

В процессе напыления, как известно, в покрытии образуется в основном низкотемпературная γ -модификация Al_2O_3 . Однако в слоях, контактирующих с атмосферой и с подложкой, происходит более быстрое охлаждение частиц Al_2O_3 . В результате в них сохраняется высокотемпературная α -модификация. Этим и объясняется наличие верхней и нижней зон с высокой микротвердостью.

В результате лазерной обработки покрытия (до глубины 0,3 мм) образуется зона α -модификации окиси алюминия с высокой микротвердостью. Нижняя зона с высокой микротвердостью имеет то же происхождение, что и в покрытии после напыления.

Сравнивая износостойкость покрытий из окиси алюминия, обработанного лазером и не обработанного, можно определить зависимость их износостойкости от характера кристаллического строения.

На рис. 3 показаны зависимости износа покрытий, обработанных с помощью лазерной установки и не обработанных, от контактного давления. Видно, что износ обработанных образцов в 1,6...2,2 раза меньше износа образцов, не подвергшихся лазерной обработке.

Таким образом, можно сделать вывод, что от типа кристаллического строения окиси алюминия существенно зависит износостойкость покрытия из этого материала. Скорость изнашивания покрытия из окиси алюминия с гексагональной решеткой $\alpha-Al_2O_3$ меньше, чем из $\gamma-Al_2O_3$, т. е., несмотря на различие в типе связи между атомами в решетке у металлов и керамики, зависимость износостойкости от типа кристаллического строения для них примерно одинакова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Швецова Е.М. Влияние скорости скольжения на изнашивание одноименных металлов//Трение и износ в машинах. — М., 1955. — Вып.10. — С. 5–34.
2. Бокий Г.Б. Кристаллохимия. — М., 1971. — 400 с. 3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. — М., 1978. — 792 с.

УДК 669.14.018:621.317.7.083.4

С.А.ИВАШЕНКО, канд.техн.наум
Е.В.МАКАРЕВИЧ, В.И.ПЛАХОТНЮК,
С.И.МОЙСЕЕНКО (БПИ)

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Напряжения, возникающие в тонкопленочных покрытиях при нанесении их в вакууме, оказывают существенное влияние как на эксплуатационные характеристики деталей, так и на показатели качества их поверхности. Отсюда вытекает необходимость в проведении исследований процесса формирования напряжений в системе подложка — покрытие, что в конечном итоге даст возможность получать покрытия с требуемыми остаточными напряжениями. Существующие устройства для исследования напряжений малопригодны ввиду не-

обходимости размещения измерительных устройств в вакуумной камере, в зоне воздействия высокоионизированной плазмы.

Авторами разработано оригинальное устройство для исследования напряжений в тонкопленочных вакуумных покрытиях. Принцип измерения напряжений основан на регистрации изменения радиуса кривизны плоского образца, закрепленного консольно. Радиус кривизны образца, а следовательно, и напряжения, возникающие при нанесении покрытия, определяются по отклонению свободного конца образца, которое фиксируется лучом лазера ЛГН-105.

Устройство (рис.1) работает следующим образом. Образец 2 (тонко-

листовая пластина), закрепленный в подложкодержателе, помещают в вакуумную камеру 3 так, чтобы поток частиц наносимого материала покрытия из испарителя 4 через защитный экран 5 с прорезью попадал на его поверхность. Экран служит для защиты противоположной стороны образца от запыления. Луч 1 лазера 10, закрепленного в специальном кронштейне 9, через смотровое окно 7 направляется на незакрепленный конец образца. Отраженный луч 6 фиксируется на шкале 8, установленной на смотровом окне.

При исследовании деформации образца были приняты следующие допущения: образец изгибается по цилиндрической поверхности с переменным радиусом R ; толщина образца мала по сравнению с R ; при изгибе образца его поперечное сечение остается неизменным.

Падающий луч отражается от поверхности изогнутого образца так же, как и от плоскости, касательной к образцу в точке падения луча. Следовательно, градуирование шкалы можно производить, моделируя процесс изгиба незакрепленного конца деформируемого образца поворотом прямого образца относительно точки закрепления. С целью упрощения расчетов градуирование шкалы устройства производилось по углу α падения луча лазера на образец.

Методически градуирование шкалы осуществлялось следующим образом. Рассматривались три положения образца OF относительно шкалы (рис. 2). Положение образца при повороте его относительно точки закрепления однозначно определяется отрезком CB — расстоянием между прямым и отраженным лучами на шкале. Таким образом, градуировочный расчет шкалы устройства сводится к определению зависимости между расстоянием CB и углом α .

При исходном положении образца — параллельно плоскости шкалы (рис. 2, a)

$$CB = 2KД \operatorname{tg} \alpha .$$

(1)

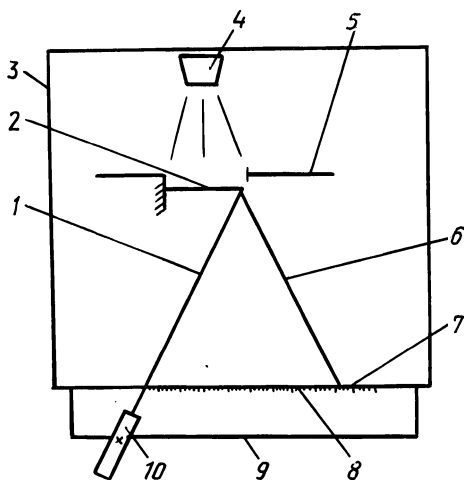


Рис. 1. Схема устройства для определения внутренних напряжений в тонкопленочных покрытиях

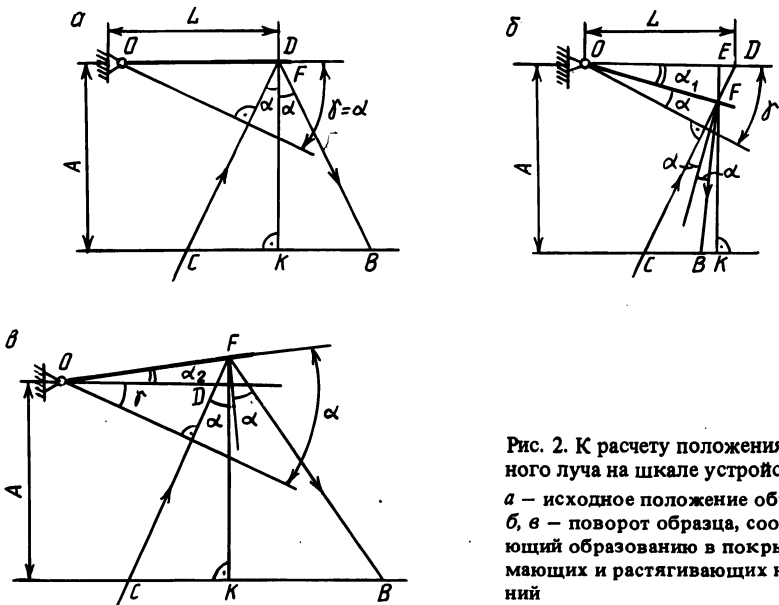


Рис. 2. К расчету положения отраженного луча на шкале устройства:
a – исходное положение образца;
б, в – поворот образца, соответствующий образованию в покрытии сжимающих и растягивающих напряжений

При формировании в покрытии сжимающих напряжений свободный конец образца будет перемещаться по направлению к шкале (рис. 2, б).

Тогда

$$CB = CK - BK = FK [\operatorname{tg}(a + a_1) - \operatorname{tg}(a_1 - a)], \quad (2)$$

где a_1 – угол поворота образца по направлению к шкале.

В силу конструктивных особенностей установки для нанесения покрытий предельное отклонение образца в сторону смотрового окна/ограничивается положением, при котором образец перпендикулярен к ходу луча лазера.

При формировании в покрытии растягивающих напряжений (рис. 2, в) свободный конец образца изгибается в сторону испарителя. В этом случае

$$CB = CK + BK = FK [\operatorname{tg}(a - a_2) + \operatorname{tg}(a + a_2)],$$

где a_2 – угол поворота образца в сторону испарителя.

Предельное отклонение образца, т. е. угол a_2 , ограничивается габаритами смотрового окна.

Для удобства вычислений целесообразно вывести универсальную зависимость, включающую все три рассмотренных выше случая. С этой целью в расчеты вводится постоянный угол γ (см. рис. 2, а), который ограничен двумя положениями образца: параллельным шкале и перпендикулярным к ходу луча лазера. Тогда для каждого из рассмотренных случаев углы поворота образца a_1 и a_2 можно выразить через угол γ : $a_1 = \gamma - a$; $a_2 = a - \gamma$.

Угол γ определяется следующим образом. Образец выставляется параллельно плоскости шкалы. Для этого лазер 10 (см. рис. 1) закрепляется на кронштейне 9 так, чтобы луч 1 был перпендикулярен к смотровому окну 7

(это достигается совмещением прямого и отраженного от смотрового окна лучей). Затем перпендикулярно к лучу лазера устанавливается образец. Совмещение лучей в этом случае достигается за счет поворота образца относительно точки его закрепления. После этого лазер перемещается в рабочее положение.

Зная расстояние от шкалы до образца $KD = A$ (см. рис. 2, а), из (1) получаем

$$\gamma = \text{arctg} [CB / (2A)] .$$

Подставив значение угла a_1 в формулу (2), имеем (см. рис. 2, б):

$$CB = FK [\text{tg} \gamma - \text{tg}(\gamma - 2a)] , \quad (3)$$

где

$$FK = A - EF . \quad (4)$$

Из рассмотрения треугольников OEF и EFD с учетом того, что $\angle EOF = \gamma - a$ и $\angle EFD = \gamma$, следует

$$EF = \frac{OD \text{tg}(\gamma - a)}{\text{tg}(\gamma - a) \text{tg} \gamma + 1} , \quad (5)$$

где $OD = L$ — расстояние от точки закрепления образца до точки падения луча лазера.

Подставив в формулу (3) значения FK из (4) и EF из (5), получим

$$CB = \left[A - \frac{L \text{tg}(\gamma - a)}{\text{tg}(\gamma - a) \text{tg} \gamma + 1} \right] [\text{tg} \gamma - \text{tg}(\gamma - 2a)] .$$

Погрешность моделирования, вызванная параллельным переносом плоскости, касательной к изогнутому образцу, до положения, при котором она проходит через точку его закрепления, определяется по методике вывода формул (3)...(5). С учетом данной погрешности

$$CB = \left[A - \frac{L \text{tg}(\gamma - a)}{\text{tg}(\gamma - a) \text{tg} \gamma + 1} \right] [\text{tg} \gamma - \text{tg}(\gamma - 2a)] + \frac{L \text{tg}(\gamma - a)}{2[\text{tg}(\gamma - a) \text{tg} \gamma + 1]} [\text{tg} \gamma - \text{tg}(\gamma - 2a)] ,$$

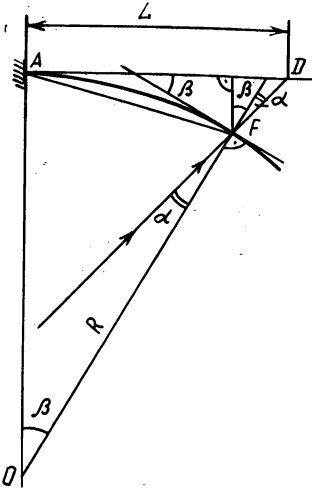
или после упрощений

$$CB = \left[A - \frac{L \text{tg}(\gamma - a)}{2[\text{tg}(\gamma - a) \text{tg} \gamma + 1]} \right] [\text{tg} \gamma - \text{tg}(\gamma - 2a)] . \quad (6)$$

Полученная зависимость (6) позволяет, задавая угол падения луча, произвести градуировку шкалы разработанного устройства для измерения угла β (рис. 3) при нанесении покрытия, так как его изменение ведет к такому же изменению угла a .

Поскольку градуировка шкалы устройства производилась при повороте прямого образца относительно точки его закрепления, а в реальных условиях

Рис. 3. Схема для расчета зависимости $R = f(a, \beta)$



образец деформируется, то следующим этапом было установление зависимости $R = f(a, \beta)$.

Точкой падения луча лазера на образец в исходном положении является точка D (рис. 3), в деформированном состоянии – точка F. Угол между лучом лазера и прямой OF есть угол падения a . Радиус $R = OF$ определяется по формуле

$$R = \frac{AF}{2\sin(\beta/2)} \quad (7)$$

Длину хорды AF определим, рассмотрев треугольник AFD:

$$\angle AFD = 90^\circ + \beta/2 + a, \quad \angle ADF = 90^\circ - \beta - a.$$

По теореме синусов

$$AF = AD \frac{\sin(90^\circ - \beta - a)}{\sin(90^\circ + \beta/2 + a)} = AD \frac{\cos(\beta + a)}{\cos[(\beta/2) + a]}.$$

Подставив это выражение в формулу (7), получаем зависимость радиуса R от углов a и β , определяемых по шкале устройства:

$$R = L \frac{\cos(\beta + a)}{2\cos[(\beta/2) + a]\sin(\beta/2)},$$

где $L = AD$ – расстояние от точки закрепления образца до точки падения луча лазера на образец, находящийся в исходном положении.

Таким образом, с помощью разработанного устройства можно находить зависимости между напряжениями, возникающими в покрытии, и параметрами процесса его нанесения.