

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Ключевые слова: компьютерная система автоматизации, ионно-плазменная установка, нанесение покрытий, ионная очистка, система управления, металлорежущий инструмент, распределенная система.

Введение

В то время как ионно-плазменный метод используется достаточно широко, остается открытым вопрос автоматизации процесса управления установкой, которая реализует данный метод в вакууме. Сложность автоматизации технологического процесса нанесения плазменного покрытия в вакууме состоит в том, что управлять непосредственно параметрами процессов, происходящих в вакуумной камере, невозможно. Это связано с регламентом технологического процесса [1, 2].

Известны работы, которые моделируют отдельные этапы технологического процесса [3], работы, в которых предложен подход к созданию автоматизированной системы управления для установок нанесения покрытий данным методом [4].

В процессе анализа работ современных исследователей выделено несколько возможных путей и моделей, элементы которых можно использовать для решения поставленной задачи.

Для решения задачи динамики процессов теплопроводности в сплошных средах предлагается использовать дифференциальное уравнение Риккати [5]. Также можно использовать условия оптимальности для решения задачи оптимизации по методу множителей Лагранжа. В нашем случае представляет интерес именно целевая функция, которая записывается с помощью этого уравнения, а не условия решения задачи оптимального управления.

Для моделирования перераспределения массы вещества в замкнутом объеме рассматривается робастная асимптотическая устойчивость нулевого решения для нелинейных динамических систем и выдвигается предложение использовать подход, основанный на логарифмической норме [6]. Такой подход к решению проблемы устойчивости системы уместен при большой разнице в порядках входных и выходных величин, который в случае рассмотрения динамики процессов теплопроводности в сплошных средах не является оптимальным.

Организация управления данным высокотемпературным процессом требует фиксированного и известного состава исходного сырья, без каких-либо изменений в качестве состава. Соблюдение данного условия позволяет говорить об устойчивости процесса нанесения материала покрытия [7].

При моделировании тепловых потоков от центральной части камеры к ее периферии необходимо учитывать изменения теплофизических характеристик газовой среды в процессе ее использования. Методы расчета таких характеристик существуют [8], но они сложны в применении, что связано со сравнительно малыми потерями в соотношении с тепловыми потоками, возникающими в процессе нанесения покрытий.

В данной работе представлены результаты разработки динамических моделей процессов очистки, напыления и охлаждения металлорежущего инструмента.

© В.М. ТОНКОНОГИЙ, Е.Г. КИРКОПУЛО, 2020

Для того чтобы разработать модели и системы динамики технологического процесса нанесения покрытий методом ионно-плазменного напыления, предложено решить следующие задачи:

- 1) выполнить моделирование радиального переноса тепла в инструменте;
- 2) разработать комплекс математических моделей динамики основных технологических процессов, происходящих в установке (очистка, напыление и охлаждение инструмента), которые имеют существенно нелинейный характер;
- 3) разработать комплекс систем динамики основных технологических процессов (очистка, напыление и охлаждение инструмента).

Разработка распределенной математической модели динамики радиального переноса тепла в металлорежущем инструменте

В практике нанесения ионно-плазменных покрытий встречается инструмент самых разнообразных конфигураций и размеров. Рассмотрим в качестве примера группу инструментов, имеющих цилиндрическую форму (сверла, развертки и т.п.). Тогда в качестве модели инструмента может быть выбран цилиндр, длина которого существенно (в десять раз и более) превышает его диаметр. В этом случае с приемлемой для технических целей точностью его можно интерпретировать бесконечным цилиндром, пространство которого, как известно, в цилиндрических координатах описывается тремя независимыми переменными: φ , r и z . Задача управления процессом нагрева цилиндрической заготовки подробно рассмотрена в [9].

Для достижения поставленной цели на первом этапе предложена распределенная математическая модель динамики радиального переноса тепла в металлорежущем инструменте под действием плазменной дуги с учетом управляемости процесса для проверки адекватности математической модели динамики процесса очистки инструмента [10].

Получено уравнение распределения температуры инструмента:

$$x(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) \cdot \varphi_n(r), \quad (1)$$

где $\varphi_n(r) = \sqrt{2} \cdot J_0(r \cdot \sqrt{\lambda_n}) / J_0(\sqrt{\lambda_n})$, $n = 0, 1, 2, \dots$

Уравнение распределения температуры инструмента (1) является результатом дальнейшего развития математической модели радиальной теплопроводности металлорежущего инструмента под действием плазменной струи, которая отличается тем, что действие струи вместо краевого условия вводится в правую часть дифференциального уравнения в частных производных по методу А.Г. Бутковского. Это позволило более адекватно моделировать температуру нагрева инструмента в зависимости от геометрического параметра (радиус инструмента). Такое распределенное определение температуры (вместо сосредоточенного параметра) дает возможность усовершенствовать моделирование процесса нагрева металлорежущего инструмента и, как следствие, повысить качество покрытия.

Разработка комплекса математических моделей динамики основных технологических процессов установки

Для решения поставленной задачи предложено разработать комплекс математических моделей динамики основных технологических процессов нанесения покрытия для моделирования условий выхода установки ионно-плазменного нанесения покрытий на оптимальный технологический режим в группе параметров, влияющих на нанесение покрытия [11]. Кроме того,

динамические модели смогут описывать влияние внешних возмущений на технологический режим. Дифференциальное уравнение динамики нагрева инструмента в процессе нанесения покрытия запишем в виде

$$c_{\text{tool}} \cdot \rho_{\text{tool}} \cdot V_{\text{tool}} \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = -s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) - q_c(\tau) + j \cdot s \cdot U_{\text{sub}}(\tau) + j \cdot s \cdot \frac{E_0}{z \cdot e}. \quad (2)$$

При начальном условии $T(0) = T_0$. Начальная температура $T_0 = 300$ К.

Рассмотрим динамику давления. Для построения динамической модели изменения давления азота в вакуумной камере запишем материальный баланс:

$$\frac{dM_{N_2}}{d\tau} = m_p + m_n - m_o - m_{Ti}, \quad (3)$$

где M_{N_2} — масса газообразного азота в вакуумной камере, кг; m_p — поступление азота за счет принудительной подачи его в камеру, кг/с; m_n — поступления за счет натекания воздуха из атмосферы из-за негерметичности камеры, кг/с; m_o — потери азота за счет работы вакуумного насоса, кг/с; m_{Ti} — потери азота на химические реакции в камере, кг/с.

Считая объем вакуумной камеры и температуру газа в ней постоянными, запишем на основании закона Менделеева–Клапейрона

$$M_{N_2} = \frac{\mu_{N_2} \cdot V_c}{R \cdot T_c} \cdot P_{N_2}. \quad (4)$$

Далее можно записать дифференциальное уравнение в виде

$$\frac{\mu_{N_2} \cdot V_c}{R \cdot T_c} \cdot \frac{dP_{N_2}(\tau)}{d\tau} = -a_2 \cdot P_{N_2}(\tau) + m_p \cdot (\tau) - a_3 \cdot m_{Ti}(\tau) + a_4, \quad (5)$$

где $a_1 = \frac{\mu_{N_2} \cdot V_c}{R \cdot T_c}$, $a_2 = \frac{\mu_{N_2} \cdot v_n}{R \cdot T_c}$, $a_3 = \frac{0,5 \cdot \mu_{N_2}}{\mu_{Ti}}$, $a_4 = 0,79 \cdot \frac{\mu_{N_2} \cdot H}{R \cdot T_c}$, а начальное условие — $P_{N_2}(0) = P_{N_2,0}$.

По аналогии запишем уравнение теплообмена при охлаждении инструмента:

$$a_1 \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = -a_2 \cdot T^4(\tau) - q(\tau). \quad (6)$$

Впервые разработан комплекс нелинейных моделей динамики основных технологических процессов установки ионно-плазменного напыления на металлорежущий инструмент, в основу которых положены дифференциальные уравнения динамики нагрева инструмента в процессе нанесения покрытия, динамика давления азота в вакуумной камере и уравнения теплообмена при охлаждении инструмента. Это позволило получить зависимости во времени как характеристик самого инструмента, так и параметров камеры, обеспечивающих технологический процесс. Полученная общая математическая модель, описывающая процессы очистки, напыления и охлаждения, имеет вид

$$c_{\text{tool}} \cdot \rho_{\text{tool}} \cdot V_{\text{tool}} \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = -s \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4(\tau) - q_c(\tau) + j \cdot s \cdot U_{\text{sub}}(\tau) + j \cdot s \cdot \frac{E_0}{z \cdot e},$$

$$\frac{\mu_{N_2} \cdot V_c}{R \cdot T_c} \cdot \frac{dP_{N_2}(\tau)}{d\tau} = -a_2 \cdot P_{N_2}(\tau) + m_p \cdot (\tau) - a_3 \cdot m_{Ti}(\tau) + a_4,$$

$$a_1 \cdot \frac{dT(\tau)}{d\tau} = -a_2 \cdot T^4(\tau) - q(\tau).$$

Разработка комплекса систем управления основными технологическими процессами нанесения покрытия

Задачу разработки комплекса систем управления предложено решить основными технологическими процессами нанесения покрытия с использованием математических моделей динамики, разработанных на предыдущем этапе.

Цель систем автоматического управления (САУ) на первом этапе — качественная ионная очистка инструмента перед нанесением покрытия.

Очистка обеспечивается бомбардировкой поверхности инструмента ионами наносимого материала при равномерном повышении температуры от 300 К до 800 К по линейной программе за 1800 с [12]. Допустимое отклонение от программы нагрева составляет не более ± 25 К.

Величина отклонения, с одной стороны, обусловлена принципиально релейным характером управления — включения и отключения дуги, а с другой — необходимостью предотвращения изменения структуры металла инструмента.

На начальном этапе включается дуга и осуществляется нагрев-очистка. При достижении поверхностью инструмента температуры верхней допустимой границы на текущий момент времени происходит отключение дуги.

После отключения инструмент охлаждается за счет потери энергии на излучение. Включение и отключение дуги продолжается до тех пор, пока измеряемая температура поверхности T не сравняется с заданной температурой нанесения покрытия T_{coat} .

В работе [8] детально рассмотрен процесс моделирования нагрева инструмента в процессе управления ионной очисткой. На базе разработанной математической модели создана имитационная модель системы управления ионной очисткой (рис. 1).

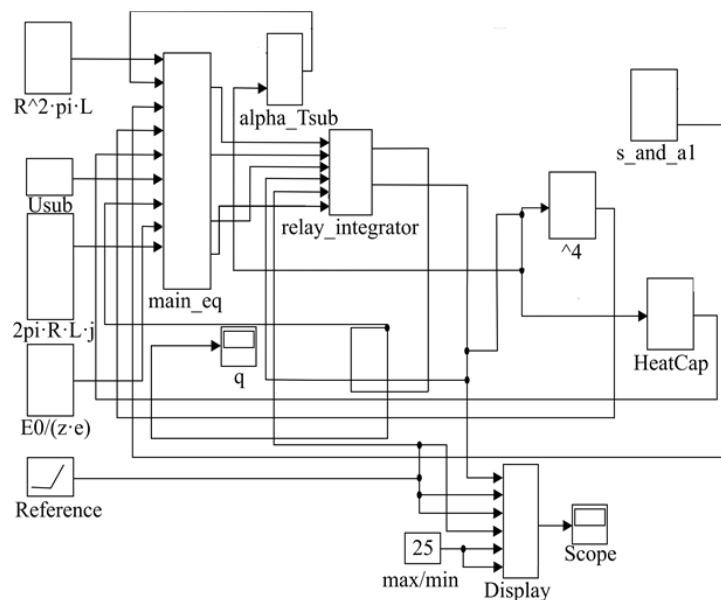


Рис. 1

Имитационное моделирование проводилось для определения точного радиального распределения температур при управлении [13]. Предполагается, что переходный процесс температуры во времени и радиальное распределение температуры должны удовлетворять техническим регламентам.

Подсистема HeatCup имитационной модели реализует формулу (7)

$$c_{\text{tool}} = 3,63 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 5,23 \cdot 10^{-2} \cdot T + 387. \quad (7)$$

Цель управления — стабилизация температуры инструмента в процессе нанесения покрытия [14]. Управлением является напряжение на подложке $U_{\text{sub}}(\tau)$, измерением — температура инструмента $T(\tau)$, возмущением — тепловой поток q_c от инструмента к кассете, в которой он закреплен.

Начальная температура $T_0 = 800$ К. Ограничения на управление составляют $0 \leq U_{\text{sub}} \leq 400$ В, а возмущение находится в пределах $0,2 \leq q_c \leq 2$ Пн.

Имитационная модель системы стабилизации температуры на этапе нанесения покрытия на инструмент изображена на рис. 2

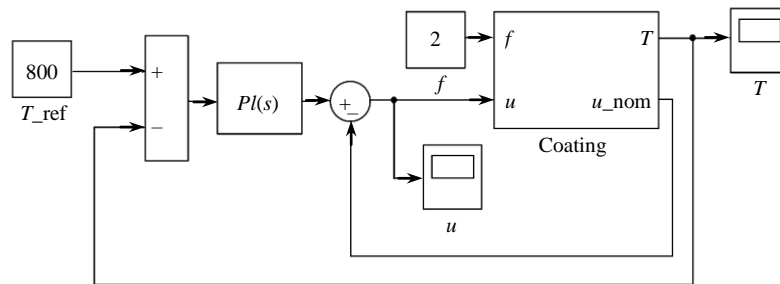


Рис. 2

Подсистема Coating, которая является основой модели системы стабилизации температуры, предназначена для имитационного моделирования дифференциального уравнения (2).

В качестве подсистемы $PI(s)$ взята стандартная подсистема ПИ-регулятора.

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$PI(s) = 10,1 \cdot \left(1 + \frac{35,57 \cdot 10^{-5}}{s} \right). \quad (8)$$

Течение переходного процесса заканчивается в момент $\tau = 1000$ с, который отмечен пунктирной линией. Следующий ход процесса приведен с целью показать устойчивость системы. После завершения процесса происходит переход на стадию охлаждения.

На качество функционирования системы управления неполнота протекания переходного процесса не влияет, поскольку отклонение температуры от режимного значения очень мало (0,3 К).

Анализ переходного процесса изменения температуры инструмента при действии максимального возмущения (рис. 3) показал, что при максимальном возбуждении качество стабилизации температуры высокое, время переходного процесса и отклонения температуры металлорежущего инструмента соответствуют требованиям технологического регламента для этой стадии процесса, а управляющее воздействие (рис. 4) при стабилизации не выходит за технологические ограничения.

Цель управления на этапе нанесения покрытия — также стабилизация давления азота в вакуумной камере в процессе нанесения покрытия. Управляющим воздействием является подача азота. Измеряемым параметром служит давление в камере. Возмущениями являются отклонения расходов других потоков. Имитационная модель системы управления давлением представлена на рис. 5.

Подсистема Pressure имитационной модели рис. 5 показана на рис. 6. Эта подсистема реализует динамическую модель, которая задана уравнением (5).

В качестве подсистемы PI (s) взята стандартная подсистема ПИ-регулятора. Синтез регулятора проведен с помощью подсистемы автонастройки Simulink при компромиссе робастности и быстродействия. Регулятор имеет вид

$$PI(s) = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{3}{s} \right). \quad (9)$$

Переходный процесс изменения температуры инструмента при действии максимального возмущения приведены на рис. 6, а процесс изменения управляющего воздействия — на рис. 7.

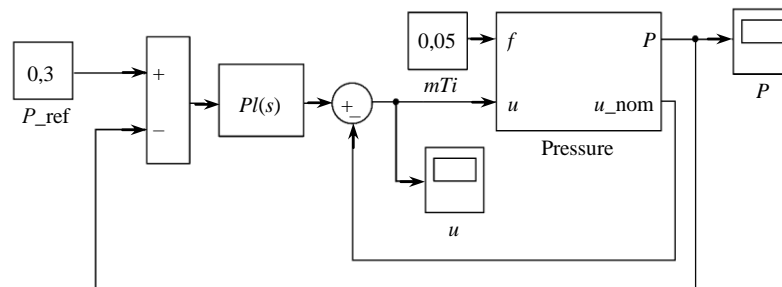


Рис. 5

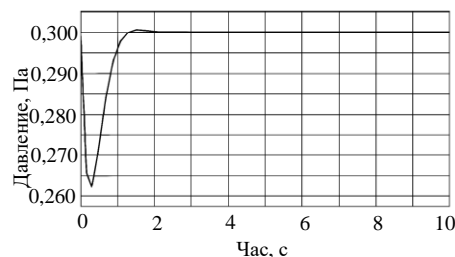


Рис. 6

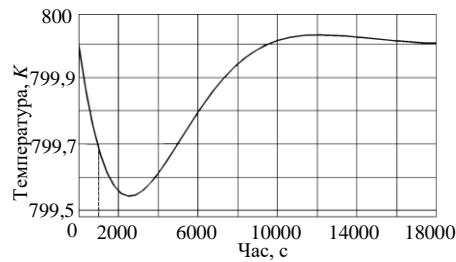


Рис. 3

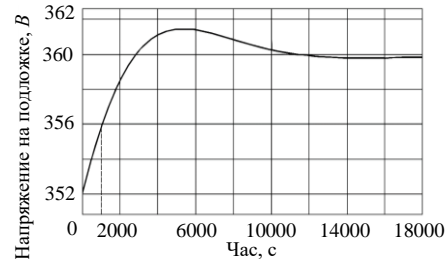


Рис. 4

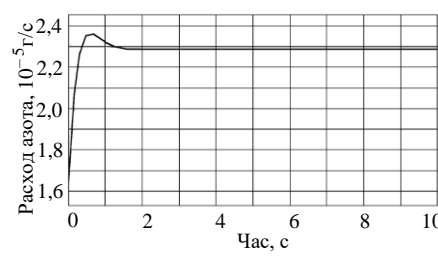


Рис. 7

Анализ переходных процессов показал, что при максимальном возбуждении качество стабилизации температуры высокое, время переходного процесса — приемлемое, а управляющее воздействие не выходит за ограничения. Таким образом, функционирование разработанной системы управления следует признать удовлетворительным.

Сигнал о начале охлаждения инструмента в вакууме поступает от таймера, который отсчитывает время нанесения покрытия τ_{coat} . После поступления сигнала работа электродугового источника прекращается. Охлаждение инструмента происходит благодаря инфракрасному излучению и теплопередаче в опорную кассету. Работа установки завершается при достижении инструментом температуры $T = 500$ К. После этого камера разгерметизируется и начинается выгрузка инструмента.

Схема имитационной модели системы управления охлаждением показана на рис. 8.

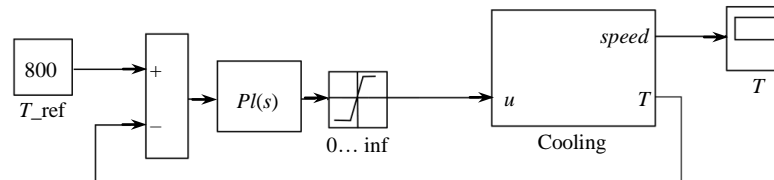


Рис. 8

Схема подсистемы Cooling имитационной модели системы управления охлаждением (рис. 8) показана на рис. 9, процесс программного изменения температуры инструмента.

В качестве подсистемы $PI(s)$ взята стандартная подсистема ПИ-регулятора. Синтез регулятора произведен с помощью подсистемы автонастройки Simulink при компромиссе робастности и быстродействия. Передаточная функция регулятора имеет вид

$$PI(s) = -11,34 \cdot \left(1 + \frac{0,0001}{s} \right). \quad (10)$$

Переходный процесс изменения температуры инструмента по программе приведен на рис. 9, процесс изменения управляющего воздействия — на рис. 10, а скорость охлаждения инструмента — на рис. 11.

Из графиков рис. 9, 10 видно, что процесс охлаждения удовлетворительный.

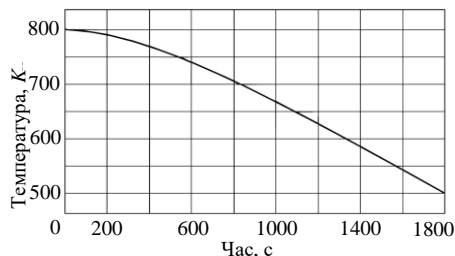


Рис. 9

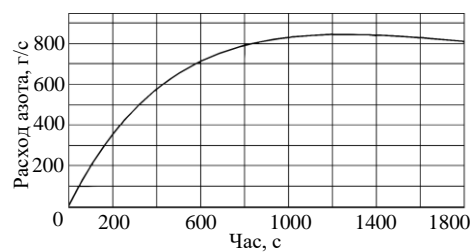


Рис. 10

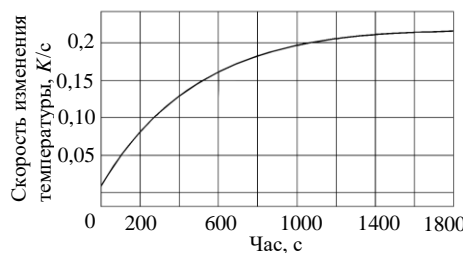


Рис. 11

Анализ переходных процессов показывает, что программа охлаждения инструмента выполняется качественно, а управляющее воздействие и скорость охлаждения не выходят за ограничения.

Таким образом, функционирование разработанной системы управления следует признать удовлетворительным.

В результате разработан комплекс нелинейных систем управления основными технологическими процессами при нанесении ионно-плазменного покрытия на металлорежущий инструмент на базе нелинейных моделей динамики, что позволило исследовать влияние внутренних и внешних возмущений на процессы очистки и охлаждения инструмента и нанесения покрытия.

Заключение

Использование метода Бутковского для решения задачи разработки математической модели динамики радиального переноса тепла в металлорежущем инструменте обусловлено распределенным характером распространения энергии в материале металлорежущего инструмента цилиндрической формы. Это дает более приближенный результат, потому что моделирование происходит как в реальности, т.е. не с сосредоточенными параметрами, а с распределенными. Кроме того, на этапе моделирования использована связь между физическими параметрами процесса нанесения покрытия и характеристиками собственно инструмента. Для этого были записаны дифференциальные уравнения динамики нагрева инструмента в процессе нанесения покрытия, динамики давления азота в вакуумной камере и уравнения теплообмена при охлаждении инструмента, что позволило получить зависимости во времени как характеристик самого инструмента, так и параметров, обеспечивающих технологический процесс. Это стало возможным благодаря объединению дифференциальных уравнений динамики процессов в частных производных и созданию общей математической модели. Это решение могло быть затруднено использованием других видов дифференциальных уравнений (например, метода Рунге) из-за необходимости решения задачи оптимизации. Подход, основанный на логарифмической норме, также является нерациональным решением вопроса создания математических моделей и систем технологического процесса из-за того, что предусматривает большую разницу в порядках параметров, чего нет в нашем случае.

Комплекс разработанных математических моделей динамики процессов очистки, напыления и охлаждения инструмента позволяет создать автоматизированную систему управления технологическим процессом ионно-плазменного нанесения покрытий. Использование метода Бутковского значительно упрощает процесс моделирования радиального переноса тепла в инструменте и позволяет создать адекватную модель данного процесса.

Разработанные математические модели динамики технологического процесса способствуют созданию на их основе комплекса систем динамики основных технологических процессов установки (очистка, напыление и охлаждение инструмента).

Результат исследования — создание имитационной модели технологического процесса, которую можно оценить как удовлетворительную.

В.М. Тонконогий, К.Г. Киркопуло

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ

Зростання продуктивності праці реалізується за рахунок різкого підвищення швидкостей різання і вимог до працездатності інструмента, що застосовується. Це вимагає принципово нових рішень в конструкціях верстатів і ріжучих інструментів, використання більш ефективних інструментальних матеріалів і т.п. Одним із шляхів підвищення службових характеристик використання інструме-

нтів є нанесення на їх робочі поверхні зносостійких покриттів зі спеціальними властивостями. Використання зносостійких покриттів має особливе значення в умовах сучасної інтенсифікації виробництва. Існує безліч методів, які дозволяють значно підвищити експлуатаційні характеристики ріжучого інструмента. Особливе місце серед них займає іонно-плазмовий метод, який реалізується на вакуумних установках, оснащених електродуговими випарниками металу, який є основою покриття. Нанесення покриттів на інструмент даним методом досить поширене, в тому числі через низку позитивних властивостей: чистота складу покриття (завдяки роботі в вакуумі); нетоксичність методу; можливість використання покриття як декоративного. У статті розглядається проблема підвищення якості та ефективності роботи автоматизованої системи керування установкою іонно-плазмового нанесення покриттів на металорізальний інструмент. В існуючих установках використовуються досить застарілі і недосконалі засоби керування. Крім того, існуючі системи керування моделюють лише окремі етапи технологічного процесу нанесення покриттів. Найчастіше розглядається задача розподілу теплових потоків в статисти в інструменті, що підлягає нагріванню, але не вирішується завдання радіального розподілу температурного поля. У даній роботі запропоновано використання методу Бутковського для спрощення рішення задачі керування процесом нагріву інструмента. Запропоновано загальну математичну модель динаміки всіх складових технологій (очищення інструмента, нанесення покриття та охолодження інструмента). На базі математичних моделей створено системи керування етапами технологічного процесу.

Ключові слова: комп'ютерна система автоматизації, іонно-плазмова установка, нанесення покриттів, іонне очищення, система керування, металорізальний інструмент, розподілена система.

V.M. Tonkonogyi, E.G. Kirkopulo

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF APPLYING WEAR-RESISTANT COATINGS BY ION-PLASMA METHOD

An increase in labor productivity is realized due to a sharp increase in cutting speeds and requirements for the operability of the tool used. This requires fundamentally new solutions in the design of machine tools and cutting tools, the use of more efficient tool materials, etc. One of the ways to increase the service characteristics of the tools used is to apply wear-resistant coatings with special properties to their working surfaces. The use of wear-resistant coatings is of particular importance in conditions of modern intensification of production. There are many methods that can significantly improve the performance of the cutting tool. A special place among them is occupied by the ion-plasma method, which is implemented on vacuum installations equipped with electric arc evaporators of the metal, which is the basis of the coating. Coating a tool with this method is quite common, including due to a number of positive properties: the purity of the coating composition (due to work in a vacuum); non-toxicity of the method; the possibility of using the coating as a decorative one. The article discusses the problem of improving the quality and efficiency of the automated control system for the installation of ion-plasma coating on metal-cutting tools. Existing installations use fairly outdated and imperfect controls. In addition, existing control systems model only certain stages of the coating process. Most often, the problem of the distribution of heat fluxes in static in a tool to be heated is considered, but the problem of radial distribution of the temperature field is not solved. In this paper, the use of the Butkovsky method to simplify the solution of the problem of controlling the heating process of a tool is proposed. A general mathematical model of the dynamics of all components of the technology is proposed (tool cleaning, coating and tool cooling). Based on mathematical models, process control systems have been created.

Keywords: Computer automation system, ion-plasma installation. coating, ion cleaning, control system, metal cutting tool, distributed system.

1. Тонконогий В.М. Управління процесом нанесення зносостійких тонкоплівкових покриттів на різальний інструмент. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2003. Вип. 2(26). 2. С. 179–183.
2. Киркопуло Е.Г. Разработка системы автоматизации ионно-плазменной установки. *Матеріали XVIII міжнар. науково-технічної конференції*, 8–13 червня 2018 р., Одеса, 2018. С. 110–113.
3. Дядюн, К.В., Чебукина, В.Ф. Процесс нанесения ионно-плазменных покрытий и системный подход к управлению процессом. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*. 2016, № 1. С. 7–10.
4. Смирнов І.В., Долгов М.А., Іванченко О.В., та ін. Багатоканальна система автоматизації роботи установки вакуумно-дугового напилення. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2013. 61, № 1/5. С. 60–64.
5. Копець М.М. Інтегро-диференціальне рівняння Ріккати в задачі оптимального керування процесом теплопровідності. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2013. № 2. С. 59–63. http://nbuv.gov.ua/UJRN/NVKPI_2013_2_8.
6. Vrabel R., «Logarithmic norm-based analysis of robust asymptotic stability of nonlinear dynamical systems». *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2020. 80, January, 104957 DOI <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.104957>.
7. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. O. Brunetkin, M.V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M. Maksymov. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. 4/6 (100). 25–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176422
8. Matsevityi Yu.M. Identification of the thermal conductivity coefficient for quasi-stationary two-dimensional heat conduction equations. Yu.M. Matsevityi, S.V. Alekhina, V.T. Borukhov, G.M. Zayats, A.O. Kostikov. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017. 90, N 6. С. 1295–1310, DOI 10.1007/s10891-017-1686-7
9. Тонконогий, В. М., Киркопуло, Е. Г. Прецизионное моделирование нагрева инструментов в процессе управления ионно-плазменной очисткой. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2019. 11, № 2, С. 38–46.
10. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М. : Наука, 1975. 568 с.
11. Тонконогий В.М., Савельєва О.С. Автоматизація управління технологією нанесення іонно-плазмових покриттів на різальний інструмент. *Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» «Високі технології в машинобудуванні»*. 2004. № 1. С. 162–167.
12. Тонконогий В.М. Інтелектуальна підтримка системи автоматизованого управління нанесенням зносостійких покриттів на різальний інструмент. *Матеріали 10-ї міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2003»*. Севастополь: СХТУ, 2003. С. 103.
13. Kirkopulo K., Tonkonogiy V., Stopakevych O., Stopakevych A. Design of a set of nonlinear control systems of the ARC PVD ion-plasma installation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 2, № 2 (92). P. 65–74. SCOPUS (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127708>)
14. Тонконогий В.М. Система автоматизованого управління технологією нанесення зносостійких іонно-плазмових покриттів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2004. 1(28). С. 141–145.

Получено 27.03.2020