

УДК 621.792.4

Л.А. Лопата, доц., канд. техн. наук

*Институт воздушного транспорта национального авиационного университета, г. Киев*

## Зависимость модуля упругости порошковых покрытий от их пористости при электроконтактном припекании

Исследована связь между модулем упругости и пористостью порошковых покрытий при различных методах их нанесения. Пористость является основным средством оценки качества покрытий и зависит от технологии их получения. Снижение модуля Юнга покрытий при газопламенном напылении обусловлено наличием пористости до 30%, а при электродуговом напылении - до 20%. Электроконтактное припекание покрытий позволяет снизить пористость до 5-6% и приблизить значение модуля упругости покрытий к модулю упругости компактных материалов.

**электроконтактное припекание, порошковые покрытия, пористость, модуль упругости, механические свойства**

**Введение.** Пористость присуща многим видам порошковых покрытий и считается его свойством второго (после прочности сцепления), а в некоторых случаях и первого порядка. Пористость является основным средством оценки качества покрытий, особенно коррозионностойких и износостойких покрытий, где ее наличие нежелательно. Пористость покрытий и ее связь с их механическими свойствами, в частности с модулем упругости (E), давно привлекает внимание исследователей. Исследования механических свойств материалов с покрытиями - один из наиболее важных этапов исследований, который позволяет не только объективно судить о поведении деталей при эксплуатации, но и активно управлять ресурсом их работы, воздействуя на состав, структуру и, естественно технологию получения покрытий.

**Состояние вопроса.** Существенное снижение пористости покрытий можно обеспечить термическим упрочнением. Однако следует отметить, что объемная термообработка покрытий в ряде случаев является нежелательной, поскольку при этом ухудшаются их физико-механические свойства [1].

Уплотнение покрытий может быть проведено хромо- и алюмосодержащими фосфатными связующими, полимерными и другими материалами [2-3]. Для этих же целей применяется химико-термическая обработка (ХТО). В расплавах солей, газообразной среде проводят нитрирование, карбидизацию покрытий, а в различного рода обмазках – борирование и силицирование [4]. Если температура таких процессов низка (обычно менее 600° С), ХТО может влиять на прочность сцепления покрытий главным образом вследствие частичной релаксации напряжений в покрытии.

В целях повышения плотности покрытия широкое распространение получили методы последующей обработки покрытий: оплавление в печи или открытым пламенем газовой горелки, а также пропитка пластическими массами или расплавленными металлами.

Существующие методы обработки покрытий имеют ряд недостатков: при оплавлении, как правило, поры закрыты лишь с внешней поверхности покрытия, в подповерхностных слоях покрытия поры сохраняются. Примерно такой же эффект

обеспечивается заполнением пор расплавленным металлом или пластической массой: сквозного заполнения пор не происходит. Отмеченная картина приводит к тому, что при эксплуатации обработанных газотермических покрытий в условиях контактных взаимодействий в процессе изнашивания происходит раскрытие пор. Таким образом, открываются каналы, по которым химически активная среда поступает непосредственно к поверхности стальной основы. В конечном итоге активно развиваются процессы локальных коррозионных поражений, служащие причиной отказов деталей.

Повышению плотности напыленных покрытий способствует увеличение интенсивности термосилового взаимодействия частиц порошка и подложки, как в процессе формирования покрытий, так и при проведении последующей термомеханической обработки. Применение термомеханической обработки предварительно сформированных покрытий (например, нанесенных газотермическим напылением) позволяет повысить плотность покрытия при максимальном сохранении исходной структуры и свойств порошка [5].

Для получения покрытий с низкой остаточной пористостью широко используются технологические процессы, включающие горячую обработку порошковых слоев давлением.

В целях повышения качества газотермических покрытий непосредственно после нанесения было использовано механотермическое формирование (МТФ) пористых слоев. В результате плотность покрытий существенно возросла, пористость уменьшилась (табл. 1) [1].

Значительное снижение пористости после МТФ по сравнению с эффектом газопламенной обработки объясняется положительной ролью механического фактора, определяющего в условиях воздействия высоких температур развитие пластических деформаций, способствующих «залечиванию» пор [1].

Взаимодействие материалов в твердой фазе активируется не только температурой, но и давлением [6]. При этом для существенного ускорения взаимодействия материалов при высоких температурах требуется весьма низкие давления [8], инициирующие направленное движение структурных дефектов.

Таблица 1 - Влияние последующей обработки на пористость покрытий

| Сплав покрытия | Исходная пористость, % | Пористость покрытия после обработки, % |                                     |
|----------------|------------------------|--|-------------------------------------|
|                |                        | Оплавление газовой горелкой            | МТФ<br>Электроконтактное припекание |
| БрАЖ9 – 4      | 18                     | 2                                      | 0,07                                |
| СНГН – 35      | 7                      | 1,30                                   | 0,10                                |
| ЗВ16К          | 6                      | 1,45                                   | 0,08                                |
| БК – 52        | 8                      | 1,35                                   | 0,07                                |

Следовательно, применение механо-термического упрочнения (МТУ) является более эффективным методом повышения плотности покрытий, чем термическая

обработка. МТУ может проводиться в одной технологической цепочке с процессом нанесения покрытия, сразу по слою сформированного покрытия обкаткой в валках, роликах [7], нагревом пламенем дополнительной горелки.

Согласно анализу рассмотренной литературы и патентно-информационных исследований, среди большого количества существующих механо-термических методов упрочнения деталей порошковыми и компактными материалами преимущество следует отдать электроконтактным [8, 9, 10, 11], потому, что они позволяют: получать практически беспористые покрытия; более 150 МПа; сохраняют исходные свойства материалов покрытия и повышают свойства материала основы; отличаются минимальной зоной термического влияния тока на деталь (0,1...0,3мм) вследствие малой длительности импульсов нагрева; позволяют увеличить толщину покрытий в 3...6 раз; характеризуются высокой производительностью и низкой энергоемкостью процесса нанесения покрытия, отсутствием необходимости в использовании защитной атмосферы, отсутствием светового излучения и газовой выделения.

Электроконтактный метод упрочнения осуществляется под давлением при прямом пропускании электрического тока [12] и относится к импульсным технологиям, в основе которых лежат принципы синхронного сочетания импульсных режимов механической и электрической энергии. Метод электроимпульсного спекания представляет собой разновидность процесса горячего прессования. В отличие от обычной технологии порошковой металлургии прямое пропускание электрического тока через контактное сопротивление активирует и ускоряет протекание процессов, определяющих свойства спеченного материала. Порошок под влиянием электронагрева за короткое время становится пластичным, легко деформируется. При электроимпульсном спекании доминирующими являются процессы, которые происходят как при горячем прессовании, так и при сварке давлением. Степень участия каждого из процессов различна и зависит от температуры, давления, свойств материала.

**Постановка задачи.** Для подтверждения целесообразности электроконтактного припекания порошковых покрытий с целью снижения их пористости была поставлена задача: исследовать связь между модулем упругости и пористостью порошковых покрытий.

Исследования зависимости модуля упругости от пористости порошковых покрытий при электроконтактном припекании

Пористость на практике чаще всего определяют планиметрическим способом металлографического анализа. Измерение модуля упругости материалов осуществляется как динамическими, так и статическими методами [13]. Анализ данных, приведенных в литературе об упругих характеристиках покрытий, показал, что отношение величины динамического и статических модулей может изменяться в широком интервале: от 1 до 10 [13]. Учитывая, что методика определения адгезионной и когезионной прочности покрытия предполагает статистическое приложение растягивающих усилий, очевидно, что использование модуля упругости, измеренного при приложении нагрузки, позволит более объективно оценивать НДС покрытия, а, следовательно, и его предельные характеристики.

В работе [14] показана зависимость значения модуля Юнга от пористости. Модуль Юнга определялся в зависимости от пористости расчетным путем по методике Кашина [15]. В качестве объекта исследования была выбрана стальная подложка, покрытие: 1- ситаловое, 2- металлокерамическое. Значение модуля Юнга у монолитного материала выше ( $7,8 \cdot 10^4$  МПа), чем у пористого ( $6,2 \cdot 10^4$  МПа) при пористости 10% и ( $7,0 \cdot 10^4$  МПа) при пористости 5 %. Для металлокерамических

образцов величина модуля Юнга для таблеток с пористостью 5 % составляет  $21,5 \cdot 10^4$  МПа, что на 20 % выше, чем у соответствующих покрытий на стали  $18 \cdot 10^4$  МПа.

Отмечается [16], что различная пористость керамических материалов сильнее всего сказывается на величине модуля упругости. Для неорганических стекол экспериментальные результаты представлены в виде зависимости [17]:

$$E = E_0 (1 - \alpha_E P), \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости;

$E_0$  – модуль упругости беспористого материала;

$\alpha_E$  – константа, получаемая расчетным путем для сферической закрытой пористости.

Литературный обзор показал, что в основном присутствуют данные по исследованию зависимости модуля упругости от пористости для компактных материалов, а результаты исследований этой зависимости для покрытий отсутствуют. Так для напыленных покрытий борид циркония – медь связь между модулем упругости и плотностью газотермического покрытия не обнаружена [16]. Большинство исследователей рассматривают пористость и модуль упругости как самостоятельные характеристики, и не устанавливают связь между ними. Из экспериментальных результатов работы [17] следует устойчивая зависимость модуля упругости от пористости, близкая к линейной, для ситаловых покрытий на аустенитной стали X18H10T.

С целью выявления связи пористости с модулем Юнга напыленных покрытий при электроконтактном упрочнении использовались стандартные образцы.

Значения модуля Юнга для образцов с пористостью от 0 до 30 % были получены расчетным путем по методике [18]. Отмечают [18] зависимость физико-механических свойств компактных материалов от пористости. Ряд свойств монотонно убывает с ростом пористости и в общем виде описываются обобщенной функцией:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 - P)^m, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – численная характеристика свойств для пористого тела;

$\varepsilon_0$  – то же для беспористого тела;

$P$  – пористость, доли единиц;

$m$  – постоянный показатель степени.

Ю.А. Харламов [19] разработал объемную модель газотермического покрытия, сформированного в виде монослоев из цилиндрических моночастиц:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 f(\Phi), \quad (3)$$

где  $\Phi$  – фактор формы частиц, формирующих покрытие. Фактор формы служит критерием взаимосвязи пористости с относительной адгезионной и когезионной прочностью сцепления.

В целом имеет место близкое к нормальному распределение величин  $E_{\Pi}$ . Наиболее вероятное значение  $E_{\Pi} = 2 \cdot 10^4$  МПа при среднем квадратичном отклонении  $0,86 \cdot 10^4$  МПа. Для компактного цинка  $E = 9 \cdot 10^4$  МПа [19] Снижение модуля Юнга для покрытия, полученного ЭДН, обусловлено, по-видимому, наличием в нем 20 % пор и слоистой структуры (табл. 2, рис. 1). Материал покрытия: порошок твердого сплава ПГ-12Н-01 (основа – Ni, 8...14 % Cr, 1.7...2.5 В; 1.2...3.2 Si; 1.2...3.2 Fe; 0.3...0.6 С); порошковая проволока ПП ФМИ-2: шихта ФХБ (50 % Cr; 20 % В, 7% Al, 3 % Ti, 20 % Fe)+Al, ТУ 95.10-93

Таблица 2 - Зависимость механических свойств покрытий (на примере модуля Юнга) от пористости

| Метод | Марка материала | Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}$ , МПа |                           |    |     |      |      |      |
|-------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|----|-----|------|------|------|
|       |                 | Основа<br>Сталь 45                  | Покрытие с пористостью, % |    |     |      |      |      |
|       |                 |                                     | 5                         | 10 | 15  | 20   | 25   | 30   |
| ГПН   | ПГ-12Н-01       | 2                                   | -                         | -  | 3,2 | 2,7  | 2,5  | 2,2  |
| ЭДМ   | ПП ФМИ-2        | 2                                   | -                         | -  | 0,8 | 0,75 | 0,70 | 0,60 |
| ЭКП   | ПП ФМИ-2        | 2                                   | 1,35                      | -  | -   | -    | -    | -    |

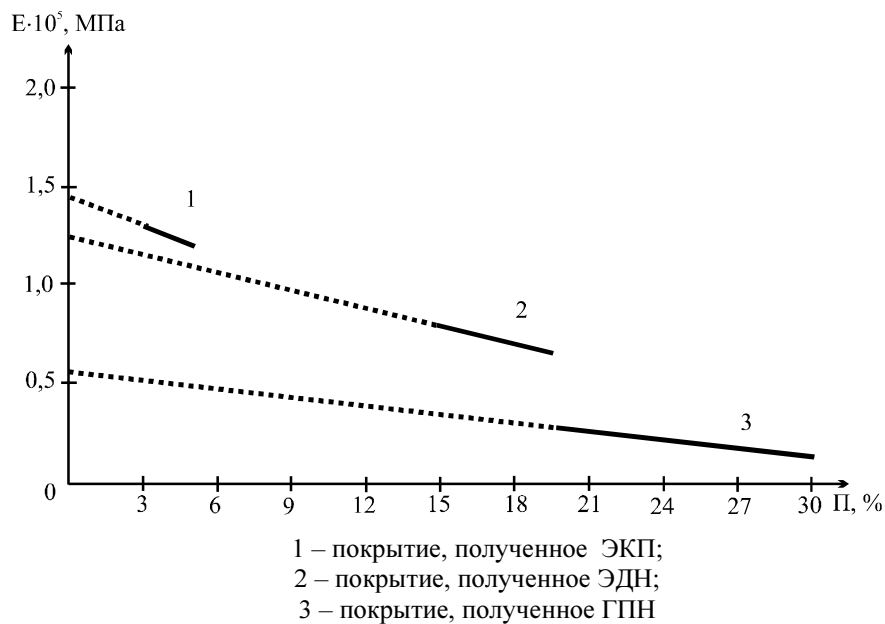


Рисунок 1 - Зависимость пористости покрытий от модуля Юнга

Режимы ЭКП: напряжение – 3...6 В; сила тока – 8...12 кА; усилие на электроде – 10...30 МПа; время импульса тока – 0,02...0,04; время паузы – 0,02...0,04 с.

Режимы ЭДН: напряжение – 18...35 В; сила тока 50...600 А; расстояние от сопла до напыляемой поверхности – 50...200 мм; давление сжатого воздуха – 0,4...0,5 МПа; расход сжатого газа (воздуха) – 60...150 м<sup>3</sup>/ч.

#### Выводы

Снижение модуля Юнга покрытий обусловлено наличием пористости (до 30% при газопламенном напылении и до 20% при электродуговом напылении). Электродуговое припекание покрытий позволяет снизить пористость до 5-6% и приблизить значение модуля упругости к модулю упругости компактных материалов.

#### Список литературы

1. Кершенбаум В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
2. Изучение защитных свойств металлических и металлополимерных покрытий / И.Л. Куприянов, М.Н. Короткина, В.С. Ивашко и др. // Защита металлов. 1986. Т. 22, № 4. С. 507-509.
3. 3. Металлополимерные покрытия для защиты сельхозмашин от коррозии. / И.Л. Куприянов, В.С. Ивашко, В.М. Сахадзе и др. // Тракторы и сельхозмашины. 1985. № 10. С. 38-40.
4. Кузнецов В.В., Клышко И.Н. Применение эмалевых фритт для оплавления напыленных покрытий // Технологические процессы и оборудование для упрочнения деталей машин, инструмента и технологической оснастки: Тез. докл. науч.-техн. конф. Мн.: БелНИИТИ

5. Коробов Ю.С. Расчет параметров движения, нагрева и окисление частиц при электродуговой металлзации. // Сварочное производство – 1998. – № 3. – С. 9-13.
6. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
7. М. Ергашев, Б. Матякубов Особенности получения упрочняющих покрытий способом электроконтактного припекания.// Автоматическая сварка – 1986 - №5 стр. 49 – 51.
8. Канарчук В.С., Лопата Л.А. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів: Сучасний стан, перспективи. Вісник // Збірник наукових праць транспортного університету та транспортної академії України. Вип. №4, Київ, РВВ НТУ, 2000, С.3-14.
9. Канарчук В.С., Посвятенко Е.К. Лопата Л.А. Шляхи удосконалення методів інженерії поверхні деталей машин. Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdow samochodowych i maszyn gobocznych samojezdnych, 2000, P. 20-23.
10. Канарчук В.С., Посвятенко Е.К. Лопата Л.А. Токін О.П. Електроконтактне зміцнення як метод інженерії поверхні деталей транспортних засобів при їх виготовленні і відновленні. Вісник //Збірник наукових праць транспортного університету та транспортної академії України. Вип. №4, Київ, РВВ НТУ, 2000, С.3-6.
11. Электроконтактное упрочнение как механо-термический метод управления качеством поверхности. Тематический сборник «Материалы, технологии и оборудование для восстановления деталей машин». Мн.: УП «Технопринт», Новополоцк, ПГУ, 2003. С. 252-254.
12. В.К. Ярошевич, Я.С. Генкин, В.А. Верещагин. Электроконтактное упрочнение. - Минск: "Наука и техника", 1982.-256с.
13. Ляшенко Б.А., Ришин В.В., Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю. Исследование прочности сцепления детонационно-напыленных покрытий // Проблемы прочности. - 1972.
14. Race Roy W. Effects of inhomogeneous porosity on elastic properties of ceramics. – J. Amer. Ceram. Soc. – Discussion and Notes. – 1975. – Vol. 58, № 9-10. – p. 458-459.
15. Hasselman D.P.H., Fulrath R.M. Effect of Small Fraction of Spherical Porosity on Elastic Module of Glass. – J. of the Amer. Ceram. Soc. – Discussion and Notes. – 1964. – Vol. 47, № 1. – p. 52-53.
16. Лоскутов В.С., Дехтярь Л.И. Механические свойства плазменнонапыленных покрытий из борида циркония, меди и их композиций. Порошковая металлургия. – Киев. – 1985. – № 7. – С. 78-81.
17. Антонова Е.А., Бурькова Л.И. Остаточные термические напряжения в металлокерамических покрытиях. Антикоррозионные покрытия. – Л.: Наука. – 1983. – с. 4-42.
18. Скороход В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений. – Киев: Техніка, 1982. – 167 с.
19. Харламов Ю.А. Прогнозирование пористости порошковых покрытий. – Порошковая металлургия. – 1990. – № 12. – С. 36-41.

*Л. Лопата*

**Залежність модуля пружності порошкових покриттів від їх пористості при електроконтактному припеканні**

Досліджений зв'язок між модулем пружності і пористістю порошкових покриттів

при різних методах їх нанесенні. Пористість є основним засобом оцінки якості покриттів і залежить від технології їх отримання. Зниження модуля Юнга покриттів при газополуменевому напиленні обумовлене наявністю пористості до 30%, а при електродуговому напиленні - до 20%. Електроконтактне припекання покриттів дозволяє понизити пористість до 5-6% і наблизити значення модуля пружності покриттів до модуля пружності компактних матеріалів.

*L. Lopata*

**Dependence of the module of resiliency of powder-like coverages on their porosity at the electrocontact burning**

Connection is probed between the module of resiliency and porosity of powder-like coverages at different methods their causing. Porosity is the basic mean of estimation of quality of coverages and depends on technology of their receipt. L of the module to the resiliency of coverages at flame spraying is conditioned the presence of porosity to 30%, and at electric arc spraying - to 20%. The electrocontact burning of coverages allows to reduce porosity to 5-6% and to approach the value of the module of resiliency of coverages to the module of resiliency of compact materials.

Одержано 07.04.11