонное снижение модуля упругости и достижение максимума напряжения 131 МПа при относительной деформации 0,27 %, а затем следует спад нагрузки, что связано с потерей несущей способности материала. При относительной деформации 0,46 % происходит полный разрыв покрытия с образованием видимой трещины.

При сжатии покрытия получено наибольшее напряжение 499 МПа при относительной дефор-

магии 0,7%, однако, максимум напряжения и разрушение покрытия не были достигнуты, поскольку прочность покрытия при сжатии превосходила несущая способность подложки в области упругопластической деформации. Замечено повышение модуля упругости примерно на 30%, что связано с уплотнением покрытия при сжатии. Измеренные напряжения и деформации в покрытии позволяют оценить допускаемую нагрузку и деформацию восстановленных поверхностей деталей при сборке и в процессе эксплуатации.

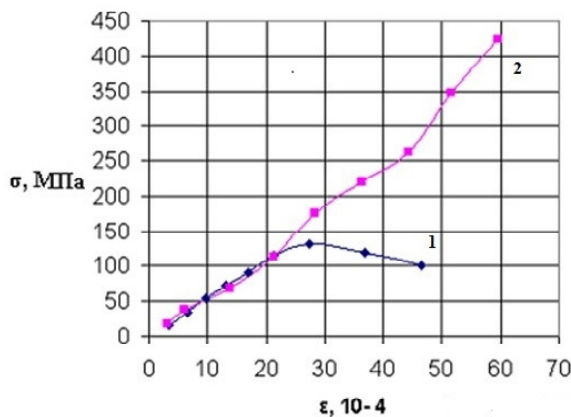


Рис. 3. Зависимость напряжений растяжения и сжатия от относительной деформации на поверхности покрытия: 1 – растяжение; 2 – сжатие

Выводы

1. Показано, что диаграммы напряжений и модули упругости покрытия при растяжении и сжатии совпадают при относительной деформации меньше 0,2%. При дальнейшем растяжении обнаружено уменьшение модуля упругости и появление максимума напряжения 131 МПа, при относительной деформации 0,27%.

2. Обнаружено, что в процессе сжатия покрытия модуль упругости возрастает примерно на 30%. При этом напряжение в покрытии достигает 499 МПа при относительной деформации 0,7% без признаков разрушения материала.

Список литературы

1. Нанесения покрытия / [В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко] // К. : Аристей, 2005. – 204 с.
2. Кудинов В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров // М. : Metallurgia, 1992. – 432 с.
3. Балдаев Л. Х. Современные тенденции получения газотермических покрытий [Текст] / Л. Х. Балдаев, В. И. Калита // Технология металлов. – 2003. – № 2. – С. 17–20.
4. Шмаков А. Н. Проблемы порошкового материаловедения. Часть VI. Плазменно-лазерные покрытия / [А. Н. Шмаков, В. Н. Анциферов, В. Я. Буланов, А. М. Ханов]. – г. 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. 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.
8. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов. Т. 2. / В. И. Феодосьев // М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – 590 с.

Поступила в редакцию 09.03.2017

Зеленіна Е.А., Лоскутов С.В., Ершов А.В., Машук С.Н. Напруження і деформація плазмового покриття при вигині підкладки

Досліджено механічні характеристики порошкового плазмового покриття ПРНХ15СР2 на поверхні підкладки при випробуванні на вигин в області упругопластичних деформацій. Розроблено методику вимірювання залежностей модуля пружності і напруги в процесі деформації. Виявлено положення максимуму напруги на діаграмі розтягування, яке пов'язане з утворенням мікротріщини і втратою несучої здатності покриття.

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

Zelenina E., Loskutov S., Ershov A., Matsyuk S. The stress and deformation of the plasma coating when bending the substrate

Study of the mechanical properties of powder plasma coatings ПРНХ15СР2 on the surface of the substrate in the bending test in the field of elastic-plastic deformations. The developed technique of measurement of the dependency of the modulus of elasticity and strain in the deformation process. The detected position of the maximum stress on the tension diagram that is associated with the formation of microcracks and loss of the bearing capacity of the coating.

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