

УДК 621.5

С. А. ГОРБАТКОВ, Р. Р. НЕВЬЯНЦЕВА, Е. В. ПАРФЕНОВ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО УДАЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ

Рассматривается автоматизация перспективного технологического процесса — электролитно-плазменной обработки — на примере удаления покрытия из нитрида титана со стали ЭИ-961Ш. Приведена феноменологическая модель процесса, описывающая закономерности удаления покрытия в зависимости от типов кипения в парогазовой оболочке. Рассмотрена информационная модель процесса, описывающая закономерности передачи и преобразования информации о состоянии поверхности. Изложен подход к построению системы управления процессом с обратной связью на основе инверсных нейросетевых моделей. Показано, что такой подход позволяет рассчитывать закон управляющего напряжения и проводить процесс по требуемой реализуемой траектории в пространстве состояний с погрешностью не более 10%. *Электролитно-плазменная обработка; удаление покрытий; АСУ ТП; полирование сталей; нитрид титана; нейронные сети*

ВВЕДЕНИЕ

Покрытие из нитрида титана обладает высокой износостойкостью и широко применяется для защиты различных деталей, в том числе лопаток компрессоров авиационных двигателей и рабочих лопаток паровых турбин. В результате отклонения от режимов подготовки поверхности и вакуумно-плазменного напыления покрытия возникают технологические дефекты. Кроме того, в процессе эксплуатации деталей под действием повышенных температур, нагрузок и агрессивных сред происходит разрушение покрытия и его ресурс, как правило, в 2–3 раза меньше ресурса детали. Для снижения материальных затрат и увеличения ресурса работы двигателя в рамках существующих ремонтных технологий предусмотрено удаление дефектного покрытия и его повторное нанесение.

В настоящее время покрытие из нитрида титана удаляется химическим методом, связанным с использованием плавиковой кислоты высокой концентрации. Плавиковая кислота не поддается нейтрализации и утилизации, что значительно ухудшает экологическую безопасность производства. Замена химического метода удаления покрытия из нитрида титана электролитно-плазменным методом, позволяющим проводить обработку в нетоксичных растворах аммонийных солей низкой концентрации, является актуальной современной задачей машиностроения.

Внедрение новых конкурентоспособных технологий в современных условиях рыночной экономики подразумевает применение автоматизированных систем управления, обеспечивающих эффективное проведение процесса и управление качеством поверхности в ходе обработки. В связи с тем, что электролитно-плазменный метод для удаления покрытий предложен сравнительно недавно [1], создание автоматизированных систем управления технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия (АСУ ТП ЭПУП) неразрывно связано с необходимостью изучения механизма процесса, выявления независимых параметров состояния поверхности и параметров обратной связи, измеримых в ходе обработки. Учитывая изложенное, целью проведенного комплекса исследований являлось повышение эффективности технологического процесса электролитно-плазменного удаления покрытия из нитрида титана с поверхности стали ЭИ-961Ш на основе разработки алгоритмов управления процессом. Заметим, что полученные результаты распространяются и на другие нержавеющие стали.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Обзор научной и патентной литературы, отражающей современное состояние вопроса исследования, показывает, что не существует единой теории электролитно-плазменной обработки, отсутствуют модели процесса

как объекта управления, алгоритмы и системы управления технологическим процессом. Проанализированный большой объем информации о применении электролитно-плазменной обработки, а также о моделях, алгоритмах и системах управления родственными технологическими процессами позволил наметить пути решения поставленных задач автоматизации процесса.

Анализ классических в данной области работ [2, 3] показывает, что на первом этапе работы наиболее целесообразным является использование феноменологического подхода, так как аналитическое описание процессов в системе требует решения сложных нелинейных краевых задач для уравнений математической физики. Установлено, что электролитно-плазменная обработка представляет собой разновидность электрохимической, однако, в отличие от нее, проводится при высоких напряжениях от 100 до 500 В. В условиях таких напряжений вокруг электрода меньшего размера, которым является обрабатываемая деталь, электролит вскипает, и образуется парогазовая оболочка. Выявлены две основные характеристики процесса, отражающие свойства парогазовой оболочки. Показано, что по вольтамперной характеристике может быть определено нахождение системы в одном из следующих режимов: электролиза, нагрева, коммутационном и электрогидродинамическом [4]. По кривой кипения может быть установлен тип кипения в парогазовой оболочке: пузырьковый, пленочный или переходный [5]. От режимов электролитно-плазменной обработки и типов кипения существенно зависит механизм воздействия на обрабатываемую поверхность.

Неопределенность параметров обратной связи ТП ЭПУП требует разработки информационной модели, описывающей закономерности передачи и преобразования информации между количественными критериями состояния поверхности и характеристиками системы, измеримыми в ходе обработки. При рассмотрении литературных данных выявлена эффективность анализа формы и интенсивности колебаний тока, содержащих высокочастотные компоненты, предположительно связанные с горением разряда, и низкочастотные, вызванные колебаниями парогазовой оболочки, в диапазоне частот до 10 кГц [6].

Разработка математической модели ТП ЭПУП как объекта управления требует изучения основных характеристик процесса в динамике. Исходя из того, что исследуемый

процесс является существенно нелинейным и распределенным, классические методы, основанные на линеаризации, являются неприемлемыми. В настоящее время показано [7], что для моделирования технологических процессов как объектов управления возможно построение универсальной нейросетевой модели «вход-выход» на основе нейронной сети с радиальной базисной функцией. Кроме того, для моделирования отдельных стадий процесса возможно использование блочных моделей из нескольких нейронных сетей.

Анализ работ, посвященных изучению родственных процессов электротехнологии, показывает, что управление технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия может быть основано на целенаправленном изменении толщины и свойств парогазовой оболочки, являющейся аналогом межэлектродного зазора [8].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТП ЭПУП

Для создания моделей процесса проводилось экспериментальное исследование удаления покрытия на образцах, имитирующих поверхность лопаток компрессоров газотурбинных двигателей. Описание экспериментальной установки, методики планирования эксперимента с использованием центрального композиционного ротатбельного плана, средств измерения факторов и откликов и конструкция разработанной системы регистрации и документирования переменной составляющей тока приведены в работах [9, 10]. Статистический спектральный анализ сигналов проводился по методу Бартлетта-Уэлша [11]. Математическое моделирование процесса, анализ сигналов и использование нейронных сетей с радиальной базисной функцией проводились с помощью программы Matlab.

В результате обобщения и регрессионного анализа экспериментальных данных была разработана феноменологическая модель, которая описывает физико-химические процессы, протекающие при электролитно-плазменном удалении покрытия. Структура феноменологической модели ТП ЭПУП была разработана на основе синтеза данных по различным приложениям электролитно-плазменной обработки (рис. 1). Главное допущение при построении феноменологической модели заключается в том, что поверхность, являющаяся фактически средой с распределенными физическими параметрами, характеризуется интегральными показателями. Основными элементами исследуемой системы яв-

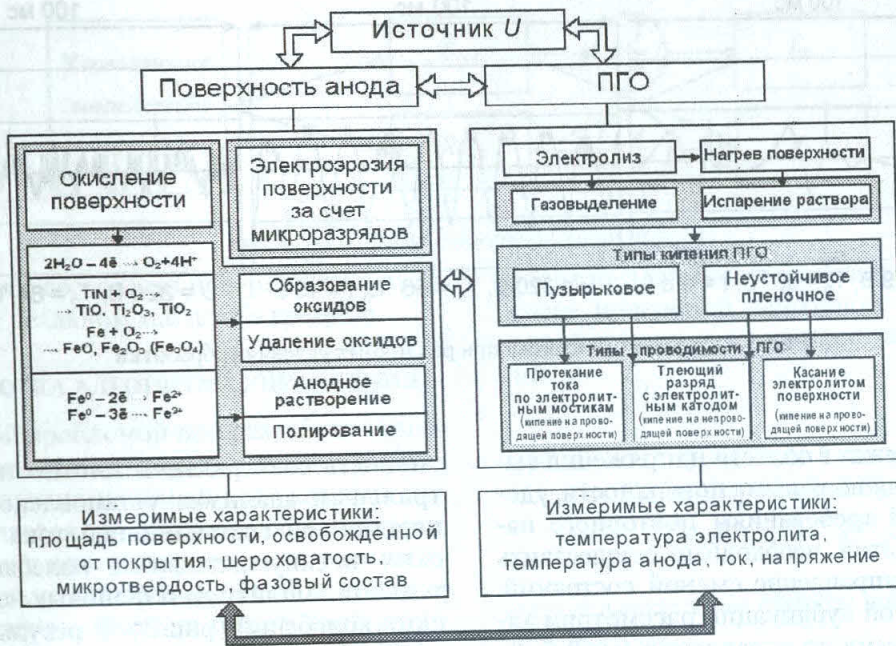


Рис. 1. Феноменологическая модель

ляются источник питания, анод и парогазовая оболочка. Наиболее существенные процессы в системе – это окисление поверхности, удаление оксидов, анодное растворение и электроэрозионное воздействие микроразрядов на поверхность. Основным источником воздействия на поверхность является электролиз, сопровождающийся газовой выделением, и нагрев поверхности, приводящий к испарению раствора. При контакте проводящей поверхности с электролитом в режиме пузырькового и переходного кипения в системе протекает ток электролиза. Проводимость участков парогазовой оболочки с пленочным типом кипения определяется эмиссией ионов из кипящего электролита, воздействующих на микронеровности проводящей поверхности анода. При формировании непроводящего оксида возможно образование тлеющего разряда с электролитным катодом в порах оксидного слоя, сопровождающееся возникновением термомеханических напряжений и локальным разрушением покрытия. Указанные процессы определяют тип кипения и проводимости парогазовой оболочки.

Установлено, что на поверхности образцов в условиях переходного типа кипения в начальной стадии процесса образуются непроводящие ток оксиды Ti_8O_{15} и Fe_2O_3 . В условиях пузырькового типа кипения формируется проводящий оксид TiO и непроводящий оксид TiO_2 . Дальнейшая обработка в услови-

ях пузырькового кипения приводит к удалению оксидов с образованием полированной и матовой поверхности стали соответственно. Поэтому для количественного описания процесса были выбраны два типа сосредоточенных интегральных параметров: 1) по параметрам полированного участка – площадь полированной поверхности $S_{пол}$, шероховатость полированного участка $Ra_{пол}$; 2) по параметрам полного удаления покрытия – площадь поверхности, полностью освобожденной от покрытия $S_{осв}$, средняя шероховатость $Ra_{ср}$.

Особенностью механизма образования полированной поверхности является одновременное удаление покрытия и полирование освобожденного участка в одних и тех же условиях обработки. Данные условия находятся в окрестности режима $U = 350$ В, $T_0 = 50^\circ C$. Для управления процессом по параметрам полированного участка на начальном этапе исследования было принято решение использовать статическую параметрическую оптимизацию условий обработки и управление ее длительностью. Особенность механизма образования матовой поверхности заключается в достаточно быстром удалении покрытия при напряжениях 180–200 В и начальных температурах электролита $T_0 > 70^\circ C$, сопровождающемся получением поверхности стали с шероховатостью выше исходной. Так как условия для снижения ше-

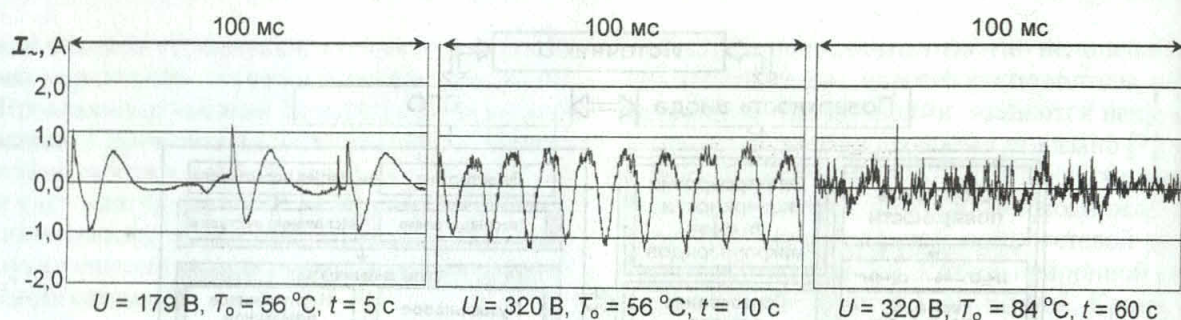


Рис. 2. Осциллограммы тока при различных условиях обработки

роховатости лежат в области напряжений выше 250 В, то для получения поверхности, удовлетворяющей требованиям повторного нанесения покрытия, необходимо осуществить программное управление сменой состояний. В рамках данной публикации рассмотрим алгоритм программного управления сменой состояний на основе нейросетевых моделей.

Как было показано в работе [12], процесс достаточно полно может быть охарактеризован током, протекающим в системе. Анализ постоянной составляющей тока (I_{cp}) показывает, что в соответствии с вольтамперной характеристикой процесс электролитно-плазменного удаления покрытия проводится в коммутационном и электрогидродинамическом режиме. На основании расчета постоянной времени процесса в соответствии с теоремой Котельникова был определен шаг квантования по времени в системе $\Delta t = 15$ с. Анализ переменной составляющей тока выявил наличие ряда основных видов сигнала, соответствующих различным типам кипения на поверхности с различным состоянием (рис. 2).

Сравнительный анализ основных параметров сигнала показал наибольшую информа-

тивность спектральной плотности [9]. Спектральным анализом установлено наличие в переменной составляющей тока периодических несинусоидальных колебаний значительной амплитуды и фоновых непериодических колебаний (рис. 3). В результате анализа значительного объема данных предложено в качестве основной характеристики периодических колебаний использовать суммарную мощность гармонических колебаний, а для характеристики фоновых колебаний — мощность сигнала на частоте 1 кГц (p_1).

Корреляционный анализ значений параметров состояния поверхности и параметров обратной связи показывает, что независимыми сосредоточенными интегральными параметрами, достаточно полно характеризующими процесс электролитно-плазменного удаления покрытия, являются площадь поверхности, полностью освобожденной от покрытия, и средняя шероховатость поверхности. Установлена связь со средним значением тока и мощностью фоновых колебаний тока соответственно. В результате была разработана информационная модель (рис. 4), решающая принципиальную проблему извлечения

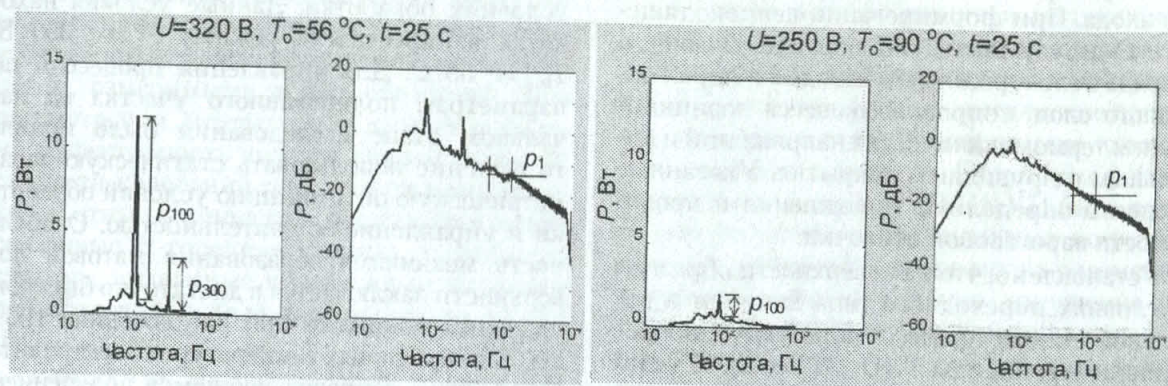


Рис. 3. Спектральная плотность сигнала при различных условиях обработки

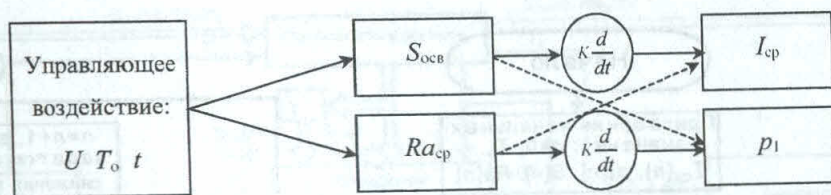


Рис. 4. Блок-схема информационной модели

информации о состоянии поверхности в ходе обработки в реальном масштабе времени.

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

Основной проблемой при разработке алгоритмов управления технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия является ненаблюдаемость параметров состояния поверхности при их управляемости. Решение данной проблемы предложено осуществлять с помощью косвенной идентификации состояния поверхности по параметрам обратной связи в соответствии с информационной моделью.

Разработана статическая эталонная нейросетевая модель НС-1 процесса электролитно-плазменного удаления покрытия как объекта управления (1), которая аппроксимирует связь между управляющими воздействиями и выходными параметрами состояния поверхности с требуемой точностью:

$$\{S_{\text{пол}}, Ra_{\text{пол}}, S_{\text{осв}}, Ra_{\text{ср}}\} = F_1(U, T_0, t). \quad (1)$$

На основе совместного анализа феноменологической и информационной моделей выдвинут принцип управления процессом электролитно-плазменного удаления покрытия с обратной связью для освобождения поверхности по параметрам полного удаления покрытия, основанный на программном управлении напряжением по решению обратной задачи с использованием беспоисковой оптимизации режима методом инверсных нейросетевых моделей. Термин «инверсная» связан с разбиением переменных на выходные величины и управляющие воздействия. Традиционно в моделировании входными величинами являются управляющие воздействия, а выходными — переменные состояния. В данном исследовании, в отличие от традиционных подходов к моделированию, при обучении нейронной сети входными величинами являются переменные состояния, т. е. зависимые и независимые переменные «инвертируются» (меняются местами).

Разработана динамическая эталонная модель НС-2 технологического процесса элек-

тролитно-плазменного удаления покрытия на основе инверсной нейронной сети (2), обученной на совместном пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \{U[n], t[n]\} = \\ = F_2(S_{\text{осв}}[n], Ra_{\text{ср}}[n], S_{\text{осв}}[n-1], \\ Ra_{\text{ср}}[n-1], I_{\text{ср}}[n], p_1[n], T_0), \quad (2) \end{aligned}$$

где n — дискретные отсчеты времени, следующие через Δt .

В вычислительных экспериментах установлено, что применение инверсных нейронных сетей позволяет регуляризовать и решать обратную задачу нахождения управляющего воздействия. Было показано, что наиболее рационально управлять процессом ЭПУП в две стадии. На первой стадии необходимо обеспечивать максимальную производительность процесса по критерию площади поверхности, полностью освобожденной от покрытия, при ограничении по средней шероховатости поверхности, на второй, после удаления покрытия, — максимальную производительность по критерию средней шероховатости поверхности. Поэтому для процесса полирования поверхности без покрытия по разработанной методике были обучены прямая НС-3 (3) и инверсная НС-4 (4) модели процесса:

$$\{Ra_{\text{ср}}\} = F_3(U, t), \quad (3)$$

$$\{U[n], t[n]\} = F_4(Ra_{\text{ср}}[n], Ra_{\text{ср}}[n-1], p_1[n]). \quad (4)$$

При этом число обучающих примеров $N = 1250$; число тестовых точек $N_1 = 35$; максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных 10%.

В итоге разработан алгоритм программного управления ТП ЭПУП по решению обратной задачи (рис. 5). По созданному алгоритму была разработана реализуемая траектория изменения параметров технологического процесса в пространстве состояний (рис. 6). Полученные модели были объединены в систему управления с интеллектуальной обратной

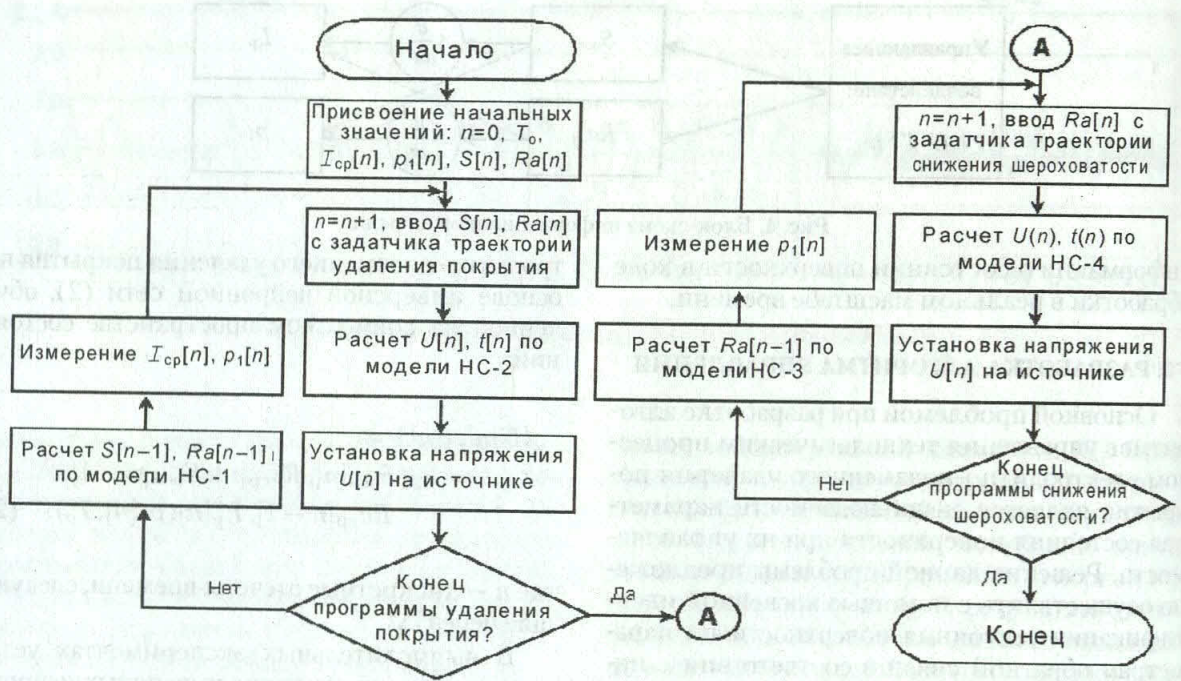


Рис. 5. Блок-схема алгоритма управления

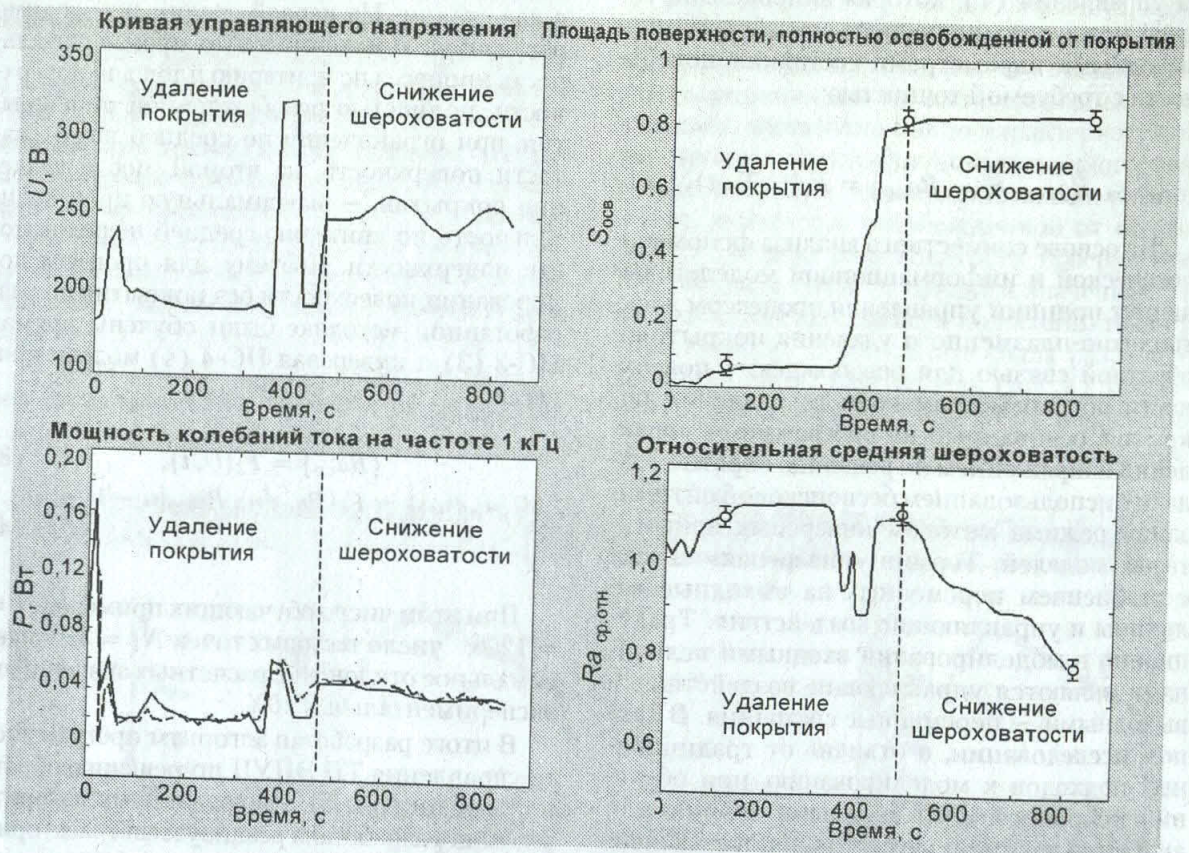


Рис. 6. Динамика управляющего напряжения, параметров состояния поверхности и сигнала обратной связи

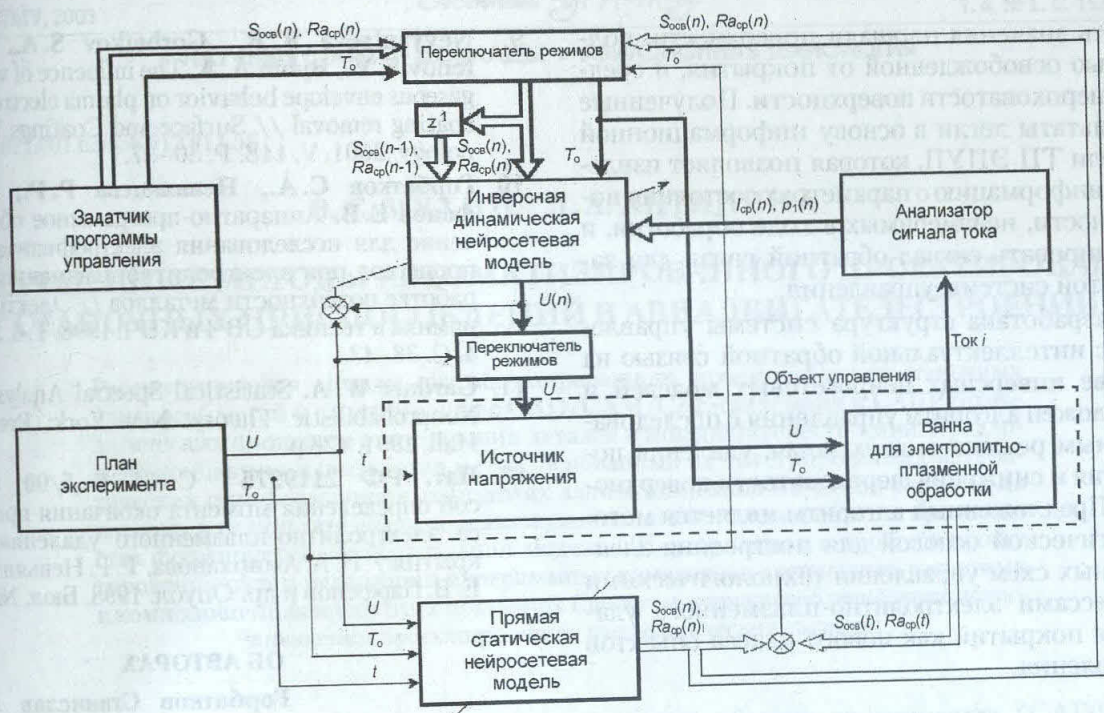


Рис. 7

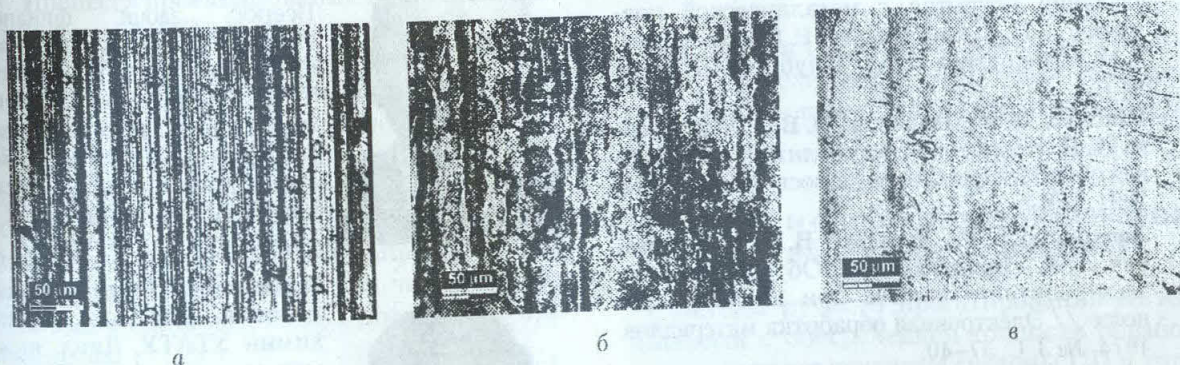


Рис. 8. Топография поверхности: а — исходная поверхность с покрытием из нитрида титана; б — «матовая» поверхность после обработки в течение 480 с; в — полированная поверхность после обработки в течение 840 с

связью, содержащую контур обучения и контур управления и определяющую место разработанных моделей и алгоритмов при создании АСУ ТП ЭПУП (рис. 7).

Закон изменения управляющего напряжения, рассчитанный по разработанному алгоритму, был апробирован с помощью созданного мощного управляемого источника напряжения для электролитно-плазменной обработки. Показано, что алгоритм программного управления напряжением с обратной связью позволяет управлять параметрами состояния поверхности в реальном масштабе времени и достигать требуемого состояния поверхности с погрешностью не более 10%.

На рис. 8 представлено изменение топографии поверхности в ходе обработки по пред-

ложенному алгоритму, свидетельствующее об эффективности его применения.

ВЫВОДЫ

Установлен механизм процесса электролитно-плазменного удаления покрытия из нитрида титана в зависимости от типа кипения в парогазовой оболочке. Выявленные закономерности положены в основу феноменологической модели, которая описывает физико-химические закономерности процесса и может быть использована для разработки алгоритмов идентификации и управления технологическим процессом.

Показано, что на основе измерения среднего значения тока и мощности колебаний тока на частоте 1 кГц возможно идентифици-

ровать значения площади поверхности, полностью освобожденной от покрытия, и средней шероховатости поверхности. Полученные результаты легли в основу информационной модели ТП ЭПУП, которая позволяет извлекать информацию о параметрах состояния поверхности, неизмеримых в ходе обработки, и формировать сигнал обратной связи для замкнутой системы управления.

Разработана структура системы управления с интеллектуальной обратной связью на основе инверсных нейросетевых моделей и предложен алгоритм управления с последовательным решением двух задач: удаления покрытия и снижения шероховатости поверхности. Предложенный алгоритм является методологической основой для построения электронных схем управления технологическими процессами электролитно-плазменного удаления покрытий как нового класса объектов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ 2081207 С 25 F 5/00. Способ удаления покрытия с металлической подложки / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Т. М. Тимергазина и др. Оpubл. 1997. Бюл. № 16.
2. Баковец В. В., Поляков О. В., Долговесова И. П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. Новосибирск: Наука, 1991. 168 с.
3. Лазаренко Б. Р., Дураджи В. Н., Факторович А. А., Брянцев И. В. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе // Электронная обработка материалов. 1974. № 3. С. 37–40.
4. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Dowe S. J. Plasma electrolysis for surface engineering. Review // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 122. P. 73–79.
5. Словещий Д. И., Терентьев С. Д., Плеханов В. Г. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 24, № 2. С. 353–363.
6. Лазаренко Б. Р., Дураджи В. Н., Брянцев И. В. О влиянии включения дополнительной индуктивности на характеристики анодного и катодного процессов // Электронная обработка материалов. 1979. № 5. С. 8–13.
7. Интеллектуальное управление производственными системами / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, Л. А. Исмаилова и др. М.: Машиностроение, 2001. 327 с.
8. Житников В. П., Зайцев А. Н. Математическое моделирование электрохимической размерной обработки. Уфа: УГАТУ, 1996. 222 с.

9. Nevyantseva R. R., Gorbatkov S. A., Parfenov E. V., Bybin A. A. The influence of vaporgaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal // Surface and Coatings Technology. 2001. V. 148. P. 30–37.
10. Горбатков С. А., Невьянцева Р. Р., Парфенов Е. В. Аппаратно-программное обеспечение для исследования электрофизических процессов при электролитно-плазменной обработке поверхности металлов // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. 1998. Т. 6, № 3–4. С. 38–43.
11. Gardner W. A. Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory. New York: Prentice Hall, 1991. 428 p.
12. Пат. РФ 2119975 С 25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Е. В. Парфенов и др. Оpubл. 1998. Бюл. № 28.

ОБ АВТОРАХ

Горбатков Станислав Анатольевич, проф., зав. региональн. каф. математики и информатики в Уфе. Всерос. заочн. финанс.-экономич. ин-та. Дипл. инж.-электромеханик (Томск, ТПИ, 1960). Д-р техн. наук по управлению в технических системах (МИЭМ, 1990). Исследования в области управления в технических и экономических системах.



Невьянцева Римма Рахимзяновна, доц. каф. общей химии УГАТУ. Дипл. инж.-металлург и физико-химик (Челяб. политехн. ин-т, 1965). Канд. хим. наук по неорганической химии (ИФП СО АН СССР, 1972). Исследования в области ремонта лопаток авиационных двигателей и удаления защитных покрытий.



Парфенов Евгений Владимирович, ст. преп. каф. теоретич. основ электротехники УГАТУ. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по автоматизации и управлению технологическ. процессами и производствами (УГАТУ, 2002). Исследования в области управления технологическ. процессами, цифровой обработки сигналов.

