

Белан Н.В., Иващенко С.С., Подгорный В.А.,
Таранов В.Е., Ткаченко В.А.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В настоящее время все более широко используются методы вакуумных ионно-плазменных технологий для получения износостойких, коррозионностойких, жаростойких, химическистойких и др. покрытий. При разработке технологий и оборудования необходимо прежде всего обеспечить условия выполнения технических требований по обработке заданных изделий /температурный режим, толщина, состав, качество покрытия и т.д./. Однако следует учитывать, что при условии выполнения технических требований, определяющим фактором эффективности применения установок является производительность технологического процесса, которую можно рассматривать как объем продукции, обработанной в единицу времени. При определении производительности необходимо учитывать все временные затраты, как собственно время нанесения покрытия, так и время ионной очистки, время загрузки, откачки, остывания, выгрузки и других подготовительных операций.

В итоге производительность любой технологической установки определяется физическим процессом генерации материала покрытия, конструктивными особенностями самой установки, особенностями обработки конкретного типа продукции и рациональной организации технологического процесса.

Эксплуатация технологической ионно-плазменной установки носит циклический характер, где основными этапами являются:

t_n - время нанесения покрытия заданной толщины Δ ;

t_u - время ионной подготовки поверхности ;

t_b - время вспомогательных операций / время загрузки, время откачки, время остывания, время выгрузки/.

n - количество циклов обработки за определенный промежуток времени

$$T = (t_n + t_u + t_b). \quad / 1 /$$

При применении установок с непрерывным циклом обработки вышеперечисленные операции могут производиться параллельно, однако существующий в настоящее время парк технологических установок такими возможностями не обладает.

Время, затрачиваемое на нанесение покрытия, определяется как

$$t_n = \frac{\Delta}{\Delta'} , \quad / 2 /$$

где Δ' - линейная скорость нанесения покрытия.

Время, затрачиваемое на ионную очистку, определяется необходимым для подготовки поверхности к нанесению покрытия количеством частиц требуемой энергии, провзаимодействовавших с ней

$$t_u = \frac{q_n}{j} , \quad / 3 /$$

где $q_n = e N i$ - количество электричества через единицу поверхности обработки;

j - плотность тока ионов.

Время вспомогательных операций состоит из времени загрузки, времени откачки вакуума, времени остывания, времени выгрузки. Для существующих установок, обладающих примерно одинаковыми габаритами и мощностью вакуумных систем, время вспомогательных операций на один цикл обработки можно считать одинаковым.

Учитывая вышеизложенное, время, затрачиваемое на обработку единицы поверхности, на которой располагаются изделия, можно записать как

$$\left(\frac{T}{F}\right) = \frac{n}{nF_0} \left(\frac{\Delta}{\Delta'} + \frac{q_n}{j} + t_b\right), \quad / 4 /$$

или

$$\left(\frac{T}{F}\right) = \frac{\Delta}{\Delta'F_0} + \frac{q_n}{jF_0} + \frac{t_b}{F_0}, \quad / 5 /$$

где F_0 - площадь одновременно обрабатываемой поверхности.

Линейную скорость нанесения покрытия можно определить как:

$$\Delta' = \frac{\Delta'_0}{F_0}. \quad / 6 /$$

Считая, что Δ'_0 - объем покрытия, осаденного на поверхности обработки, определяемый физикой процесса генерации плазмы материала покрытия. Для генераторов плазмы на основе катодных пятен

Δ'_0 имеет вид:

$$\Delta'_0 = \frac{k_1 \alpha J_a}{\rho}, \quad / 7 /$$

где k_1 - коэффициент использования материала катода;

α - коэффициент массовыделения;

J_a - ток дуги;

ρ - плотность материала покрытия.

Плотность ионного тока при чистке определяется как отношение суммарного тока J_i к площади обработки

$$j = \frac{k_2 J_i}{F_0}, \quad / 8 /$$

где k_2 - коэффициент, учитывающий потери тока при чистке.

Учитывая /5/, /6/, /7/, /8/, время обработки единицы поверхности составляет:

$$\left(\frac{T}{F}\right) = \frac{\Delta \rho}{K_1 \alpha J_a} + \frac{q_n}{K_2 J_i} + \frac{t_b}{F_0}, \quad /9/$$

а производительность, определяемая обрабатываемой поверхностью за единицу времени, равна

$$\left(\frac{F}{T}\right) = \frac{1}{\frac{\Delta \rho}{K_1 \alpha J_a} + \frac{q_n}{K_2 J_i} + \frac{t_b}{F_0}}. \quad /10/$$

Из /10/ следует, что производительность установки ионно-плазменного нанесения покрытий предопределена конкретным видом обрабатываемой продукции и физикой процесса генерации плазмы и зависит от конструктивных особенностей установки и организации технологического процесса. Результаты сравнения установок с различной поверхностью обработки при нанесении покрытий толщиной от 1 до 20 мкм представлены на рис. 1. Сравнение проведено при типичных для данного класса установок параметрах: $K_1 = 0,5$; $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ г/Кл; $K_2 = 0,5$; $q_n = 2,5$ Кл/см²; $J_a = 200$ А; $J_i = 5$ А; $t_b = 1$ час.

Из рис. 1 следует, что установка с развитой поверхностью обработки обладает значительно более высокой производительностью, особенно в области малых толщин покрытия. Это достижимо при неизменном объеме камеры вакуумной. Так, для "Булат-3Т" поверхность обработки составляет 0,03 м². При модернизации этой установки возможно развить поверхность обработки до 0,6 м² без изменения геометрии самой вакуумной камеры. В этом случае достигается увеличение производительности в 6,5 раза при нанесении

покрытия толщиной $\Delta = 1,0$ мкм в 3,8 раза для $\Delta = 5$ мкм; в 2,7 раза для $\Delta = 10$ мкм и в 2 раза для $\Delta = 20$ мкм.

Учитывая сменный характер работы на производстве, очевидно, что максимальная производительность будет достигаться при одноцикловой за смену работе установки. В этом случае из /9/ можно получить оптимальное значение поверхности обработки, которое имеет вид:

$$F_{o \text{ opt}} = \frac{T_{\text{см}} - t_{\text{в}}}{\frac{\Delta \rho}{K_1 \alpha J_{\text{д}}} + \frac{q_{\text{п}}}{K_2 J_{\text{и}}}} \quad / \text{II} /$$

При значении F_o меньше $F_{o \text{ opt}}$ производительность установки уменьшается ввиду дополнительных потерь времени, а при F_o больше $F_{o \text{ opt}}$ не обеспечивается полное выполнение цикла обработки за время одной смены.

Для $T_{\text{см}} = 8$ часов на рис. 2 представлена зависимость оптимальной поверхности обработки от тока дуги генераторов плазмы для различных значений толщины покрытия. Из этого рисунка следует, что оптимальная поверхность обработки существенно больше, чем у существующих установок.

Помимо увеличения производительности, установки с развитой поверхностью обработки позволяют существенно снизить температуру обработки, ввиду чего расширяется номенклатура обрабатываемых изделий.

Помимо увеличения производительности, установки с развитой поверхностью обработки позволяют довольно просто изменять в широких пределах плотность ионного тока на обрабатываемую поверхность, что в свою очередь позволяет значительно расширить температурный диапазон обработки, в том числе и в сторону существенного сниже-

ния температуры обработки. Расширение температурного диапазона обработки обеспечивает увеличение номенклатуры обрабатываемых изделий, позволяет проводить обработку мелкоразмерных изделий и изделий из материалов с низкой температурой фазовых превращений.

Одним из примеров, подтверждающих правильность приведенных выше рассуждений и перспективность разработок установок с увеличенной площадью обрабатываемой поверхности, являются разработанные в Харьковском авиационном институте установки на базе ускорителей с радиальными потоками плазмы.

