

К. В. Дядюн

## СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ МАСОВОГО БАЛАНСУ ГАЗІВ-РЕАГЕНТІВ В ПРОЦЕСІ УТВОРЕННЯ ІОНО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

**Анотація.** Забезпечуючи збільшення працездатності металорізального інструменту, можна значно підвищити продуктивність механізованої праці, тим самим знизити витрати на закупівлю нового інструменту і заощадити на інші супровідні технологічні складові. У процесі експлуатації різального інструменту основне навантаження передається на його робочу частину, це, як правило, призводить до часткового зносу або повного руйнування площин і різальних крайок. Існує низка технологій обробки робочих поверхонь, яка надає їм додаткового зміцнення, найбільш результативним з яких є спосіб нанесення на поверхню різального інструменту спеціальних покриттів. З урахуванням специфіки протікання процесів формування покриттів їх можна розділити на три основні групи [1]. До першої групи належать методи, при яких формування покриттів здійснюється переважно за рахунок дифузійних реакцій між насичуючими елементами і структурами інструментального матеріалу. До другої групи належать методи формування покриттів з комплексного механізму. До третьої групи можна віднести методи формування покриттів за рахунок хімічних і плазмохімічних реакцій потоку частинок одночасно в обсягах простору, що безпосередньо прилягає до насичуючих поверхонь інструментальної основи. Однією з таких технологій є метод КІБ (конденсація й іонне бомбардування), що належить до методів фізичного осадження покриттів. Найбільш характерною особливістю покриттів, одержуваних цим методом, є відсутність перехідної зони між покриттям і інструментальним матеріалом. Це дає можливість отримувати комплекс властивостей на робочих поверхнях інструменту, не погіршуючи його вихідних властивостей. Статтю присвячено питанням підвищення ефективності іонно-плазмових технологій шляхом розроблення і впровадження автоматизованої системи аналізу й управління масовим балансом газів-реагентів в умовах подачі кількох газів. Отже, вдосконалення технології нанесення покриттів на робочі поверхні різального інструмента, а саме — ефективне управління процесом нанесення іонно-плазмових покриттів з впровадженням автоматизованої системи аналізу й управління масовим балансом газів-реагентів в умовах подачі кількох газів, є актуальним завданням.

**Ключові слова:** зносостійкість різального інструменту, бомбардування іонами, технологія іонної плазми, критерії оцінки подачі реагентів у вакуумну камеру.

**Постановка проблеми.** В умовах сьогодення вимоги, які пред'являються в машинобудуванні до зносостійкості різального інструменту і підвищення його швидкості різання, дуже високі. Одним з найбільш значущих показників

використання різального інструменту є його здатність зберігати свої функціональні параметри протягом тривалого часу. Забезпечуючи збільшення працездатності інструменту, можна значно підвищити продуктивність праці, тим самим знизити витрати на закупівлю нового інструменту і заощадити на інші супровідні технологічні

© Дядюн К. В.

складові. У процесі експлуатації різального інструменту основне навантаження передається на його робочу частину, а це, як правило, призводить до часткового зносу або повного руйнування площин і різальних крайок.

**Аналіз останніх досліджень.** Існує низка технологій обробки робочих поверхонь, яка надає їм додаткового зміцнення, найбільш результативним з яких є спосіб нанесення на поверхню різального інструменту спеціальних покриттів [1; 2]. Підвищення працездатності різального інструменту можна забезпечити завдяки поліпшенню властивостей поверхневого шару інструментального матеріалу, при якому робоча поверхня інструменту найбільш ефективно пручається характерним видам зносу. Такий матеріал повинен мати значний запас міцності при вигині, стисканні і витримувати ударні навантаження. Одним із способів підвищення службових характеристик металорізальних інструментів є нанесення на їх робочі поверхні зносостійких покриттів зі спеціальними властивостями. До таких методів можна віднести метод конденсації у вакуумі на поверхні виробу речовини з плазмової фази іонним бомбардуванням — метод КІБ, розроблений в Україні [3–7].

Однак цей метод має низку недоліків, один з яких — зниження якості поверхні покриття як наслідок неефективного управління процесом нанесення іонно-плазмових покриттів, що може призвести до невиправного браку [8–11]. Ще більше ускладнює проблему контролю якості нанесення покриттів при подачі у вакуумну камеру декількох газів-реагентів без попереднього змішування. У такій ситуації оператор взагалі не зможе керувати процесом нанесення покриттів, при цьому альтернативні способи управління цим процесом ще не розроблені [12].

Усунення зазначених недоліків вимагає розроблення принципово нової моделі подачі кількох газів і, як наслідок, автоматизованої системи управління балансом подачі газів-реагентів у вакуумну камеру без участі людського фактора [13].

**Мета статті.** Аналіз наявних технологій нанесення покриттів і факторів, що впливають на їх якість, дає змогу констатувати, що в іонно-плазмових технологіях є низка істотних недоліків, які виникають при нанесенні покриттів, а саме:

1) відсутність автоматизованих систем ідентифікації і контролю багатофакторного процесу нанесення іонно-плазмових покриттів ускладнює процес його імітаційного моделювання і, як наслідок, призводить до запізнення прийняття рішень;

2) відсутність прогресивних математичних методів обробки параметрів процесу нанесення іонно-плазмових покриттів призводить до неповного аналізу цього процесу;

3) відсутність можливості управляти балансом декількох газів-реагентів, що подаються у вакуумну камеру, значно підвищуючи тим самим мобільність застосування іонно-плазмових технологій.

Ці недоліки представляють проблему, яка не дає змоги керувати процесом подачі у вакуумну камеру декількох газів-реагентів при нанесенні іонно-плазмових покриттів методом КІБ. Тому розроблення математичної моделі подачі кількох газів для підвищення якості нанесення іонно-плазмових покриттів є актуальним завданням.

Метою дослідження є підвищення ефективності іонно-плазмових технологій шляхом розроблення і впровадження автоматизованої системи аналізу й управління масовим балансом газів-реагентів в умовах подання декількох газів.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання [8; 9]:

1. Виконати класифікацію методів нанесення зносостійких покриттів за допомогою технології КІБ, вивчити проблеми автоматизації процесу нанесення іонно-плазмових покриттів у цій технології [10].

2. Вибрати й обґрунтувати критерії оцінювання параметрів подачі газів у технології КІБ, а також методи контролю якості різального інструменту з покриттям у виробництві й експлуатації.

3. Розробити математичну модель процесу нанесення покриттів на основі опису масового балансу для подачі кількох газів у вакуумну камеру.

4. Виконати структурний синтез автоматизованої системи управління балансом декількох газів-реагентів, які подаються у вакуумну камеру при нанесенні іонно-плазмових покриттів.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до мети дослідження будемо динамічну математичну модель процесу нанесення покриттів на основі опису масового балансу для  $n_i$  у вакуумній камері у вигляді системи рівнянь (1):

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

де:

$M_{\text{газів}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — маса  $n_i$  газів у вакуумній камері, кг;

$m_{\text{под}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — подача газів за рахунок примусової подачі його в камеру, кг/с;

$m_{\text{нат}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — прихід газів за рахунок натікання повітря з атмосфери через відсутність щільності вакуумної камери, кг/с;

$m_{\text{отс}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — витрата газів за рахунок роботи вакуумного насоса, кг/с;

$m_{\text{рх}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — витрата газів на хімічні реакції в камері, кг/с.

На етапі нанесення покриття обсяг вакуумної камери і температура газу-реагенту в ній постійні, з огляду на це опишемо систему рівнянь на підставі закону Менделєєва — Клапейрона (2):

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

де:

$\mu_{\text{газів}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — молекулярна вага газів, які надходять до камери;

$V_k$  — об'єм вакуумної камери, м<sup>3</sup>;

$R$  — універсальна газова постійна ( $R = 8,314$  Дж·г·моль/К), м<sup>3</sup>;

$T_k$  — температура газової суміші у вакуумній камері, К;

$P_{\text{газів}(1), (2), \dots, (n_i)}$  — парціальний тиск газів, Па.

У диференціальній формі система рівнянь набуде вигляду (3):

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

Рішення цієї системи рівнянь дасть змогу отримати систему диференціальних рівнянь динаміки зміни тиску газів у вакуумній камері в процесі нанесення покриття, а подальше перетворення цієї системи рівнянь за Лапласом дасть змогу виконати структурний синтез автоматизованої системи

управління балансом декількох газів-реактивів, що подаються у вакуумну камеру, в технології нанесення іоноплазмових покриттів.

Диференціальне рівняння динаміки зміни обсягів для двох газів азоту і вуглецю, що надходять у вакуумну камеру в процесі нанесення покриття, у вигляді:

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

У статичному режимі:  $V_{N_2} = V_{N_2,0}, V_{C_2} = V_{C_2,0}$ .

При подачі у вакуумну камеру  $N_2$  необхідні для побудови масової коефіцієнти дорівнюватимуть:

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

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

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

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

При подачі у вакуумну камеру  $C_2$  необхідні для побудови масової моделі коефіцієнти дорівнюватимуть:

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

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

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

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

Перехідна функція залежності вихідного параметра  $V$  від управління  $m_{\text{под} C_2}$  і обурення  $m_{Ti}$  матиме вигляд:

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

Припустимо, що в  $m_{\text{под}C_2}(\tau) = \text{const}$ ,  $m_{\text{под}N_2}(\tau) = \text{const}$  і  $m_{Ti}(\tau) = \text{const}$ , а також:

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

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

Перетворимо систему лінійних диференціальних рівнянь (13) до виду:

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

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

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

Рівняння (16) має такий розв'язок [14]:

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

Програмним рішенням для цієї стадії процесу є постійне значення обсягів надходження у вакуумну камеру газів  $V_{(C_2)} = V_{(C_2),0}$ ,  $V_{(N_2)} = V_{(N_2),0}$ , а програмним управлінням — деяке значення  $m_{\text{под}N_2}$  (пр),  $m_{\text{под}C_2}$  (пр), що забезпечує задане значення тиску в статичному режимі.

Перейдімо до відхилень:

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

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

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

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

У статичному режимі виконується співвідношення:

$$\begin{cases} 0 = -a_{2(C_2)} V_{(C_2)}(\tau) + m_{\text{под}(C_2)}(\tau) + a_{4(C_2)} \\ 0 = -a_{2(N_2)} V_{(N_2)}(\tau) + m_{\text{под}(N_2)}(\tau) + a_{4(N_2)} \end{cases} \quad (22)$$

Виконавши перетворення формул (18), (19), (20) і (21) в (22), отримуємо:

$$\begin{cases} a_{1(N_2)} \frac{dP_{(N_2)}(\tau)}{d\tau} = -a_{2(N_2)} y_{(N_2)} - a_{2(N_2)} y_{(N_2)}(\tau) + V_{(N_2)} - m_{\text{под}(N_2)}(\tau) + m_{\text{под}(N_2),0} + a_{4(N_2)} \\ a_{1(C_2)} \frac{dP_{(C_2)}(\tau)}{d\tau} = -a_{2(C_2)} y_{(C_2)} - a_{2(C_2)} y_{(C_2)}(\tau) + V_{(C_2)} - m_{\text{под}(C_2)}(\tau) + m_{\text{под}(C_2),0} + a_{4(C_2)} \end{cases} \quad (23)$$

Рівняння у відхиленнях буде мати такий вигляд:

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

Побудуємо перехідну функцію залежності вихідних параметрів  $V_{C_2}$  і  $V_{N_2}$  від управління  $m_{\text{под}N_2}$  і  $m_{\text{под}C_2}$  і обурення  $m_{Ti}$ . Після перетворення за Лапласом [5] рівняння (24) набуває вигляду:

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

У результаті передавальна функція з управління для двох газів матиме вигляд:

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

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

а по обуренню — вигляд для двох газів:

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

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

Структурна схема управління процесом напуску газів-реагентів у вакуумну камеру (рис. 1):

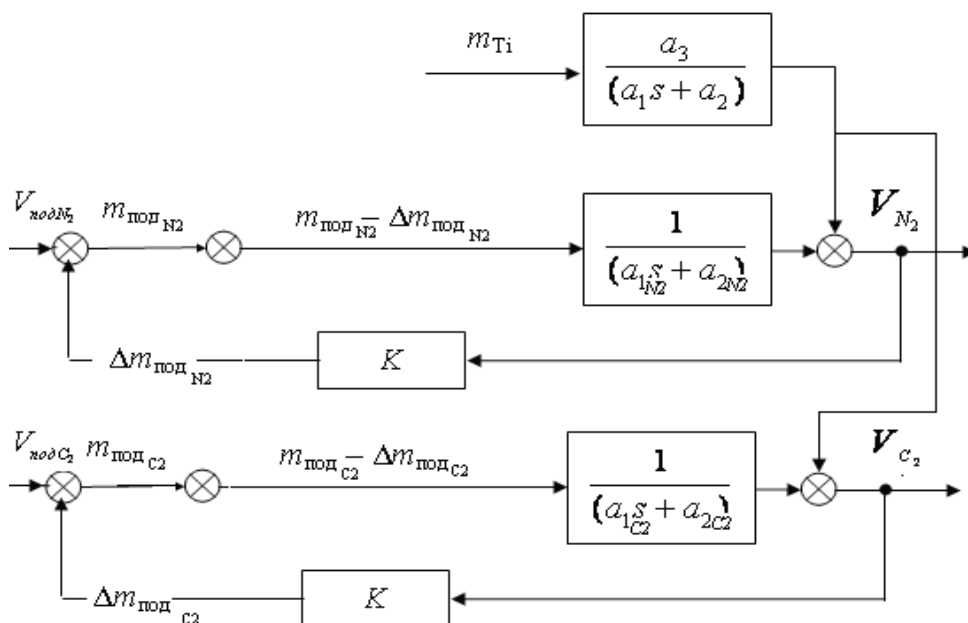


Рис. 1. Структурна схема управління процесом напуску газів-реагентів у вакуумну камеру

Безпосередній вплив на структуру і фізичні властивості покриттів, отриманих іонно-плазмовим осадженням, надають такі основні параметри: струм дуги, тиск реакційного газу в робочій камері, температура підкладки.

Маловивченим є вплив програмних параметрів нанесення багатоелементних іонно-плазмових покриттів на їх якість, а саме — можливості управляти балансом декількох газів-реагентів, які подаються у вакуумну камеру, значно підвищуючи тим самим мобільність застосування іонно-плазмових технологій. Представлена в статті структурна схема управління процесом напуску газів-реагентів у вакуумну камеру (рис. 1) описує перехідну функцію залежності вихідних параметрів  $V_{C_2}$  і  $V_{N_2}$  від управління  $m_{\text{подачі}N_2}$  і  $m_{\text{подачі}C_2}$  і обурення  $m_{T_i}$ .

Спільність досліджуваного методу контролю надходження реагуючих газів у процесі осадження іонно-плазмових покриттів є його основною перевагою.

**Висновки.** У результаті роботи представлена математична модель процесу нанесення покриття, заснована на описі балансу маси для подачі кількох газів у вакуумну камеру на прикладі подачі двох газів у вакуумну камеру — реагентів. Для цього були відібрані й обґрунтовані критерії оцінки параметрів подачі газів-реагентів за технологією CIB, а також структурний синтез автоматизованої системи контролю балансу для декількох газів-реагентів, що подаються у вакуумну камеру технологічним осадженням іонів, — плазмові покриття.

Метою подальших досліджень є розроблення імітаційної моделі для управління одночасною подачею двох або більше газів при нанесенні композитних іонно-плазмових покриттів на різальний інструмент, обладнання для такого контролю, а також практична реалізація та реалізація запропонованого рішення.

#### Список використаних джерел

1. Верещака А. С., Третяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. Москва : Машиностроение, 1986. 192 с.
2. Анисеев А. И., Анискин В. Н., Торопченков В. С. Пути повышения работоспособности режущего инструмента за счет нанесения износостойких покрытий. Современный твердосплавный инструмент и рациональное его использование : материалы междунар. науч.-практ. конф. Ленинград : 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. Москва : Химия, 1995. Т. 1, 2.
5. Диткин В. А., Прудников А. П. Справочник по операционному исчислению. Москва : Высшая школа, 1965. 467 с.
6. Voxman R. L. Vacuum arc deposition: early history and recent developments. Proc. XIXth ISDEIV. Xi'an, China, Sept. 2000. p. 1.
7. Mattox D. M. The History of Vacuum Coating Technology. Albuquerque, NM, USA. 2002. 48 p.
8. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. 212 с.
9. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование / И. И. Аксенов и др. Киев : Наукова думка, 2011. 724 с.
10. Аксенов И. И., Аксенов Д. С., Белоус В. А. Техника осаждения вакуумно-дуговых покрытий. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2014. 280 с.
11. Вакуумно-дуговые покрытия: технологии, материалы, структура, свойства / И. И. Аксенов и др. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2015. 370 с.
12. Guohua Qin, Sino Weihong, Zhang Zhuxi, Wu Min Wan. Systematic modeling of the workpiece-device. Geometric default and compliance for predicting the error of workpiece processing. Journal of Manufacturing Sc, 2015. С. 789–801.
13. A simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate (VI) in strong alkaline solutions / D. A. Golovko, V. K. Sharma, V. I. Suprunovich and oth. Analytical Letters. 2011. Vol. 44, N. 7. P. 1333–1340.
14. Muholzoev A. V., Masyagin V. B. Probabilistic Calculation of Tolerances of the Dimension Chain Based on the Floyd-warshall Algorithm. Procedia Engineering. Volume 150. 2016. P. 959–962. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.070.

#### References

1. Vereshchaka, A. S., Tret'yakov, I. P. (1986). Cutting tools with wear resistant coatings. Moscow : Mashinostroenie [in Russian].
2. Anisееv, A. I., Anikin, V. N., Toropchenov, V. S. (1980). Ways to improve the performance of cutting tools by applying wear-resistant coatings. Sovremennyy tverdosplavnyy instrument i ratsional'noe ego ispol'zovanie : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Leningrad : LDNTP [in Russian].
3. Tonkonogiy, V. M. (2004). Controlling the reagent gas supply when applying ion-plasma coatings with predicting leaks in vacuum installations.



- Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya, 3 (89), 70–73 [in Russian].
4. Dytnerskiy, Yu. I. (1995). Processes and devices of chemical technology. Moscow : Khimiya [in Russian].
  5. Ditkin, V. A., Prudnikov, A. P. (1965). Operational Calculus Handbook. Moscow : Vysshaya shkola [in Russian].
  6. Boxman, R. L. (2000). Vacuum arc deposition: early history and recent developments. Proc. XIXth ISDEIV. Xi'an, China, Sept., p. 1 [in English].
  7. Mattox, D. M. (2002). The History of Vacuum Coating Technology. Albuquerque, NM, USA, 48 p. [in English].
  8. Aksenov, I. I. (2005). Vacuum arc in erosional plasma sources. Kharkov : NNTs KhFTI [in Russian].
  9. Aksenov, I. I., Andreev, A. A., Belous, V. A. et al. (2011). Vacuum arc: plasma sources, coating deposition, surface modification. Kiev : Naukova dumka [in Russian].
  10. Aksenov, I. I., Aksenov, D. S., Belous, V. A. (2014). Technique of deposition of vacuum arc coatings. Kharkov : NNTs KhFTI [in Russian].
  11. Aksenov, I. I., Aksenov, D. S., Andreev, A. A. et al. (2015). Vacuum-arc coatings: technologies, materials, structure, properties. Kharkov : NNTs KhFTI [in Russian].
  12. Guohua Qin, Sino Weihong, Zhang Zhuxi, Wu Min Wan (2015). Systematic modeling of the workpiece-device. Geometric default and compliance for predicting the error of workpiece processing. Journal of Manufacturing Sc. P. 789–801.
  13. Golovko, D. A., Sharma, V. K., Suprunovich, V. I. et al. (2011). A simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate (VI) in strong alkaline solutions. Analytical Letters. Vol. 44, N. 7. P. 1333–1340 [in English].
  14. Muholzoev, A. V., Masyagin, V. B. (2016). Probabilistic Calculation of Tolerances of the Dimension Chain Based on the Floyd-warshall Algorithm. Procedia Engineering. Volume 150. P. 959–962. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.070 [in English].

K. V. Diadiun

#### SYSTEM FOR CONTROLLING MASS BALANCE OF GASES AND REAGENTS DURING FORMATION OF ION-PLASMA COATINGS

**Abstract.** *Providing an increase in the working capacity of a metal-cutting tool, it is possible to significantly increase the productivity of mechanized labor, thereby reducing the cost of purchasing a new tool and saving on other accompanying technological components. During the operation of the cutting tool, the main load is transferred to its working part, this, as a rule, leads to partial wear or complete destruction of the planes and cutting edges. There are a number of technologies for processing working surfaces, which provides them with additional strengthening, the most effective of which is the method of applying special coatings to the surface of the cutting tool. Taking into account the specifics of the processes of formation of coatings, they can be divided into three main groups [1]. The first group includes methods in which the formation of coatings is carried out mainly due to diffusion reactions between saturating elements and structures of the instrumental material. The second group includes methods of forming coatings by a complex mechanism. The third group includes methods of forming coatings due to chemical and plasma-chemical reactions of particle flux simultaneously in volumes of space immediately adjacent to the saturable surfaces of the instrumental base. One such technology is the CIB (condensation and ion bombardment) method, which is a physical deposition of coatings. The most characteristic feature of coatings produced by this method is the absence of a transition zone between the coating and the tool material. This makes it possible to obtain a complex of properties on the working surfaces of the tool without deteriorating its original properties. The article is devoted to the issues of increasing the efficiency of ion-plasma technologies through the development and implementation of an automated system for analyzing and controlling the mass balance of reagent gases under conditions of several gases supply. Thus, the improvement of the technology of coating the working surfaces of the cutting tool, namely, the effective control of the process of applying ion-plasma coatings with the introduction of an automated system for analyzing and controlling the mass balance of reagent gases under conditions of supplying several gases is an urgent task.*

**Keywords:** *wear resistance of cutting tool, ion bombardment, ionic plasma technology, criteria for evaluation of reagents supply to vacuum chamber.*



Е. В. Дядюн

#### СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МАССОВОГО БАЛАНСА ГАЗОВ-РЕАГЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

**Аннотация.** Обеспечивая увеличение работоспособности металлорежущего инструмента, можно значительно повысить производительность механизированного труда, тем самым снизив затраты на закупку нового инструмента и сэкономив на другие сопроводительные технологические составляющие. В ходе эксплуатации режущего инструмента основная нагрузка приходится на его рабочую часть. Это, как правило, приводит к частичному износу или полному разрушению плоскостей и режущих кромок. Существует ряд технологий обработки рабочих поверхностей, дополнительно их укрепляющих, наиболее результативной из которых является способ нанесения на поверхность режущего инструмента специальных покрытий. С учетом специфики протекания процессов формирования покрытий их можно разделить на три основные группы [1]. К первой относятся методы, при которых формирование покрытий осуществляется преимущественно за счет диффузионных реакций между насыщающими элементами и структурами инструментального материала. Во вторую группу входят методы формирования покрытий по комплексу механизму. К третьей можно отнести методы формирования покрытий за счет химических и плазмохимических реакций потока частиц одновременно в объемах пространства, непосредственно примыкающего к насыщаемым поверхностям инструментальной основы. Одна из таких технологий — метод КИБ (конденсация и ионная бомбардировка), относящийся к методам физического осаждения покрытий. Наиболее характерной особенностью покрытий, получаемых с помощью этого метода, является отсутствие переходной зоны между покрытием и инструментальным материалом. Это дает возможность получать комплекс новых свойств на рабочих поверхностях инструмента, не ухудшая его исходных характеристик. Статья посвящена вопросам повышения эффективности ионно-плазменных технологий путем разработки и внедрения автоматизированной системы анализа и управления массовым балансом газов-реагентов в условиях подачи нескольких газов. Таким образом, совершенствование технологии нанесения покрытий на рабочие поверхности режущего инструмента, а именно: эффективное управление процессом нанесения ионно-плазменных покрытий с внедрением автоматизированной системы анализа и управления массовым балансом газов-реагентов в условиях подачи нескольких газов, является актуальной задачей.

**Ключевые слова:** износостойкость режущего инструмента, бомбардировка ионами, технология ионной плазмы, критерии оценки подачи реагентов в вакуумную камеру.

#### ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА

**Дядюн Катерина Володимирівна** — викладачка, Херсонський політехнічний фаховий коледж Одеського національного політехнічного університету, м. Херсон, Україна, homutovakaterina@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8706-8969>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Diadiun K. V.** — teacher, Kherson Polytechnic Professional College of Odessa National Polytechnic University, Kherson, Ukraine, homutovakaterina@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8706-8969>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Дядюн Е. В.** — преподаватель, Херсонский политехнический профессиональный колледж Одесского национального политехнического университета, г. Херсон, Украина, homutovakaterina@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8706-8969>

Стаття надійшла до редакції / Received 28.02.2020