

Влияние модуля упругости покрытия на работоспособность системы основа–покрытие

Н. А. Долгов

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрено влияние модуля упругости покрытия на его прочностные и деформационные характеристики, а также на остаточные напряжения в нем. Касательные и нормальные напряжения, возникающие в основе и покрытии, зависят от модуля упругости последнего. Сделан вывод, что при проектировании систем основа–покрытие необходимо стремиться к оптимальному соотношению их упругих свойств. Предложен оригинальный подход к нанесению защитных структурно-неоднородных покрытий, в которых в отличие от функционально-градиентных материалов плавно изменяется не состав, а структура.

Ключевые слова: покрытие, основа, модуль упругости, нормальные напряжения, касательные напряжения, работоспособность.

Введение. Данные о модуле упругости покрытия необходимы для расчетов на прочность деталей с покрытиями, для управления технологическими режимами нанесения покрытий, а также для определения и оптимизации их свойств.

Упругие свойства покрытий отличаются от упругих свойств компактного материала и зависят как от технологического режима напыления [1, 2], так и от их пористости и структуры [3–5]. Модули упругости одних и тех же покрытий, полученных при разных условиях напыления, могут отличаться в несколько раз [1, 2, 6]. Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что, управляя технологическим процессом напыления, можно направленно изменять модуль упругости покрытия. Цель работы заключалась в установлении закономерностей влияния модуля упругости покрытия на работоспособность системы основа–покрытие.

Анализ напряженного состояния в системе основа–покрытие. Поскольку детали с покрытиями в процессе изготовления и эксплуатации испытывают как кратковременные, так и долговременные нагрузки, необходимо исследовать различные случаи возникновения напряжений в покрытии.

Рассмотрим напряжения в покрытии, которые появляются вследствие нагружения основы. В этом случае в плоскости адгезионного контакта возникают касательные напряжения, которые могут вызывать адгезионное разрушение покрытия. В соответствии с [7] максимальные касательные напряжения τ_{\max} в плоскости адгезионного контакта равны:

$$\tau_{\max} = p \frac{L}{E_0 k} \operatorname{th} kl, \quad (1)$$

где коэффициенты L (размерность Па/м) и k (размерность м⁻¹) являются функциями, зависящими от модуля упругости покрытия,

$$L = 2 \frac{\frac{G_o}{H} \frac{G_n}{h}}{\frac{G_o}{H} + \frac{G_n}{h}}; \quad (2)$$

$$k^2 = L \left(\frac{1}{E_o H} + \frac{1}{E_n h} \right); \quad (3)$$

E_o, E_n – модули упругости основы и покрытия; G_o, G_n – модули сдвига основы и покрытия; $2H, h$ – толщины основы и покрытия; $2l$ – длина покрытия (размерность м); p – нагрузка, прикладываемая к основе (размерность Па).

С учетом того, что для реальной конструкции выполняется соотношение

$$\text{th } kl \approx 1, \quad (4)$$

рассмотрим выражение

$$\tau_{\max} = p \frac{L}{E_o k}. \quad (5)$$

Его анализ показывает, что величина τ_{\max} зависит от модуля упругости покрытия и изменяется, как показано на рис. 1. Видно, что, снижая модуль упругости покрытия, можно уменьшить τ_{\max} . Уменьшение максимальных касательных напряжений τ_{\max} , воздействие которых приводит к отслоению покрытия, позволяет увеличить его прочностные и деформационные характеристики.

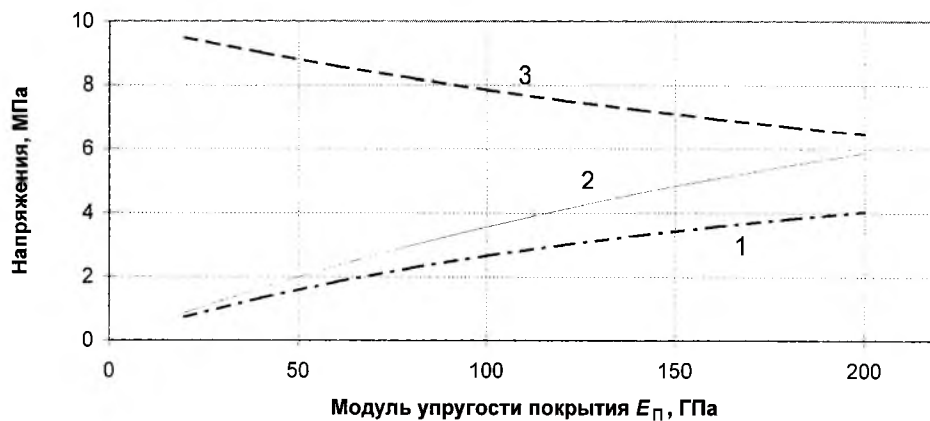


Рис. 1. Влияние модуля упругости покрытия на напряжения в системе основа–покрытие: 1 – касательные; 2, 3 – нормальные соответственно в покрытии и основе.

В [7] приведены также выражения для расчета максимальных нормальных напряжений в покрытии σ_n , возникающих при нагружении основы:

$$\sigma_{\Pi} = p \frac{L}{E_o k^2 h} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} kl} \right) \quad (6)$$

и максимальных напряжений в основе под покрытием σ :

$$\sigma = p \left(1 - \frac{L}{E_o k^2 H} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch} kl} \right) \right). \quad (7)$$

Из анализа выражений (6) и (7) следует, что величины σ_{Π} и σ зависят от модуля упругости покрытия и изменяются, как показано на рис. 1. Видно, что, снижая модуль упругости покрытия, можно уменьшить также нормальные напряжения σ_{Π} , которые вызывают его когезионное разрушение. С другой стороны, повышение модуля упругости покрытия снижает нормальные напряжения в основе. Следовательно, эту особенность необходимо учитывать при проектировании элементов конструкций с покрытиями.

Из рис. 1 видно, что покрытие может разгружать основу и тем самым повышать ее несущую способность. Таким образом, при проектировании систем основа–покрытие необходимо стремиться к оптимальному варианту, чтобы покрытие, с одной стороны, повышало несущую способность основы, а с другой – не испытывало критических нагрузок и деформаций.

Рассмотрим влияние модуля упругости покрытия на остаточные напряжения (ОН) $\sigma_{\text{ОН}}$ в нем, которые состоят из термических σ_T и структурных σ_S напряжений:

$$\sigma_{\text{ОН}} = \sigma_T + \sigma_S. \quad (8)$$

Термические напряжения возникают вследствие различия коэффициентов термического расширения основы и покрытия, а также градиентов температуры в образце при нанесении покрытия.

Вклад термической составляющей определяется выражением

$$\sigma_T = \frac{E_{\Pi}}{1 - \mu_{\Pi}} (\alpha_o - \alpha_{\Pi}) (T_1 - T_2), \quad (9)$$

где μ_{Π} – коэффициент Пуассона покрытия; α_o , α_{Π} – коэффициенты термического расширения основы и покрытия соответственно; T_1 – температура нанесения покрытия; T_2 – температура при измерении термических напряжений.

Анализ выражения (9) показывает, что величина σ_T пропорциональна E_{Π} . Значит, снижая модуль упругости покрытия, можно уменьшить термические напряжения σ_T (рис. 2).

Структурные напряжения возникают вследствие различия параметров решетки основы и покрытия, а также структурных превращений в покрытиях при их образовании. Такие напряжения в покрытии, нанесенном на основу толщиной H , обычно вычисляются по формуле [8]

$$\sigma_S = \frac{E_o H^2}{6(1 - \mu_o) \rho h}, \quad (10)$$

где ρ – радиус кривизны основы после напыления покрытия; μ_o – коэффициент Пуассона основы.

Однако вывод выражения (10) основывался на предположении, что нейтральная ось, т.е. ось, где деформации при изгибе равны нулю, совпадает с центром поперечного сечения образца с покрытием. Данное предположение верно только в случае $E_{II} = E_o$.

Более точный результат при вычислении σ_S дает формула Бреннера–Сендероффа [9]:

$$\sigma_S = \frac{E_o H}{6 \rho h} \left(H + \left(\frac{E_{II}}{E_o} \right)^{5/4} h \right). \quad (11)$$

Зависимость σ_S от модуля упругости покрытия E_{II} представлена на рис. 2. Как видно, зависимость структурных напряжений от модуля упругости покрытия по сравнению с термическими выражена слабее.

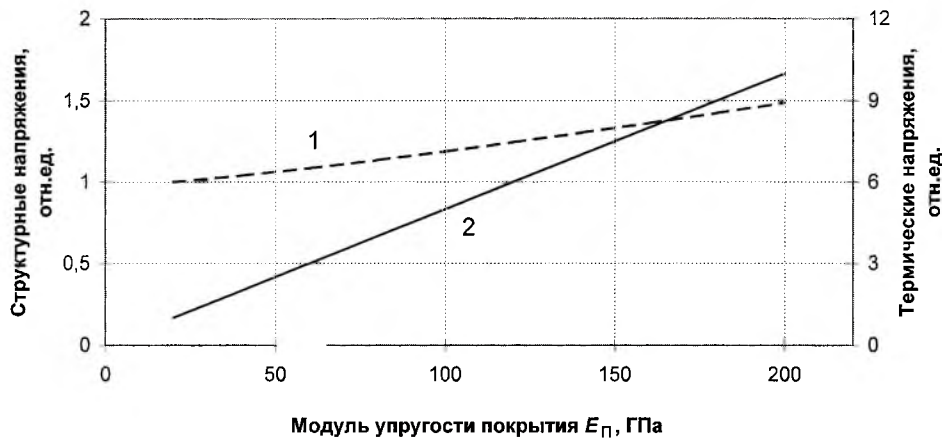


Рис. 2. Влияние модуля упругости покрытия на остаточные напряжения: 1 – структурные; 2 – термические.

Пути снижения напряжений в системе основа–покрытие. Изменяя технологические режимы нанесения покрытий, можно достичь как скачкообразного, так и плавного изменения модуля упругости покрытия. Двухслойное покрытие со скачкообразным изменением модуля упругости ($E_{II1} = \text{const}$; $E_{II2} = \text{const}$) изображено на рис. 3.

Вследствие скачкообразного изменения модуля упругости слоев на границе их раздела при нагружении основы возникают касательные напряжения, которые могут привести к отслоению верхнего слоя покрытия. Поэтому целесообразно, чтобы модуль упругости по толщине покрытия изменялся плавно от E_{II1} до E_{II2} ($E_{II1} < E_{II2}$) – рис. 4.

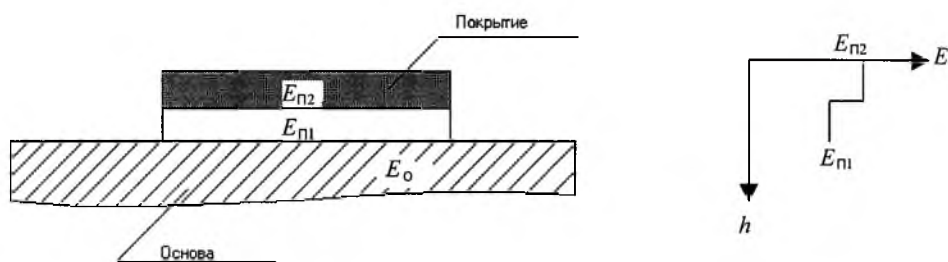


Рис. 3. Покрытие со скачкообразным изменением модуля упругости.

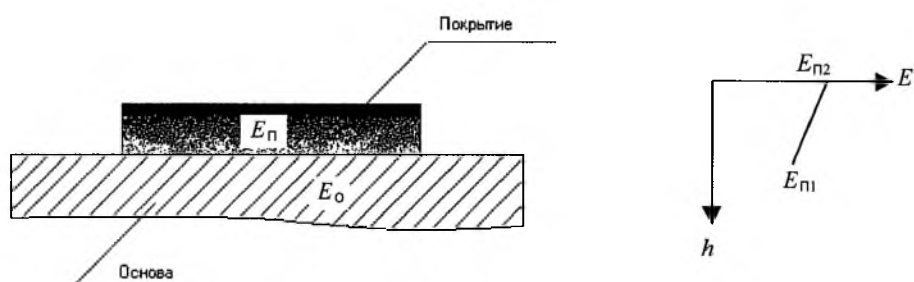


Рис. 4. Покрытие с плавным изменением модуля упругости.

Подобный подход используется при изготовлении толстостенных труб методом центрифугирования, в результате чего их физико-механические характеристики, в частности характеристики упругости, плавно изменяются по радиусу [10].

Поскольку с увеличением пористости модуль упругости покрытия $E_{п}$ уменьшается [4], его плотность следует уменьшать по толщине от зоны адгезионного контакта с основой к его внешней поверхности.

Для теплозащитных покрытий вышеизложенное требует реализации такой технологии нанесения, при которой в начале процесса напыления должно наноситься керамическое высокопористое покрытие (например, плазменное), а затем более плотное низкопористое (например, электронно-лучевое). Кроме того, использование структурно-неоднородной конструкции покрытия позволит существенно увеличить его теплозащитные свойства.

Для уменьшения остаточных напряжений в функционально-градиентных материалах (ФГМ) также применяют методы постепенного перехода структуры [11].

Изменение модуля упругости покрытия в процессе нанесения можно рассматривать подобно процессу лазерного упрочнения, который предназначен для изменения структуры поверхностного слоя покрытия на более плотную. Кроме того, на работоспособность системы основа–покрытие влияет термостабильность механических свойств покрытий, в частности характеристики упругости. Модуль упругости покрытия может изменяться при воздействии термических и механических внешних факторов [12, 13] вследствие нестабильности свойств покрытий. Эту нестабильность упругих свойств также необходимо учитывать при проектировании конструкций с защитными покрытиями.

Заключение. Рассмотрен оригинальный подход к нанесению защитных структурно-неоднородных покрытий с плавно изменяющейся структурой. Это свойство отличает указанные покрытия от ФГМ, у которых изменяется состав. При этом модуль упругости покрытия можно регулировать путем изменения фрагментации, микротрещиноватости, пористости.

В местах максимальных эквивалентных напряжений в покрытиях необходимо снижать модуль упругости покрытия. Однако покрытие при нагружении основы разгружает ее и тем самым повышает несущую способность. Поэтому при проектировании систем основа–покрытие следует стремиться к оптимальному соотношению их упругих свойств. Покрытие, с одной стороны, должно повышать несущую способность основы, а с другой – не испытывать критических нагрузок и деформаций, при которых оно может отслаиваться или растрескиваться.

Резюме

Розглянуто вплив модуля пружності покриття на його міцнісні і деформаційні характеристики, а також на залишкові напруження у ньому. Дотичні і нормальні напруження, що виникають в основі та покритті, залежать від модуля пружності останнього. Зроблено висновок, що при проектуванні систем основа–покриття необхідно наближатися до оптимального співвідношення їхніх пружних властивостей. Запропоновано оригінальний підхід до нанесення захисних структурно-неоднорідних покриттів, у яких на відміну від функціонально-градієнтних матеріалів плавно змінюється не склад, а структура.

1. *Хасуй А.* Техника напыления. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. *Kawase R., Tanaka K., Hamamoto T., and Haraguchi H.* Study on elastic constant and residual stress measurements during ceramic coating // Thermal Spray Research and Application: Proc. of the 3rd National Thermal Spray Conf. (Long Beach, California, 20 – 25 May 1990). – 1990. – P. 339 – 342.
3. *Kim H. J. and Kweon Y. G.* Elastic modulus of plasma-sprayed coatings determined by indentation and bend tests // Thin Sol. Films. – 1999. – **342**. – P. 201 – 206.
4. *Харламов Ю. А.* Прогнозирование пористости порошковых покрытий // Порошк. металлургия. – 1990. – № 12. – С. 36 – 41.
5. *Гецов Л. Б.* Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.
6. *Tucker R. C.* Structure property relationships in deposits produced by plasma spray and detonation gun techniques // J. Vac. Sci. Tech. – 1974. – **11**, No. 4. – P. 725 – 734.
7. *Уманский Э. С., Ляшенко Б. А.* Условия адгезионной и когезионной равнопрочности жаростойких покрытий // Косм. исследования на Украине. – 1975. – Вып. 6. – С. 58 – 64.

8. *Stoney G. G.* The tension of metallic films deposited by electrolysis // Proc. R. Soc. London Ser. A. – 1909. – **82**. – P. 172 – 175.
9. *Brenner A. and Senderoff S.* Calculation of stress in electrodeposits from the curvature of a plated strip // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1949. – **42**, No. 2. – P. 105 – 123.
10. *Fukui Y., Yonekuda H., Watanabe Y., and Nakanishi K.* Evaluating of residual stress in a thickwalled ring for Al-SiC functionally gradient material // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A. – 1994. – **60**, No. 574. – P. 1384 – 1389.
11. *Itoh Y. and Kashiwaya H.* Residual stress characteristics of functionally gradient materials // Toshiba's Selec. Pap. Sci. Techn. – 1993. – **5**, No. 2. – P. 63 – 68.
12. *Ляшенко Б. А., Ермолаев В. В., Жабрев В. А. и др.* Методика оценки термомеханической стабильности жаростойких покрытий // Температуроустойчивые функциональные покрытия. Ч. 1. – СПб, 1997. – С. 50 – 53.
13. *Ляшенко Б. А., Долгов Н. А., Ситникова А. Я.* Оценка термостабильности титановых сплавов со стеклокерамическими покрытиями // Температуроустойчивые функциональные покрытия. Ч. 2. – СПб, 1997. – С. 113 – 115.

Поступила 25. 09. 2000