

Адгезионная прочность и остаточные напряжения при электроконтактном припекании порошковых покрытий

Л. А. Лопата

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

По принципу эквивалентности нагружения адгезионной связи с помощью графического дифференцирования экспериментальной зависимости адгезионной прочности от толщины покрытия оценены остаточные напряжения в покрытии. Установлена функциональная связь между адгезионной прочностью, толщиной покрытия, критической деформацией основы и остаточными напряжениями, что позволяет выбирать параметры системы основа–покрытие при финишной обработке и эксплуатации.

Ключевые слова: адгезионная прочность, порошковые покрытия, электроконтактное припекание, остаточные напряжения.

Введение. Известно, что напряжения (остаточные напряжения) в покрытии могут возникать как вследствие технологии его нанесения, так и в результате эксплуатационного нагружения под действием статических и динамических нагрузок [1, 2]. Однако сведений о сравнительной эффективности этих факторов или их эквивалентности, а также роли адгезионной прочности нами не обнаружено. Анализ полученных данных [1] показывает, что наиболее выраженная форма проявления остаточных напряжений – зависимость прочности сцепления $\tau_{\text{сц}}$ от толщины покрытия h . Из данных, приведенных в литературных источниках, известно, что с увеличением h и остаточных напряжений прочность сцепления $\tau_{\text{сц}}$ снижается вплоть до самопроизвольного отслоения для многих слоистых систем и покрытий, в том числе для напыленных, металлизационных и полимерных покрытий [2–7]. Отмечается также, что тонкие покрытия с высоким уровнем остаточных напряжений не отслаиваются, в то время как толстые покрытия отслаиваются. Как правило, наличие остаточных напряжений в покрытии не позволяет увеличить его толщину до необходимого размера [8]. Критическая толщина покрытия ограничена и зависит от номинальной прочности сцепления [4]. Зависимость прочности сцепления от толщины покрытия обусловлена тем, что упругие напряжения и освобождающаяся энергия уменьшают прочность сцепления покрытия. Методами фотоупругости показано, что касательные напряжения в поверхности адгезионного контакта с увеличением толщины покрытия повышаются [7]. Проанализированы [1] два случая отслоения покрытия за счет деформации основы под действием внешней нагрузки и роста толщины покрытия. Зависимости прочности адгезионной связи от деформации основы и толщины покрытия являются идентичными (рис. 1), что свидетельствует об эквивалентности нагружения адгезионной связи.

В отличие от большинства покрытий, покрытия, полученные методом электроконтактного припекания порошковых материалов (ЭКПП) [9], характеризуются толщинами 3 мм и более при хорошей адгезионной связи.

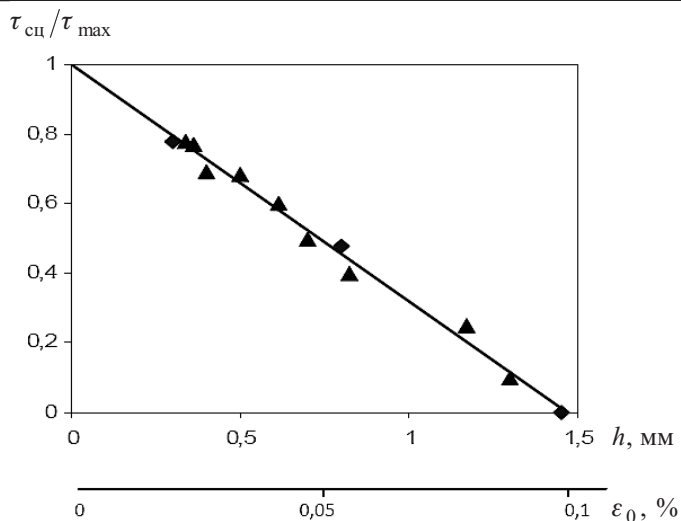


Рис. 1. Зависимость относительной прочности адгезионной связи от деформации основы ϵ_0 (\blacklozenge) (при растяжении основы) и толщины покрытия h (\blacktriangle) (при действии только остаточных напряжений).

Целью настоящей работы является оценка остаточных напряжений в покрытиях, полученных методом ЭКПП, и обоснование высокой адгезионной прочности системы основа–покрытие в условиях совместного действия эксплуатационных и остаточных напряжений исходя из принципа эквивалентности нагружения адгезионной связи. Этот принцип позволяет установить функциональную связь между адгезионной прочностью, толщиной покрытия, остаточными напряжениями и деформацией основы.

Оценка остаточных напряжений методом графического дифференцирования. Из критерия равнопрочности [10], заменив когезионную прочность эквивалентным остаточным напряжением $\sigma_{п}^{ост}$, можно определить критическую толщину покрытия $h_{кр}$ при условии самоотслоения под действием остаточных напряжений:

$$h_{кр} = \frac{\tau_{сц}}{\sigma_{п}^{ост}} \frac{1}{k \operatorname{th} kl}. \quad (1)$$

Здесь $\tau_{сц}$ – прочность адгезионной связи; $2l$ – базовый размер (принят $l = 10h$); k – коэффициент, зависящий от соотношения упругих и геометрических параметров системы основа–покрытие,

$$k^2 = 2 \frac{G_o G_{п}}{G_o h_{п} + G_{п} H_o} \left(\frac{1}{E_{п} h_{п}} + \frac{1}{E_o H_o} \right),$$

где H_o , $h_{п}$ – полутолщина основы и покрытия; E_o , $E_{п}$, G_o , $G_{п}$ – модули упругости первого и второго рода материалов основы и покрытия.

Отсюда следует, что если с ростом толщины покрытия остаточные напряжения повышаются или остаются на том же уровне, будет происходить его

самоотслоение. Именно это зачастую ограничивает возможность применения покрытий большой толщины.

Записав выражение (1) как

$$\sigma_{\text{п}}^{\text{ост}} = \frac{\tau_{\text{сц}}}{h} \frac{1}{k \text{ th } kl}, \quad (2)$$

можно заключить, что остаточные напряжения в покрытии характеризуются тангенсом угла наклона экспериментальной кривой, которая описывает зависимость прочности сцепления от толщины покрытия. Проанализируем зависимость $\tau_{\text{сц}} = f(h)$ – рис. 2 для покрытия из самофлюсующегося порошкового сплава на основе никеля (ПГ-С1), полученного методом ЭКПП ($E = 2,4 \cdot 10^5$ МПа, $G = 0,94 \cdot 10^5$ МПа) и нанесенного на основу из стали 45. Режимы нанесения: сила тока $I = 10$ кА; время импульса $t_{\text{и}} = 0,04$ с; время паузы $t_{\text{п}} = 0,04$ с; давление на электроде $P = 40$ МПа. Как видно, для рассматриваемого покрытия с ростом его толщины наблюдается стабилизация прочности адгезионной связи.

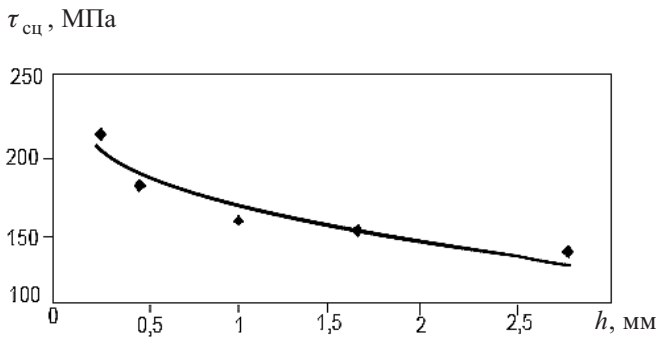


Рис. 2. Зависимость прочности адгезионной связи от толщины покрытия из самофлюсующегося порошкового сплава на основе никеля (ПГ-С1), полученного методом ЭКПП.

Применение метода графического дифференцирования зависимости $\tau_{\text{сц}} = f(h)$ с учетом поправочного коэффициента $1/(k \text{ th } kl)$ позволяет оценить уровень остаточных напряжений в покрытии и показать, что рост толщины покрытия приводит к снижению среднего значения остаточных напряжений вплоть до асимптотического минимального значения (рис. 3).

Анализ предельного состояния системы основа–покрытие исходя из принципа эквивалентности нагружения адгезионной связи. В условиях эксплуатации, например, при растяжении основы в выражении (1) $\sigma_{\text{п}}^{\text{ост}}$ следует заменить эффективным напряжением $\sigma_{\text{п}}^{\text{эф}}$, являющимся суммой остаточных $\sigma_{\text{п}}^{\text{ост}}$ и эксплуатационных $\sigma_{\text{п}}^{\text{эксп}}$ напряжений в покрытии:

$$h = \frac{\tau_{\text{сц}}}{\sigma_{\text{п}}^{\text{эф}}} \frac{1}{k \text{ th } kl}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\Pi}^{\text{эф}} = \sigma_{\Pi}^{\text{ост}} + \sigma_{\Pi}^{\text{эксп}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\Pi}^{\text{эксп}} = E_{\Pi} \varepsilon_{\text{o}}^{\text{кр}}, \quad (5)$$

$\varepsilon_{\text{o}}^{\text{кр}}$ – критическая деформация основы, соответствующая отслоению покрытия под действием эксплуатационного нагружения.

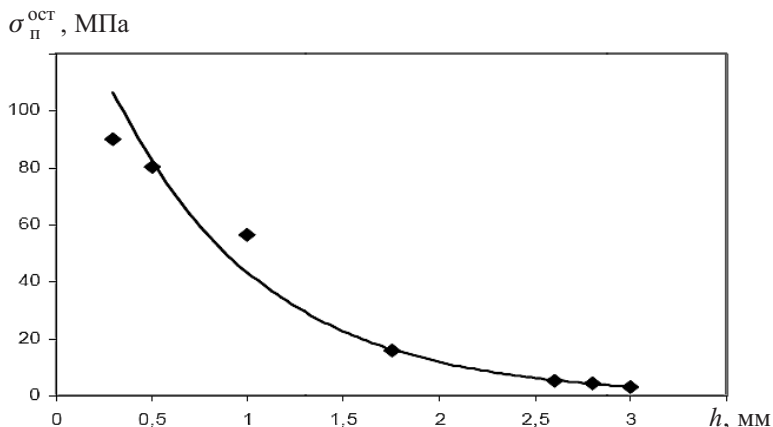


Рис. 3. Зависимость остаточных напряжений от толщины покрытия из самофлюсующегося порошкового сплава на основе никеля (ПГ-С1), полученного методом ЭКПП.

С учетом (4), (5) выражение (3) преобразуется к виду

$$h = \frac{\tau_{\text{сц}}}{(E_{\Pi} \varepsilon_{\text{o}}^{\text{кр}} + \sigma_{\Pi}^{\text{ост}})} \frac{1}{k \text{ th } kl}, \quad (6)$$

отсюда можно записать

$$\varepsilon_{\text{o}}^{\text{кр}} = \frac{\tau_{\text{сц}}}{E_{\Pi} h k \text{ th } kl} - \frac{\sigma_{\Pi}^{\text{ост}}}{E_{\Pi}}. \quad (7)$$

Выражение (7) приводит, казалось бы, к парадоксальному для большинства покрытий выводу, однако справедливому для покрытий, полученных методом ЭКПП: снижение остаточных напряжений с ростом толщины покрытия позволяет наносить покрытие с увеличенной толщиной при одновременном повышении возможной критической деформации основы. Таким образом можно увеличить нагрузочную способность системы основа–покрытие без риска отслоения покрытия.

Для расчета несущей способности конструктивных элементов с покрытием на стадии производства и восстановления изношенных деталей необходимо учитывать следующее:

большинство покрытий, в том числе и наносимые методом ЭКПП, требуют финишной механической обработки для обеспечения необходимых чистоты поверхности и размеров детали. Кроме операций шлифования более известны методы чистового точения инструментами из современных сверх-

твердых материалов [11]. Поэтому в толщине покрытия h следует предусмотреть припуск на финишную обработку;

для чистового точения детали с покрытием уровень адгезионной прочности $\tau_{\text{сц}}$ должен обеспечить возможность обработки без отслоения покрытия. Поэтому прочность адгезионной связи должна иметь запас, величина которого определяется режимами и условиями чистовой обработки.

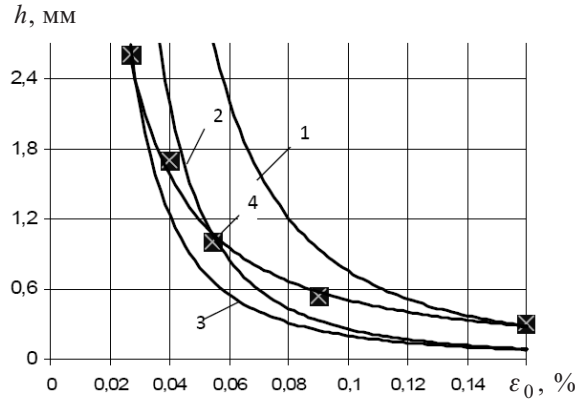


Рис. 4. Предельное состояние системы основа–покрытие при различных фиксированных значениях $\tau_{\text{сц}}$: 1 – $\tau_{\text{сц}} = 200$ МПа; 2 – $\tau_{\text{сц}} = 155$ МПа; 3 – $\tau_{\text{сц}} = 135$ МПа; 4 – на основании экспериментальной зависимости $\tau_{\text{сц}} = f(h)$ с учетом остаточных напряжений.

Для выбора оптимального соотношения ϵ_0 , $\tau_{\text{сц}}$ и h на рис. 4 приведены их зависимости, рассчитанные по уравнению (7) с учетом остаточных напряжений.

Выводы

1. Методом графического дифференцирования экспериментальной зависимости адгезионной прочности от толщины покрытия определены остаточные напряжения в покрытиях, полученных ЭКПП.

2. По принципу эквивалентности остаточных напряжений и критических деформаций основы при отслоении покрытия установлена функциональная связь между адгезионной прочностью, толщиной покрытия, критической деформацией основы и остаточными напряжениями, что позволяет определить характеристики системы основа–покрытие для условий финишной обработки и эксплуатации.

Резюме

Згідно з принципом еквівалентності навантаження адгезійного зв'язку за допомогою графічного диференціювання експериментальної залежності адгезійної міцності від товщини покриття оцінено залишкові напруження в покритті. Установлено функціональний зв'язок між адгезійною міцністю, товщиною покриття, критичною деформацією основи та залишковими напруженнями, що дозволяє вибирати параметри системи основа–покриття при фінішній обробці та експлуатації.

1. *Ляшенко Б. А.* Несущая способность материалов и конструктивных элементов с защитными покрытиями в экстремальных условиях эксплуатации: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1976. – 55 с.
2. *Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б.* Особенности высокочастотного нагружения материалов с покрытиями // Пробл. прочности. – 1998. – № 5. – С. 134 – 138.
3. *Бородин И. Н.* Упрочнение композиционными покрытиями. – М.: Машиностроение, 2000. – 141 с.
4. *Матвеев Н. В.* Служебные и физико-механические свойства несплошного нитридитанового покрытия // Свар. пр-во. – 2006. – № 9. – С. 16 – 21.
5. *Tsui Y. C., Howard S. J., and Clyne T. W.* The effect of residual stresses on the debonding of coatings. An experimental study of a thermally sprayed system // Acta Met. Mater. – 1994. – 42, No. 8. – P. 2837 – 2844.
6. *Hanabusa T., Kusaka K., Matsue T., et al.* Evaluation of internal stresses in single-, double- and multi-layered TiN and TiAlN thin films by synchrotron radiation // JSME Int. J. Ser. A. – 2005. – 47, No. 3. – P. 312 – 317.
7. *Фрейдин А. С., Нуртазин М. С.* Характер распределения остаточных напряжений в адгезионных соединениях разных типов // Механика полимеров. – 1971. – № 4. – С. 738 – 742.
8. *Верхотуров А. Д.* Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
9. *Лопата Л. А.* Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием с силовым активированием сдвигом: Автореф. дис. канд. ... техн. наук. – Минск, 1989. – 24 с.
10. *Ляшенко Б. А.* О критериях когезионно-адгезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 114 – 116.
11. *Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонский Л. Г. и др.* Точение износостойких защитных покрытий. – Киев. Техніка, 1997. – 146 с.

Поступила 06. 05. 2009