

УДК 621.952



**К.В. Хомутова,**

викладач,  
Херсонський  
політехнічний  
коледж  
Одеського  
національного  
політехнічного  
університету  
homutova84@yandex.ru

## СИТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НАНЕСЕННЯ ІОНО – ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

*К.В. Хомутова Системний підхід до процесу керування процесом нанесення іоно – плазмових покриттів.* Підвищення стійкості ріжучих інструментів є однією з нагальних проблем сучасної металообробки. У зв'язку з цим широкого застосування набули інструменти з покриттями, оскільки завдяки надтонкій плівці (товщина сягає декількох мікрометрів), не змінюючи об'ємних характеристик інструментального матеріалу в цілому, можна досягти підвищення стійкості інструмента у декілька разів.

*K.V. Khomutova Approach of the systems is to the process of process control of causing of iono – plasma coverages.* An increase of firmness of cuttings instruments is one of urgent problems of modern metal-workingness. In this connection wide application was purchased by instruments with coverages, as due to nadtonkiy tape (a thickness arrives at a few micrometres), not changing by volume descriptions of instrumental material on the whole, it is possible to attain the increase of firmness of instrument in once or twice.

**Вступ.** Повышение стойкости режущих инструментов является одной из важнейших проблем современной металлообработки.

В связи с этим широкое применение приобрели инструменты с покрытиями, поскольку благодаря сверхтонкой пленке (толщина достигает нескольких микрометров), не изменяя объемных характеристик инструментального материала в целом, можно достичь повышения стойкости инструмента в несколько раз.

Однако далеко не всегда удается получить позитивный результат от применения покрытий.

Это связано с тем, что, несмотря на широкое применение, механизм действия пленочного покрытия не до конца раскрыт, и, следовательно, пути его совершенствования и условия эффективного использования иногда определены неверно.

Наиболее перспективным методом решения данной задачи является разработка и внедрение автоматизированных систем управления (АСК) процессом нанесения разнообразных покрытий на режущий инструмент.

Следует отметить, что задача АСК процессом нанесения на рабочие поверхности инструмента ионо - плазменных покрытиях нуждается в автоматизированных системах поддержки принятия решений.

В наше время решение данной задачи основано на использовании метода конденсации в вакууме на поверхности изделия базового вещества, состоящего из плазменной фазы с ионной бомбардировкой (метод КИБ) [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.

**Матеріал і результати дослідження.** 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]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM_{(1)}}{d\tau} = m_{\text{под}(1)} + m_{\text{нат}(1)} - m_{\text{отс}(1)} - m_{\text{рх}(1)} \\ \frac{dM_{(2)}}{d\tau} = m_{\text{под}(2)} + m_{\text{нат}(2)} - m_{\text{отс}(2)} - m_{\text{рх}(2)} \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dM_{(n_i)}}{d\tau} = m_{\text{под}(n_i)} + m_{\text{нат}(n_i)} - m_{\text{отс}(n_i)} - m_{\text{рх}(n_i)} \end{array} \right. , \quad (1)$$

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

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

где:  $\mu_{\text{газов}(1),(2),\dots,(n_i)}$  – молекулярный вес газов поступающих в камеру;  
 $V_k$  – объем вакуумной камеры, м<sup>3</sup>;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,314$  Дж·г-моль/К), м<sup>3</sup>;  
 $T_k$  – температура газовой смеси в вакуумной камере, К;  
 $P_{\text{газов}(1),(2),\dots,(n_i)}$  – парциальное давление газов Па.

В дифференциальной форме система уравнений примет вид (3):

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$a_{2C_2} = \frac{\mu_{C_2} V_H}{RT_k} ; \quad (10)$$

$$a_{3C_2} = \frac{0,37\mu_{C_2}}{\mu_{Ti}} \quad (11)$$

$$a_{4C_2} = 0,195 \cdot 10^{-6} \text{ г/с} \quad (12)$$

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

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

Полагая в  $m_{\text{под}C_2}(\tau) = \text{const}$ ,  $m_{\text{под}N_2}(\tau) = \text{const}$  и  $m_{Ti}(\tau) = \text{const}$ , а также:

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

$$A_{C_2} = \frac{a_{2C_2}}{a_{1C_2}}; \quad B_{C_2} = \frac{m_{\text{под}C_2} - a_{3C_2} m_{Ti} + a_{4C_2}}{a_{1C_2}} \quad (15)$$

преобразуем систему линейных дифференциальных уравнений (13) к виду:

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

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

$$V_{C_2}(0) = V_{C_2,0}$$

Уравнение (16) имеет следующее решение [5]:

$$\begin{cases} V_{(C_2)} = \left( V_{(C_2)0} - \frac{B_{(C_2)}}{A_{(C_2)}} \right) e^{-A\tau} + \frac{B_{(C_2)}}{A_{(C_2)}} \\ V_{(N_2)} = \left( V_{(N_2)0} - \frac{B_{(N_2)}}{A_{(N_2)}} \right) e^{-A\tau} + \frac{B_{(N_2)}}{A_{(N_2)}} \end{cases} \quad (17)$$

Программним рішенням для цієї стадії процесу являється постійне значення об'ємів поступаючих в вакуумну камеру газів  $V_{(C_2)} = V_{(C_2),0}$ ,  $V_{(N_2)} = V_{(N_2),0}$ , а программним управлінням некоторое значення  $m_{\text{под}N_2(\text{пр})}$ ,  $m_{\text{под}C_2(\text{пр})}$ , забезпечующее заданное значення тиску в статическом режимі.

Построим переходную функцию зависимости выходных параметров  $V_{C_2}$  и  $V_{N_2}$  от управления  $m_{\text{под}N_2}$  и  $m_{\text{под}C_2}$  и возмущения  $m_{T_1}$ .

После преобразования по Лапласу [5] уравнение (24) приобретает вид:

$$\begin{cases} Y(S)_{(c_2)} = U(S)_{(c_2)} \left( \frac{1}{(a_{1(c_2)}s + a_{2(c_2)})} \right) - Q(S)_{(c_2)} \left( \frac{a_{3(c_2)}}{(a_{1(c_2)}s + a_{2(c_2)})} \right) \\ Y(S)_{(n_2)} = U(S)_{(n_2)} \left( \frac{1}{(a_{1(n_2)}s + a_{2(n_2)})} \right) - Q(S)_{(n_2)} \left( \frac{a_{3(n_2)}}{(a_{1(n_2)}s + a_{2(n_2)})} \right) \end{cases} \quad (25)$$

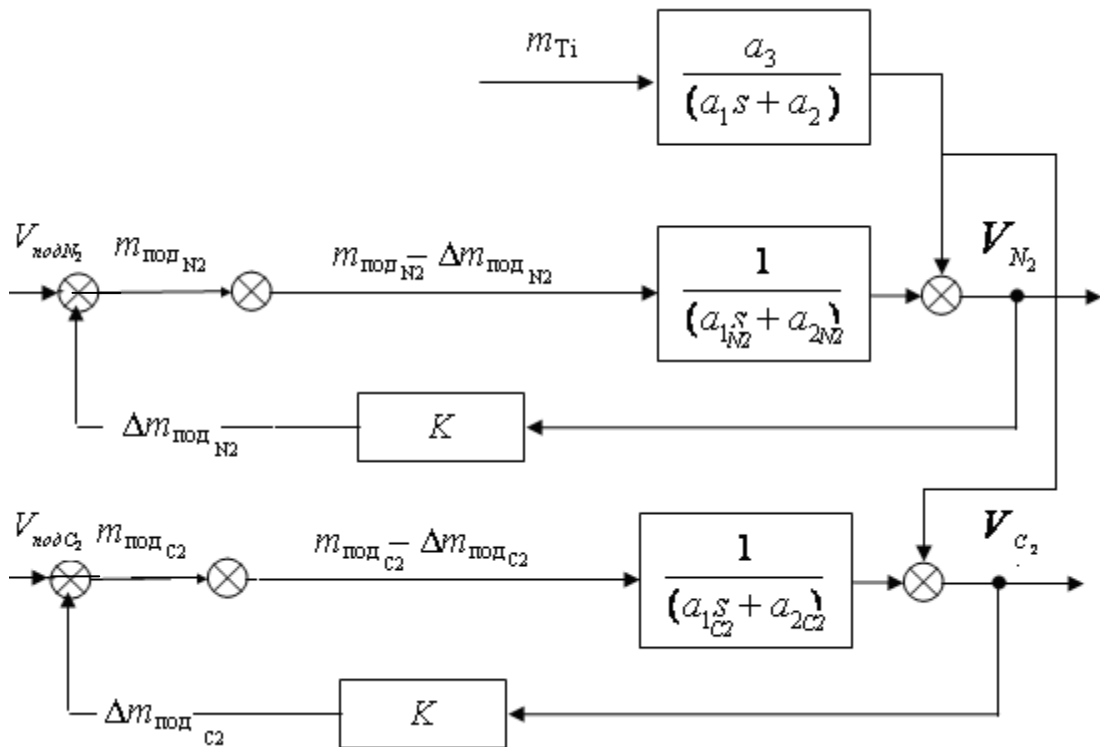


Рис.1. Структурная схема управления процессом напуска газов - реагентов в вакуумную камеру

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:

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

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

**Висновки.** 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.

## Література

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущий инструмент с износостойкими покрытиями. [Текст] – М.: Машиностроение, 1986. – 191 с.
2. Аникеев А.И., Аникин В.Н., Торопченков В.С. Пути повышения работоспособности режущего инструмента за счет нанесения износостойких покрытий / Современный твердосплавный инструмент и рациональное его использование. [Текст] – 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. [Текст] – 2004. – № 3(89). – С. 70 –73
4. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. [Текст] – М.: Химия, 1995. – Т. 1, 2.
5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. [Текст] – М.: Высшая школа, 1965. – 467 с.