

В. М. Тонконогий, д-р техн. наук, Одесса, Украина,
Е. В. Хомутова, П. С. Носов, канд. техн. наук, Херсон, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССОВОГО БАЛАНСА ГАЗОВ-РЕАГЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Determination of mass balance gases of reagents in the causing ions-plasma coverage

На сегодняшний день, требования, предъявляемые в машиностроении к износостойкости режущего инструмента и повышению его скорости резания очень велики. Одним из путей повышения служебных характеристик используемых инструментов является нанесение на их рабочие поверхности износостойких покрытий со специальными свойствами. Одним из таких методов является метод конденсации в вакууме на поверхности изделия вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой - метод КИБ, разработанный в Украине [1, 2].

Однако этот метод имеет ряд недостатков, одним из которых - снижения качества поверхности изделия, как следствие неэффективного управления процессом нанесения ионно - плазменных покрытий, что может привести к неисправимому браку. Еще более усложняет проблему контроля качества нанесения покрытий – подача нескольких газов-реагентов в камеру без предварительного смешивания. В такой ситуации оператор вообще не сможет руководить процессом нанесения покрытий, при этом альтернативные способы управления данным процессом еще не разработаны [3].

Устранение указанных недостатков требует разработки принципиально новой модели подачи нескольких газов и как следствие автоматизированной системы управления балансом подачи газов-реагентов в вакуумную камеру без участия человеческого фактора.

Анализ существующих технологий нанесения покрытий и факторов, влияющих на их качество позволяет констатировать, что в ионно-плазменных технологиях имеется ряд существенных недостатков, возникающих при нанесении покрытий, а именно:

1) Отсутствие автоматизированных систем идентификации и контроля многофакторного процесса нанесения ионно-плазменных покрытий усложняет процесс его имитационного моделирования и как следствие приводит к запаздыванию принятия решений.

2) Отсутствие прогрессивных математических методов обработки параметров процесса нанесения ионно-плазменных покрытий приводит к неполному анализу данного процесса.

3) Отсутствие возможности управлять балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов-реагентов, значительно повышая тем самым мобильность применения ионно-плазменных технологий.

Данные недостатки представляют проблему, которая не позволяет результативно управлять процессом подачи в вакуумную камеру нескольких газов-реагентов при нанесении ионно-плазменных покрытий методом КИБ. Поэтому, разработка математической модели подачи нескольких газов для повышения качества нанесения ионно-плазменных покрытий является актуальной задачей.

Целью исследования является повышение эффективности ионно-плазменных технологий путем разработки и внедрения автоматизированной системы анализа и управления массовым балансом газов-реагентов в условиях подачи нескольких газов.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить классификацию методов нанесения износостойких покрытий с помощью технологии КИБ, изучить проблемы автоматизации процесса нанесения ионно-плазменных покрытий в данной технологии.

2. Выбрать и обосновать критерии оценивания параметров подачи газов в технологии КИБ, а также методы контроля качества режущего инструмента с покрытием в производстве и эксплуатации.

3. Разработать математическую модель процесса нанесения покрытий на основе описания массового баланса для подачи нескольких газов в вакуумную камеру;

4. Выполнить структурный синтез автоматизированной системы управления балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов-реагентов в технологии нанесения ионно-плазменных покрытий.

Согласно цели исследования построение динамической математической модели процесса нанесения покрытий на основе описания массового баланса для n_i в вакуумной камере в виде системы уравнений (1) [4]:

$$\begin{cases} \frac{dM_{(1)}}{d\tau} = m_{под(1)} + m_{нат(1)} - m_{отс(1)} - m_{xp(1)} \\ \frac{dM_{(2)}}{d\tau} = m_{под(2)} + m_{нат(2)} - m_{отс(2)} - m_{xp(2)} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{dM_{(n_i)}}{d\tau} = m_{под(n_i)} + m_{нат(n_i)} - m_{отс(n_i)} - m_{xp(n_i)} \end{cases}, \quad (1)$$

где:

$M_{газов(1),(2),...(n)}$ – масса n_i газов в вакуумной камере, кг; $m_{под(1),(2),...(n_i)}$ – приход газов за счет принудительной подачи его в камеру, кг/с; $m_{нат(1),(2),...(n_i)}$ – приход газов за счет натекания воздуха из атмосферы из-за не герметичности камеры, кг/с; $m_{отс(1),(2),...(n_i)}$ – расход газов за счет работы вакуумного насоса, кг/с; $m_{xp(1),(2),...(n_i)}$ – расход газов на

химические реакции в камере, кг/с.

На этапе нанесения покрытия объем вакуумной камеры и температура газа-реагента в ней постоянные, исходя из чего, опишем систему уравнений на основании закона Менделеева-Клапейрона (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{(1)} = \frac{\mu_{(1)} V_k}{RT_k} \\ M_{(2)} = \frac{\mu_{(2)} V_k}{RT_k} \\ \dots \\ M_{(n_i)} = \frac{\mu_{(n_i)} V_k}{RT_k} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где: $\mu_{\text{газов (1)(2)...(n_i)}}$ – молекулярный вес газов поступающих в камеру; V_k – объем вакуумной камеры, м³; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,314$ Дж·г-моль/К), м³; T_k – температура газовой смеси в вакуумной камере, К; $P_{\text{газов (1)(2)...(n_i)}}$ – парциальное давление газов Па.

В дифференциальной форме система уравнений примет вид (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM_{(1)}}{d\tau} = \frac{\mu_{(1)} V_k}{RT_k} \cdot \frac{dP_{(1)}}{d\tau} \\ \frac{dM_{(2)}}{d\tau} = \frac{\mu_{(2)} V_k}{RT_k} \cdot \frac{dP_{(2)}}{d\tau} \\ \dots \\ \frac{dM_{(n_i)}}{d\tau} = \frac{\mu_{(n_i)} V_k}{RT_k} \cdot \frac{dP_{(n_i)}}{d\tau} \end{array} \right. , \quad (3)$$

Решение данной системы уравнений позволит получить систему дифференциальных уравнений динамики изменения давления газов в вакуумной камере в процессе нанесения покрытия, а дальнейшее преобразование данной системы уравнений по Лапласу позволят выполнить структурный синтез автоматизированной системы управления балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов - реагентов в технологии нанесения ионно-плазменных покрытий.

Дифференциальное уравнение динамики изменения объемов для двух газов азота и углерода поступающих в вакуумную камеру в процессе нанесения покрытия в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\mu_{C_2} V_k}{RT_k} \cdot \frac{dV_{(C_2)}(\tau)}{d\tau} = - \frac{\mu_{C_2} V_k}{RT_k} P_{(C_2)}(\tau) + \\ + m_{\text{нод}(C_2)}(\tau) - \frac{\mu_{C_2}}{\mu_{\text{матер}}} m_{\text{матер}}(\tau) + \frac{\mu_{C_2} H}{RT_k} \\ \frac{\mu_{N_2} V_k}{RT_k} \cdot \frac{dV_{(N_2)}(\tau)}{d\tau} = - \frac{\mu_{N_2} V_k}{RT_k} P_{(N_2)}(\tau) + \\ + m_{\text{нод}(N_2)}(\tau) - \frac{\mu_{N_2}}{\mu_{\text{матер}}} m_{\text{матер}}(\tau) + \frac{\mu_{N_2} H}{RT_k} \end{array} \right. \quad (4)$$

В статическом режиме $V_{N_2} = V_{N_2,0}$, $V_{C_2} = V_{C_2,0}$.

При подачи в вакуумную камеру N_2 , необходимые для построения массовой коэффициенты в будут равны:

$$a_{1N_2} = \frac{\mu_{N_2} V_k}{RT_k} ; \quad (5)$$

$$a_{2N_2} = \frac{\mu_{N_2} V_k}{RT_k} \quad (6)$$

$$a_{3N_2} = \frac{0,5 \mu_{N_2}}{\mu_{Ti}} ; \quad (7)$$

$$a_{4N_2} = 0,79 \frac{28 \cdot 26,66 \cdot 10^{-6}}{8,314 \cdot 300} = 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ г/с} \quad (8)$$

При подачи в вакуумную камеру C_2 , необходимые для построения массовой модели коэффициенты будут равны:

$$a_{1C_2} = \frac{\mu_{C_2} V_k}{RT_k} ; \quad (9)$$

$$a_2 C_1 = \frac{\mu_{C_1} V_H}{RT_K}; \quad (10)$$

$$a_3 C_2 = \frac{0,37 \mu_{C_2}}{\mu_{Ti}} \quad (11)$$

$$a_4 C_1 = 0,195 \cdot 10^{-6} \text{ г/с} \quad (12)$$

Переходная функция зависимости выходного параметра V от управления $m_{\text{под}C_2}$ и возмущения m_{Ti} будет иметь вид:

$$\begin{cases} a_{1(C_2)} \frac{dP_{(C_2)}(\tau)}{d\tau} = -a_{2(C_2)} P_{(C_2)}(\tau) + m_{\text{под}C_2}(\tau) - a_{3(C_2)} m_{\text{мазмер}}(\tau) + a_{4(C_2)} \\ a_{1(N_2)} \frac{dP_{(N_2)}(\tau)}{d\tau} = -a_{2(N_2)} P_{(N_2)}(\tau) + m_{\text{под}N_2}(\tau) - a_{3(N_2)} m_{\text{мазмер}}(\tau) + a_{4(N_2)} \end{cases} \quad (13)$$

Полагая в $m_{\text{под}C_1}(\tau) = \text{const}$, $m_{\text{под}N_1}(\tau) = \text{const}$ и $m_{Ti}(\tau) = \text{const}$, а также:

$$A_{N_2} = \frac{a_{2N_2}}{a_{1N_2}}; \quad B_{N_2} = \frac{m_{\text{под}N_2} - a_{3N_2} m_{Ti} + a_{4N_2}}{a_{1N_2}}, \quad (14)$$

$$A_{C_1} = \frac{a_{2C_1}}{a_{1C_1}}; \quad B_{C_1} = \frac{m_{\text{под}C_1} - a_{3C_1} m_{Ti} + a_{4C_1}}{a_{1C_1}} \quad (15)$$

преобразуем систему линейных дифференциальных уравнений (13) к виду:

$$\begin{cases} \frac{dV_{(C_2)}(\tau)}{d\tau} + A_1 V_{(C_2)}(\tau) - B_1 = 0 \\ \frac{dV_{(N_2)}(\tau)}{d\tau} + A_2 V_{(N_2)}(\tau) - B_2 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$V_{N_2}(0) = V_{N_2,0};$$

$$V_{C_1}(0) = V_{C_1,0}$$

Уравнение (16) имеет следующее решение [5]:

$$\begin{cases} V_{(C_2)} = \left(V_{(C_2),0} - \frac{B_1(C_2)}{A_1(C_2)} \right) e^{-At} + \frac{B_1(C_2)}{A_1(C_2)} \\ V_{(N_2)} = \left(V_{(N_2),0} - \frac{B_1(N_2)}{A_1(N_2)} \right) e^{-At} + \frac{B_1(N_2)}{A_1(N_2)} \end{cases} \quad (17)$$

Программным решением для этой стадии процесса является постоянное значение объемов поступающих в вакуумную камеру газов $V_{(C_1)} = V_{(C_1),0}$, $V_{(N_2)} = V_{(N_2),0}$, а программным управлением некоторое значение $m_{\text{под}N_2(\text{пр})}$, $m_{\text{под}C_2(\text{пр})}$, обеспечивающее заданное значение давления в статическом режиме.

Перейдем к отклонениям:

$$y_{C_2} = V_{C_2} - V_{(C_2),0}; \quad (18)$$

$$V_{C_2} = m_{\text{под}C_2} - m_{\text{под}C_2(\text{пр})}; \quad (19)$$

$$y_{N_2} = V_{N_2} - V_{(N_2),0}; \quad (20)$$

$$v_2 = m_{\text{под}N_2} - m_{\text{под}N_2(\text{пр})} \quad (21)$$

В статическом режиме выполняется соотношение:

$$\begin{cases} 0 = -a_{2(C_1)} V_{(C_1)}(\tau) + m_{\text{под}C_1}(\tau) + a_{4(C_1)} \\ 0 = -a_{2(N_2)} V_{(N_2)}(\tau) + m_{\text{под}N_2}(\tau) + a_{4(N_2)} \end{cases} \quad (22)$$

Преобразуя данное выражение, получим (23):

$$\begin{cases} a_{1(C_2)} \frac{d^2 y_{(C_2)}}{dt} = -a_{2(C_2)} y_{(C_2)} - a_{2(C_2)} P_{(C_2)} \rho + \\ + v_{(C_2)} + m_{\text{под}C_2}(\text{пр}) - a_{3(C_2)} m_{Ti}(\tau) + a_{4(C_2)} \\ a_{1(N_2)} \frac{d^2 y_{(N_2)}}{dt} = -a_{2(N_2)} y_{(N_2)} - a_{2(N_2)} P_{(N_2)} \rho + \\ + v_{(N_2)} + m_{\text{под}N_2}(\text{пр}) - a_{3(N_2)} m_{Ti}(\tau) + a_{4(N_2)} \end{cases} \quad (23)$$

Уравнение в отклонениях принимает вид:

$$\begin{cases} a_{1C_2} \frac{d^2 y(C_2)}{d\tau^2} = -a_{2C_2} y(C_2) + v(C_2) - a_{3C_2} m_{Ti}(\tau) \\ a_{1N_2} \frac{d^2 y(N_2)}{d\tau^2} = -a_{2N_2} y(N_2) + v(N_2) - a_{3N_2} m_{Ti}(\tau) \end{cases} \quad (24)$$

Построим переходную функцию зависимости выходных параметров V_{C_2} и V_{N_2} от управления $m_{подN_2}$ и $m_{подC_2}$ и возмущения m_{Ti} . После преобразования по Лапласу [5] уравнение (24) приобретает вид:

$$\begin{cases} Y(s)_{C_2} = U(s)_{C_2} \frac{1}{(a_{1C_2}s + a_{2C_2})} - \frac{a_{3C_2}}{(a_{1C_2}s + a_{2C_2})} \\ Y(s)_{N_2} = U(s)_{N_2} \frac{1}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})} - \frac{a_{3N_2}}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})} \end{cases} \quad (25)$$

В итоге передаточная функция по управлению для двух газов будет иметь вид:

$$\frac{Y(s)_{N_2}}{U(s)_{N_2}} = \frac{1}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})}; \quad (26)$$

$$\frac{Y(s)_{C_2}}{U(s)_{C_2}} = \frac{1}{(a_{1C_2}s + a_{2C_2})}, \quad (27)$$

а по возмущению – вид для двух газов:

$$\frac{Y(s)_{C_2}}{Q(s)_{C_2}} = \frac{a_{3C_2}}{(a_{1C_2}s + a_{2C_2})}; \quad (28)$$

$$\frac{Y(s)_{N_2}}{Q(s)_{N_2}} = \frac{a_{3N_2}}{(a_{1N_2}s + a_{2N_2})}. \quad (29)$$

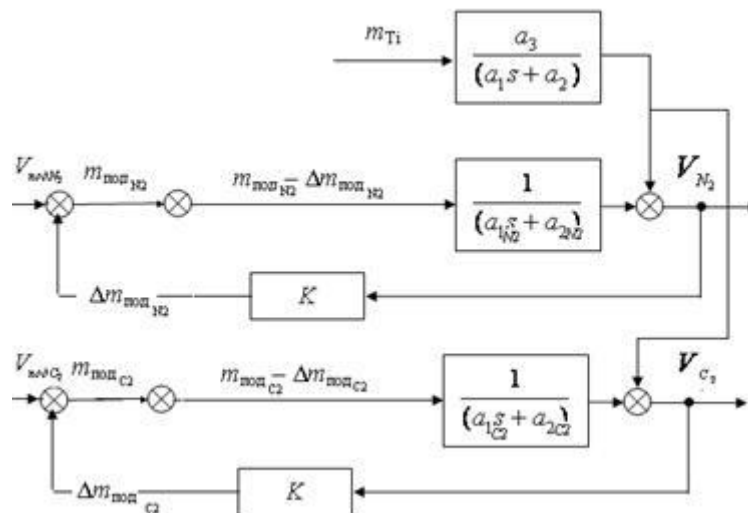


Рис. 1 – Структурная схема управления процессом напуска газов - реагентов в вакуумную камеру

В результате проведенной работы было выполнено:

1. Выбраны и обоснованы критерии оценивания параметров подачи газов - реагентов в технологии КИБ;
2. На примере подачи в вакуумную камеру двух газов - реагентов предложена математическая модель процесса нанесения покрытий на основе описания массового баланса для подачи нескольких газов в вакуумную камеру;
3. Выполнен структурный синтез автоматизированной системы управления балансом подаваемых в вакуумную камеру нескольких газов – реагентов в технологии нанесения ионно-плазменных покрытий.

Целью дальнейшей работы является разработка схемы управления одновременной подачей двух и более газов при нанесении композиционных ионно-плазменных покрытий на режущий инструмент, аппаратное обеспечение такого управления, а также практическая реализация и внедрение предложенных решений.

Список литературы: 1. *Верещака А.С., Третьяков И.П.* Режущий инструмент с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 191 с. 2. *Аникеев А.И., Аникин В.Н., Торпоченов В.С.* Пути повышения работоспособности режущего инструмента за счет нанесения износостойких покрытий // Современный твердосплавный инструмент и рациональное его использование. – Л.: ЛДНТП, 1980. – С. 40 – 44. 3. *Тонконогий В.М.* Управление подачей газа-реагента при нанесении ионно-плазменных покрытий с прогнозированием негерметичности вакуумных установок // Холодильная техника и технология. – 2004. – № 3(89). – С. 70 – 73. 4. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995. – Т. 1, 2. 5. *Диткин В.А., Прудников А.П.* Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 467 с.