

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НЕМАГНИТНЫЕ ПОДЛОЖКИ

*Белорусская государственная политехническая академия  
Минск, Беларусь*

Как известно, вакуумно-плазменные электродуговые покрытия формируются в результате взаимодействия плазменного потока материала катода с подложкой, что определяет топографию ее поверхности. Несмотря на большое количество работ, посвященных свойствам вакуумных конденсатов [1–4] до сих пор не выяснены основные закономерности формирования шероховатости покрытий на немагнитных подложках. Поэтому выявление основных факторов, влияющих на шероховатость вакуумно-плазменных покрытий, а также изыскание технологических методов, обеспечивающих стабилизацию шероховатости поверхности в процессе нанесения покрытий представляется актуальным.

Формирование покрытий на подложках из немагнитных материалов проводилось с использованием вакуумной установки УРМЗ.279.048, оснащенной дополнительно импульсным генератором плазмы для получения покрытий из углеродной алмазоподобной пленки (УАПП). Эксперименты проводились с использованием образцов из аустенитной стали 12Х18Н10Т, бронзы БрА10 и алюминиевого сплава Д16Т, имевших различную исходную шероховатость поверхности. Параметры шероховатости ( $R_a$ ,  $R_{max}$ ,  $t_p$ ) измерялись профилографом-профилометром модели 252. Режимы очистки и формирования покрытий TiN были следующими: ионная бомбардировка проводилась при ускоряющем напряжении 1000В и токи дуги 90А; осаждение покрытия осуществлялось при напряжении на образцах 100В, токе дуги 90А и давлении реакционного газа (азота) в камере  $9 \times 10^{-2}$  Па. Режимы осаждения УАПП: напряжение разряда генератора (импульсного)  $U = 300$ В, емкость накопителя  $C = 5000$  мкф, число импульсов разрядов  $N = 50 \cdot 10^3$ . В качестве материала катода служил графит марки МПГ-6.

На рис. 1 показано изменение параметра шероховатости  $R_a$  поверхности образцов из аустенитной стали после нанесения покрытия из нитрида титана. Установлено, что при одинаковых условиях нанесения покрытий увеличение исходной шероховатости подложки ( $R_a$ ) приводит к возрастанию шероховатости покрытия ( $R_a'$ ). Анализ зависимостей позволяет выделить две характерные зоны. При исходном  $R_a < 0,4-0,5$  мкм с нанесением покрытия среднее арифметическое отклонение профиля поверхностей увеличивается. Если  $R_a = 0,5-1$  мкм, то нанесение покрытия не приводит к существенному изменению параметров шероховатости образцов, а отношение  $R_a/R_a'$  стре-

мится к 100%. Таким образом, при  $Ra$  более 0,5 мкм шероховатость покрытия будет определяться исключительно величиной шероховатости подложки.

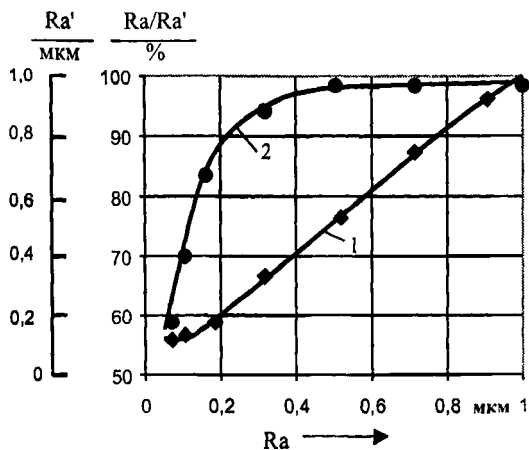


Рис. 1. Изменение шероховатости ( $Ra$ ) поверхности (1) и относительной величины  $Ra/Ra'$  (2) покрытия из нитрида титана (подложка – сталь 12X18H10T;  $Ra$  – исходный параметр шероховатости;  $Ra'$  – после нанесения покрытия)

Аналогичное влияние на характер изменения высоты микронеровностей образцов оказывает нанесение покрытия из УАПП (рис. 2).

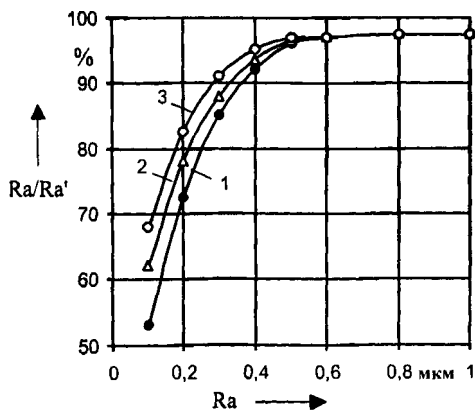


Рис. 2. Изменение шероховатости ( $Ra$ ) поверхности при формировании покрытий из углеродной алмазоподобной пленки (1 – сплав Д16Т; 2 – бронза BrA10; 3 – сталь 12X18H10T;  $Ra$  – исходный параметр шероховатости;  $Ra'$  – после нанесения покрытия)

Следует отметить, что при исходной шероховатости  $Ra > 1,5-2$  мкм шероховатость покрытия оказывается меньше исходной шероховатости подложки, что объясняется частичным разрушением пиков микронеровностей при ионной бомбардировке. Однако при шероховатости более  $Ra 2-2,5$  мкм добиться сплошности покрытия практически невозможно из-за эффекта затенения, что не позволяет использовать такие защитные покрытия на практике. В то же время исходная шероховатость ниже  $Ra 0,1 \dots 0,12$  мкм практически не влияет на конечную шероховатость покрытий, т.е. в этой области на шероховатость преобладающее влияние оказывают параметры процесса формирования покрытия.

Изменение относительной опорной длины профиля для образцов из аустенитной стали 12X18H10T после нанесения углеродной алмазоподобной пленки и TiN при различных исходных параметрах шероховатости показано на рис.3.

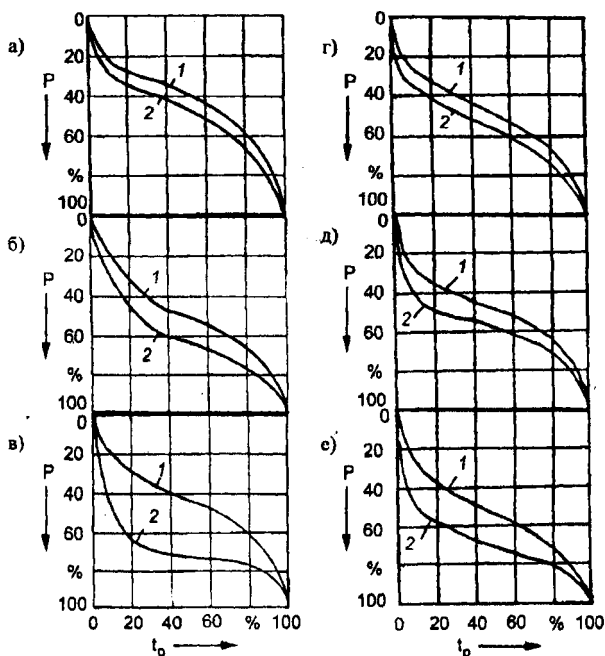


Рис.3. Изменение относительной опорной длины профиля  $t_p$  образцов из стали 12X18H10T в процессе осаждения углеродной алмазоподобной пленки (а-в) и нитрида титана (г-е) при исходном параметре шероховатости: а, г –  $Ra 0,6$  мкм; б, д –  $Ra 0,36$  мкм; в, е –  $Ra 0,13$  мкм; 1 – до нанесения покрытия; 2 – после нанесения покрытия

Нанесение покрытий приводит к уменьшению относительной опорной длины профиля при любых исходных параметрах шероховатости образцов. Особенно значительно снижается  $t_p$  при минимальных исходных параметрах их шероховатости. Аналогичная картина наблюдается и для образцов из других исследуемых материалов. Значительное уменьшение  $t_p$  связано, по-видимому, с особенностями осаждения покрытия на образцах. Поскольку при нанесении покрытия подложка находится под напряжением, заряженные частицы осаждаются в первую очередь на выступах поверхности образца. Это приводит к увеличению параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_{max}$  поверхности образцов после нанесения покрытия и к уменьшению относительной опорной длины профиля.

Для определения зависимости шероховатости поверхностей с покрытием TiN от исходной шероховатости подложки и толщины покрытия были подготовлены образцы из стали 12X18H10T после точения, шлифования и полирования. При этом исходная шероховатость составляла  $R_a$  3,2–0,16 мкм. Осаждение покрытия проводилось при следующих режимах:  $I=90$  А,  $U_{\text{н}}=120$  В,  $P=9 \times 10^{-2}$  Па. Толщина покрытия изменялась в пределах 3–15 мкм. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

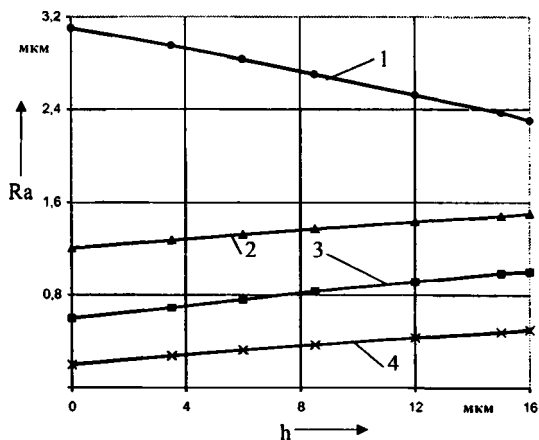


Рис.4 Зависимость шероховатости ( $R_a$ ) поверхности образцов с покрытием TiN от толщины покрытия и шероховатости подложки: 1 –  $R_a$  3,2 мкм (чистовое точение); 2 –  $R_a$  1,25 мкм (тонкое точение); 3 –  $R_a$  0,63 мкм (шлифование); 4 –  $R_a$  0,16 мкм (полирование)

Анализ полученных зависимостей показывает, что шероховатость покрытия зависит как от толщины покрытия, так и от исходной шероховатости  $R_a$  и может либо

уменьшаться (при  $Ra > 1,6$  мкм), либо увеличиваться (при  $Ra < 1,6$  мкм) с увеличением толщины покрытия.

Для определения зависимости шероховатости покрытий от технологических параметров процесса (тока дуги  $I$ , напряжения на подложке  $U_n$ , давления реакционного газа  $P$ ) были подготовлены образцы из стали 12X18H10T с различной исходной шероховатостью поверхности. Режимы осаждения покрытия изменялись в следующих пределах:  $I = 80-130$  А,  $U_n = 0-200$  В,  $P = (2-14) \times 10^{-2}$  Па.

Зависимость шероховатости покрытия от тока дуги и напряжения на подложке представлена на рис.5. Установлено, что с ростом потенциала на подложке шероховатость покрытия уменьшается, особенно при большей исходной шероховатости. Это связано с увеличением энергии ионов, прибывающих на подложку, что интенсифицирует процесс самораспыления поверхности. При этом наиболее активно распыляются вершины микронеровностей, являющиеся концентраторами напряженности электрического поля. В результате происходит сглаживание микрорельефа поверхности и общее снижение ее шероховатости.

Увеличение тока дуги способствует росту количества капель и макроблоков материала катода в плазменном потоке, а, следовательно, и в покрытии. Поскольку капли и макроблоки являются своеобразными затравками для роста пиков микронеровностей, то при увеличении тока дуги шероховатость покрытия должна увеличиваться, что подтверждается результатами эксперимента (рис.5, зависимости 3 и 4).

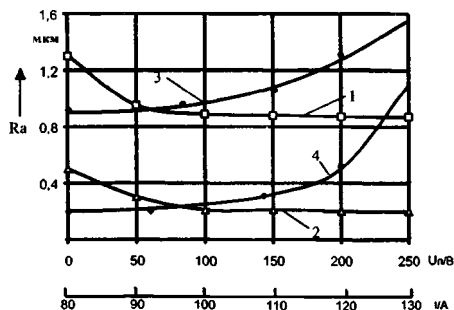


Рис. 5. Зависимость шероховатости ( $Ra$ ) образцов с покрытием  $TiN$  от напряжения на подложке  $U_n$  (1 и 2) и тока дуги  $I$  (3 и 4) при исходной шероховатости образцов: 1, 3 –  $Ra$  0,8 мкм; 2, 4 –  $Ra$  0,1 мкм

Для определения влияния на шероховатость покрытия капельной фазы и давления реакционного газа была разработана специальная методика. В одном цикле напыления в камеру устанавливалось по 4 образца таким образом, чтобы 2 образца находились при очистке и напылении под открытым потоком плазмы, а 2 образца находились

при очистке и напылении под экраном. Полученные зависимости представлены на рис. 6. Анализ результатов экспериментов показывает, что шероховатость образцов, находившихся под открытым потоком, с ростом давления уменьшается, что вызвано, очевидно, уменьшением количества капельной фазы в плазменном потоке. Шероховатость образцов, находившихся под экраном (капельная фаза отсутствует), от давления реакционного газа не зависит и определяется исходной шероховатостью поверхности подложки.

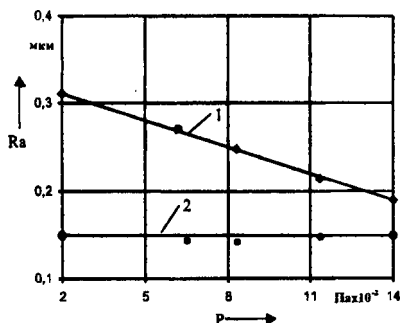


Рис. 6. Зависимость шероховатости ( $Ra$ ) образцов с покрытием  $TiN$  от давления  $P$  при расположении образцов: 1 – под открытым потоком плазмы; 2 – под экраном (исходная шероховатость  $Ra$  0,1 мкм)

Таким образом, основными факторами, определяющими шероховатость покрытия, являются: исходная шероховатость подложки, материал катода, режимы осаждения и толщина покрытия. Наибольшее влияние на шероховатость покрытия оказывают факторы, связанные с процессом испарения катода (ток дуги и давление реакционного газа) и практически не влияют факторы, связанные с процессом конденсации (напряжение на подложке). При устранении капельной фазы шероховатость покрытия определяется исходной шероховатостью подложки и практически не зависит от режимов осаждения покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Дубровская Г.Н., Кирилук Л.М. Газофазное осаждение покрытий из нитрида титана. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 96 с.
2. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. – М.: Машиностроение, 1976. – 368 с.
3. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н. Защитные вакуумные покрытия на стали. – М.: Машиностроение, 1971. – 280 с.
4. Костржицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.