

УДК 539.21

М. М. БАРКОВСКАЯ, Р. А. ПУЛЯШКО
Брест, БрГТУ

УПРУГОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Для определения механических характеристик покрытий используется метод непрерывного индентирования (НИ) при малых нагрузках, позволяющий изучать микромеханическое поведение и структурную чувствительность механических свойств в покрытиях [1]. Цель работы – изучить упругое восстановление нитридных покрытий по измеряемому смещению индентора h_{max} в одном цикле P - h -диаграмм, полученных методом НИ.

Механические характеристики покрытий изучались методом НИ с помощью динамического микродвердомера Shimadzu DUN-202 [2; 3]. В работе использовался индентор Берковича в форме трехгранной пирамиды с углом между гранями 115° , поскольку он позволяет избежать проблемы сведения четырех граней в одну точку, свойственную индентору Виккерса.

Перед измерением с помощью компьютерной программы задавались следующие параметры испытаний: нагрузка P_{max} в пределах 50 мН и 100 мН; скорость нагружения 0,17–4,41 мН/с (подбиралась таким образом, чтобы время нагружения было равно 10–20 с.); время выдержки под нагрузкой 15 с. Для каждого значения нагрузки P_{max} выполнялось 10 измерений.

Величину упругого восстановления (долю упругой составляющей в общей деформации) W_e рассчитывали из P - h -диаграммы по формуле:

$$W_e = \frac{h_{max} - h_r}{h_{max}},$$

где h_r – глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки.

Представленные на рисунке 1 P - h -диаграммы характеризуют различную реакцию системы «покрытие-подложка» на прилагаемую нагрузку на индентор. Так, на всех P - h -диаграммах кривые нагрузки 1, отражающие пластические деформации исследуемого покрытия, можно описать параболлами, обрывающимися на значениях нагрузки P_{max} . Такое поведение, по-видимому, обусловлено тем, что упругие напряжения при индентировании остаются малыми (по сравнению с напряженной пластической деформацией), в результате чего упругая реакция системы остается слабой. В то же время по кривой разгрузки 2 определяют упругие характеристики покрытия, отражающиеся на взаимном расположении ветвей нагружения и разгрузки записанной P - h -диаграммы индентирования (рисунок 1).

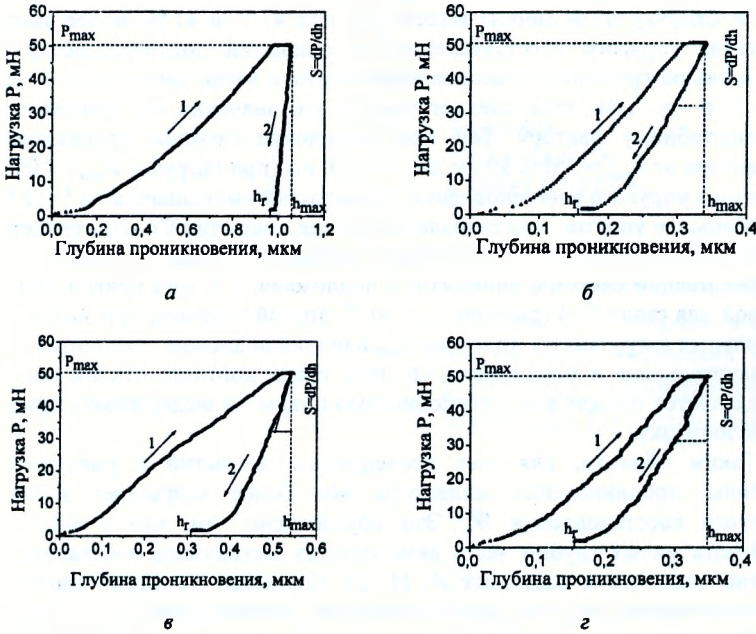


Рисунок 1 – P - h -диаграммы при максимальной нагрузке на индентор Берковича, равной 50 мН для стали Ст3 (а) и покрытий (б – г):

1 – кривая нагружения, 2 – кривая разгрузки;

а – сталь Ст3, б – покрытие TiN, в – покрытие $Cr_{0.8}N_{0.2}$, г – покрытие $Ti_{0.6}Cr_{0.4}N$

Можно заметить, что на P - h -диаграмме (рисунок 1, а), полученной от стальной подложки (сталь Ст3), кривая разгрузки 2 имеет вид почти вертикальной прямой (глубина остаточного отпечатка h_r равна 0,96 мкм при максимальной глубине проникновения индентора h_{max} 1,05 мкм). Следовательно, даже при малых нагрузках пластические деформации в стали Ст3 проявляются сильнее, и она обладает высокой вязкостью (~91%), в то время как в нитридных покрытиях TiN, $Cr_{0.8}N_{0.2}$ и $Ti_{0.6}Cr_{0.4}N$, в противоположность стальной подложке, при уменьшении (снятии) нагрузки проявляется заметное упругое восстановление ($h_r \ll h_{max}$), демонстрирующее упругую аккомодацию значительной доли упругих деформаций (рисунок 1, б – г).

Согласно расчетам, при максимальной глубине проникновения индентора $h_{max} = 350 \pm 30$ нм при снятии нагрузки величина упругого восстанов-

ления в покрытии $Ti_{0,6}Cr_{0,4}N$ составляет 60 %, в то время как в покрытиях TiN и $Cr_{0,8}N_{0,2}$ эта величина имеет значения 47 % и 41 %. Более высокие значения упругого восстановления W_e покрытий подтверждаются тем, что ветвь разгрузки 2 располагается ближе к ветви нагружения 1 (рисунок 1, б – з). При этом следует учесть, что значение W_e чувствительно к масштабному фактору. Так, при увеличении глубины проникновения индентора от $h_{max} = 350 \pm 30$ нм до 700 ± 20 нм (при нагрузке $P_{max} = 100$ мН) величина упругого восстановления W_e покрытий уменьшается на 5–10 %.

Меньшее упругое восстановление W_e для покрытия $Cr_{0,8}N_{0,2}$ свидетельствует об уменьшении относительно вклада покрытия в механический отклик полной системы «покрытие – подложка», т. е. вид кривой подобен кривой для стали Ст3 (рисунок 1, а, в). С другой стороны, при малых максимальных нагрузках на индентор h_{max} влияние подложки становится очень незначительным и показывает, что при таком контакте отклик системы определяется прежде всего способностью покрытия выдерживать прилагаемую нагрузку.

Таким образом, для всех исследуемых покрытий с уменьшением глубины проникновения индентора все более возрастает величина упругого восстановления W_e . Это обусловлено тем, что с переходом в область малых глубин часть вязкоупругих механизмов восстановления блокируется, что и дает рост W_e [1; 2]. Покрытие $Ti_{0,6}Cr_{0,4}N$ характеризуется высоким упругим восстановлением, достигающим 60 %. Лимитирующим механизмом деформации покрытия становится диффузионный массоперенос и (или) зернограничное скольжение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин, Ю. И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикронных, тонких приповерхностных слоях и пленках / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 12. – С. 2113–2142.
2. Барковская, М. М. Механические свойства вакуумно-дуговых покрытий / М. М. Барковская, В. В. Углов, В. В. Ходасевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия : сб. трудов 12-й Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф., Москва, 26–27 нояб. 2013 г. / Моск. авиац.-техн. ин-т ; редкол.: А. П. Петров (пред.) [и др.]. – М., 2013. – С. 231–235.
3. Прочностные характеристики вакуумно-дуговых покрытий / М. М. Барковская [и др.] // Радиационная физика твердого тела : труды XXIV междунар. конф., Севастополь, 7–12 июля 2014 г. / М. : ФГБНУ «НИИ ПМТ» ; редкол.: Г. Г. Бондаренко (отв. ред.) [и др.]. – М., 2014. – С. 438–448.