

Вывод:

- формы потери устойчивости для перфорированных пластин в подавляющем большинстве случаев совпадают с формами потери устойчивости для пластин без отверстий;

- критическая нагрузка перфорированной пластины уменьшается при увеличении отношения диаметра отверстия к ширине пластины ( $d/b$ ), зависимость изменения критической нагрузки от диаметра отверстия является практически линейной;

- порядок расположения отверстий при малом отношении диаметра к ширине пластины ( $d/b < 0,2$ ) незначительно влияет на величину критической нагрузки, но при большом количестве отверстий диаметром  $d/b = 0,3$  и выше форма потери устойчивости значительно изменяется.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григолюк, Э.И. Перфорированные пластины и оболочки / Э.И. Григолюк, Л.А. Фильштинский. – М.: Наука, 1970. – 556 с.
2. Пронкевич, С.А. Потеря устойчивости прямоугольной перфорированной пластины, в зависимости от вида и размера перфораций // Аспирант и соискатель. – М., 2013. – № 5. – С. 121–123.
3. Лебедев, А.В. Устойчивость пластин, ослабленных отверстиями // Вестник СПбГУ, Сер. I. – 2009. – № 2. – С. 94–99.

УДК 620.17

### ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ С PVD/CVD ПОКРЫТИЕМ

*Константинов В.М., Ковальчук А.В.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Несмотря на существенный прогресс в области создания слоистых композиций с высоким уровнем свойств, существует проблема создания поверхностей с PVD/CVD покрытиями с заданным уровнем свойств. Это связывают с тем, что процесс формирования свойств композита с покрытием, а также образования самого покрытия и переходной зоны между покрытием и основным материалом, является многостадийным. Поэтому исследования свойств композитов покрытиями, связанные с фиксированием одних параметров, зачастую невозможны потому, что невозможно сохранить при этом неизменными другие [1]. А в случаях, когда это возможно, свойства покрытий и всей поверхностной композиции могут меняться скачкообразно. Поэтому актуальными являются исследования свойств систем покрытия на основе комплексного подхода. А так как нет известных технологических процессов, позволяющих реально получать вакуумные покрытия на металлических поверхностях с заданным или регулируемым уровнем свойств, то актуальным в условиях производства является контроль свойств поверхностей с покрытиями по основным параметрам в соответствии с условиями эксплуатации упрочняемых изделий.

Следует выделить наиболее важные для контроля свойства композитов с покрытиями:

- 1) нанотвердость и микротвердость;
- 2) модули упругости и жесткость;
- 3) износостойкость и коэффициент трения;
- 4) адгезионные свойства;
- 5) в ряде случаев коррозионная стойкость.

1. Прямое измерение твердости тонких покрытий с использованием обычных методов определения микротвердости является не совсем корректным. Это связано с тем, что в процессе нагружения пластической деформации помимо покрытия, подвергается подложка. Деформация подложки имеет место уже при глубине вдавливания индентора более чем на десятую часть толщины покрытия. Полученное таким образом значение твердости является результатом совместного вклада твердости покрытия и подложки. Для определения истинной твердости покрытия эти вклады принято разделять. Большинство моделей предлагают линейную зависимость измеренной твердости с твердостью подложки и покрытия. Различия используемых моделей состоят в определении коэффициента, входящего в линейное уравнение, который определяют как функцию от длины диагонали отпечатка, отношение упругих свойств покрытия и подложки, функцию от весовых коэффициентов, учитывающих объемы подложки и покрытия в зоне нагружения, как отношение пластической деформации в покрытии и подложке под индентором, функцию от энергии деформации покрытия и подложки и других [2].

Фактически, значения истинной твердости покрытия можно определить лишь при очень малых нагрузках (до 0,01 Н) и при глубине проникновения индентора до 10 % толщины покрытия, во всем остальном диапазоне нагрузок значения твердости будут зависеть от влияния подложки и, как правило, будут занижены, что показано на рисунке 1, где схематично представлены значения измеряемой твердости при различных глубинах внедрения индентора в сравнении с аналитической кривой твердости покрытия и выделена область влияния подложки.

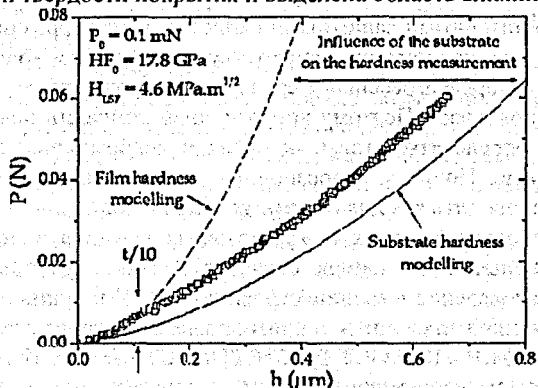


Рисунок 1 – Зависимость твердости покрытия от глубины внедрения индентора [2]

Довольно простым является способ определения истинной твердости слоистых композитов [3]. Согласно этому способу, для нахождения истинного значения микротвердости тонкого твердого покрытия необходимо замерить микротвердость с поверхности образца или на поперечном шлифе по размеру восстановленного отпечатка, оставленного алмазным индентором, на стандартном приборе типа ПМТ. Затем по соотношению найденных значений при нагрузках 0,1 и 0,2 Н определить значение истинной микротвердости с учетом вклада твердости подложки. Для согласования результатов с известными зарубежными микроиндентирование следует проводить по DIN EN ISO 3497, наноиндентирование – по DIN EN ISO 14577-1.

2. Значения модулей упругости и жесткости покрытий принято определять при обработке кривых нагружения-разгрузки, получаемых при наноиндентировании, по методике Оливера-Фарра [4].

3. Для определения износостойкости и коэффициента трения достаточным можно считать использование простого и эффективного метода определения износостойкости по величине линейного (или объемного) износа при трении в паре «диск – плоскость», разработанного в НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ под руководством Ф.Ф. Комарова. Способ предполагает оценку величины линейного износа при схеме сухого трения скольжения в паре «диск – плоскость».

4. Наиболее распространенными методами определения силы адгезии покрытий является метод отрыва покрытия от подложки и метод царапания (стандарт VDI-3198). Метод отрыва применяют, как правило, для толстых покрытий, а метод царапания для тонких. Авторами [5] предложен более простой быстрый метод качественной оценки адгезионных свойств покрытий при использовании нетрадиционного для этого способа – вытяжки сферической лунки. Применение этого метода для слоистых композитов позволяет производить сравнительную оценку силы адгезии по наличию трещин, отслоений и сколов при исследовании результатов вытяжки сферической лунки под микроскопом.

5. Тонкие керамические покрытия, несмотря на их химическую инертность, не обладают достаточными защитными свойствами от коррозии. Это обусловлено тем, что в них, как правило, присутствуют в большом количестве поры и дефекты, через которые агрессивная среда может проникать до границы раздела покрытия и подложки. Поэтому коррозионная стойкость поверхности с покрытием будет определяться главным образом коррозионной стойкостью основного материала. Поэтому коррозионные испытания композитов с покрытиями следует проводить как для объемных материалов.

Одним из наиболее быстрых и эффективных является способ проведения коррозионных испытаний в камере соляного тумана, осуществляемый на кафедре «Материаловедение в машиностроении» БНТУ на установке ASCOTT S 120 IP, позволяющей проводить коррозионные испытания в соответствии со стандартами ASTM B 117, ГОСТ Р 9.316-2006, СТБ ISO 2081-2009, ВУ и корректировать условия испытаний с учетом реальных условий эксплуатации изделий.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наноструктурные покрытия / Под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссена; перевод с англ. А.В. Хачояна; под ред. Р.А. Андриевского. – М.: Техносфера, 2011. – 752 с.
2. Sun, S. Finite element analysis of the critical ratio of coating thickness to indentation depth for coating property measurements by nano-indentation. / S. Sun; S. Zheng, T Bell // *Thin Solid Films*. – 1995. – Vol. 258. – № 1-2, – P. 198-204.
3. Чумиков, А.Б., Анифьев, В.А. Способ измерения микротвердости тонких металлических покрытий: патент RU № 2132546; G 01N 003/44; 27.06.1999.
4. Oliver, W. C. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver; G. M. Pharr // *Journal of materials research*. – 1992. – Vol. 7. – №. 6. – P. 1564-1583.
5. Константинов, В. М. Повышение эксплуатационных свойств вакуумных наноструктурных покрытий упрочнением основы из конструкционной стали / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук // НИРС 2012: сборник научных работ студентов Республики Беларусь. – Минск, 2013. – С. 150.

УДК 621.791

## ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

*Мешкова В.В., Кардаполова М.А., Луцко Н.И.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Исследована микротвердость покрытий, полученных на стали методом лазерной обработки из порошков, способных к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС).

Введение. В современных условиях производства возникает необходимость в разработке новых материалов, обеспечивающих лучшие эксплуатационные характеристики деталей, узлов механизмов, инструмента и оснастки. Перспективными направлениями в области повышения долговечности работы и качества рабочих поверхностей являются упрочнение и нанесение покрытий на поверхности узлов и деталей.

Одним из эффективных методов улучшения качества поверхности является лазерная обработка, предоставляющая широкие возможности для получения покрытий, в том числе и с применением различных упрочняющих материалов. Этим методом могут создаваться покрытия из материалов, имеющих различные физико-механические свойства; покрытия, состоящие из металлических материалов, которые трудно получить другими методами.

Лазерная обработка является одним из способов вызова реакции горения при самовоспламеняющемся высокотемпературном синтезе (СВС). СВС это процесс распространения химической реакции, вызванной сильным тепловым воздействием на смеси материалов с образованием покрытий на поверхности, обладающих различными свойствами. Технология СВС применяется в различных отраслях промышленности: машиностроении, металлургии, химической промышленности, электротехнике и электронике, авиационной технике, строительстве.