

В. Р. Мукаева, Е. В. Парфенов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Исследована динамика изменения свойств поверхностного слоя в ходе электролитно-плазменного полирования стали 20X13. Выявлены значимые факторы, влияющие на состояние поверхностного слоя в ходе обработки. Разработаны эталонные математические модели с переменными параметрами для определения шероховатости поверхности, толщины съема поверхностного слоя и плотности тока в ходе электролитно-плазменного полирования. Предложенные модели могут применяться для реализации функций диагностики и контроля в составе автоматизированной системы управления технологическим процессом электролитно-плазменного полирования. *Электролитно-плазменное полирование; шероховатость; математическая модель с переменными параметрами; регрессионный анализ*

Метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) применяется при подготовке поверхности ответственных деталей энергетических машин из нержавеющей сталей перед нанесением защитных вакуумно-плазменных покрытий [1]. Технологический процесс ЭПП отвечает современным экологическим требованиям, позволяет обрабатывать поверхности металлов с высокой производительностью и обладает потенциалом для совершенствования [2].

Перед машиностроением стоит проблема повышения экологичности и производительности технологических процессов, при этом выпускаемая продукция должна удовлетворять современным требованиям качества. Применение автоматизированных систем управления технологическим процессом ЭПП, содержащих контуры диагностики свойств поверхности, неконтролируемых традиционными методами в ходе обработки, позволяет решать эту проблему. Анализ возможных методов диагностики состояния поверхности показывает, что наиболее перспективным является применение эталонных математических моделей, учитывающих текущие значения технологических параметров процесса.

Процесс электролитно-плазменного полирования характеризуется существенной сложностью и нелинейностью, так как на границе раздела «электролит – обрабатываемая поверхность» образуется парогазовая оболочка (ПГО), в которой протекают электроразрядные, электрохимические, плазмохимические, металлургические и гидродинамические процессы, интенсивно модифицирующие поверхностный

слой [3]. Теоретическая система уравнений, описывающая технологический процесс ЭПП, имеет значительную размерность и оказывается неразрешимой на текущем этапе исследования электролитно-плазменных процессов. Поэтому для построения математических моделей процесса ЭПП используются модели в виде черного ящика, построенные на основе экспериментальных исследований. Известна регрессионная модель процесса ЭПП [4], однако, она имеет существенный недостаток – отсутствие учета одного из значимых факторов – температуры электролита. Целью данного исследования является разработка математической модели процесса ЭПП образцов из стали 20X13 на основе регрессионного анализа, которая может выполнять функции диагностики и контроля в составе автоматизированной системы управления технологическим процессом.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на автоматизированной установке для изучения процессов электролитно-плазменной обработки с управлением от персонального компьютера. Процесс осуществлялся в 5 % водном растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. До и после обработки фиксировалась шероховатость поверхности образцов Ra, измеряемая с помощью профилометра 283, а также масса образцов, регистрируемая аналитическими весами A&D GR-200 с точностью 0,1 мг.

В качестве параметров, отражающих качество обработки, использовались: шероховатость поверхности Ra, мкм; толщина съема поверхностного слоя Δh , мкм. В качестве параметра, характеризующего ход процесса ЭПП, была выбрана плотность тока j , А/см².

Значение параметра Δh определялось по формуле:

$$\Delta h = \frac{(m_1 - m_2)}{\rho S}, \quad (1)$$

где m_1 и m_2 – масса образцов до и после обработки соответственно; $\rho = 7660 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали 20Х13 при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$; S – обрабатываемая площадь поверхности образца.

Значение плотности тока j рассчитывалось по формуле:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

где I – среднее значение тока.

Проводился полнофакторный эксперимент с четырьмя факторами: постоянное напряжение на электролизере (U); стабилизированная температура электролита (T); длительность обработки (t), исходная шероховатость поверхности 8 и 9 класса (Ra_0). Уровни варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

	U , В	T , $^\circ\text{C}$	Ra_0 , мкм	t , мин
max	350	90	0,63	15
шаг	50	20	0,31	3
min	250	70	0,32	0

Особенность эксперимента заключается в том, что по времени обрабатывался один и тот же образец, причем по достижении каждого уровня варьирования длительности обработки процесс прекращали, проводили измерения откликов и затем продолжали обработку.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По данным эксперимента установлены следующие особенности динамики процесса:

- значение шероховатости поверхности уменьшается экспоненциально со средней постоянной времени $\tau = 4,6$ мин и может быть аппроксимировано выражением (3);

- за 15 минут обработки была достигнута шероховатость поверхности Ra 0,06...0,10 и 0,10...0,20 мкм для исходной Ra_0 , равной 0,63 и 0,32 мкм соответственно;

- величина толщины съема поверхностного слоя линейно возрастает со средней скоростью 1,1 мкм/мин и может быть аппроксимирована выражением (4);

- при достижении шероховатости поверхности $Ra = 0,10$ мкм, величина Δh лежит в пре-

делах 12...22 и 8...14 мкм для исходной Ra_0 , равной 0,63 и 0,32 мкм соответственно;

- зависимость плотности тока j от времени не была отмечена, так как отклонение плотности тока от среднего значения при фиксированных условиях обработки в течение всей длительности эксперимента не превышает величины погрешности измерения, поэтому для аппроксимации данного параметра может быть использовано выражение (5);

- среднее значение плотности тока составляет $0,266 \text{ А/см}^2$ и зависит в наибольшей степени от напряжения на электролизере и температуры электролита.

$$Ra = A \cdot \exp(-t / \tau) + C; \quad (3)$$

$$\Delta h = v \cdot t, \quad (4)$$

$$j = \text{const}. \quad (5)$$

Установлено, что шероховатость изменяется по поверхности образца со стандартным отклонением 0,017 мкм. Для толщины съема поверхностного слоя и плотности тока стандартные отклонения составляют 0,79 мкм и $0,026 \text{ А/дм}^2$ соответственно.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методика моделирования предусматривает построение уравнений с переменными параметрами для описания динамики откликов (3–5). Рассмотрим блок-схему моделирования, представленную на рис. 1. Выходными данными блока моделей с переменными параметрами (МПП) являются значения оценок \hat{Ra} и $\hat{\Delta h}$ в заданные моменты времени. Значения оценок переменных параметров $\hat{A}, \hat{\tau}, \hat{C}, \hat{v}$ и плотности тока \hat{j} определяются блоком регрессионного моделирования (РМ) на основе результатов аппроксимации экспериментальных данных уравнениями (3)–(5) и управляются масштабированными значениями x_1, x_2, x_3 факторов U, T, Ra_0 соответственно.

Операция масштабирования (М) введена для выравнивания влияния факторов и анализа значимости коэффициентов регрессионных моделей и осуществляется по формуле:

$$x_i = \frac{X_i - \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}}{X_{i\max} - \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}}, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, 3$; значения X_1, X_2, X_3 соответствуют значениям U, T, Ra_0 соответственно.

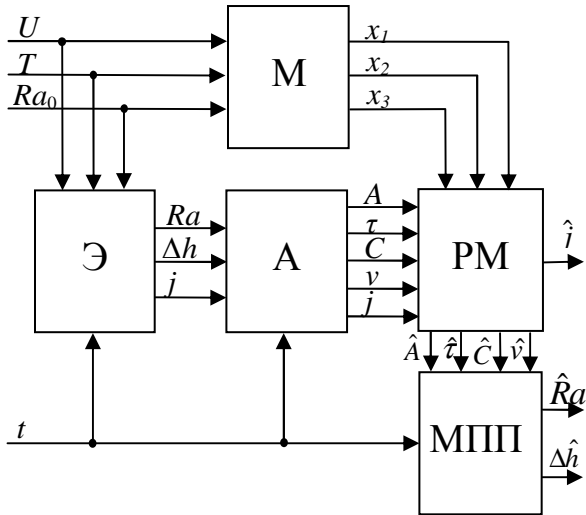


Рис. 1. Блок-схема моделирования: М – масштабирование; Э – эксперимент; А – аппроксимация; РМ – регрессионное моделирование; МПП – модель с переменными параметрами

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе результатов анализа значимости коэффициентов регрессионных моделей по критерию Стьюдента и оценки качества аппроксимации по коэффициенту детерминации R^2 , для расчета переменных параметров $\hat{A}, \hat{\tau}, \hat{C}, \hat{v}$ и плотности тока \hat{j} приняты следующие уравнения:

$$\hat{A} = b_{a0} + b_{a3}x_3; \tag{7}$$

$$\hat{\tau} = b_{\tau0} + b_{\tau1}x_1 + b_{\tau2}x_2 + b_{\tau3}x_3; \tag{8}$$

$$\hat{C} = b_{c0} + b_{c2}x_2 + b_{c3}x_3; \tag{9}$$

$$\hat{v} = b_{v0} + b_{v1}x_1 + b_{v2}x_2 + b_{v3}x_3 + b_{v4}x_1x_2; \tag{10}$$

$$\hat{j} = b_{j0} + b_{j1}x_1 + b_{j2}x_2. \tag{11}$$

Анализ регрессионных моделей переменных параметров A, τ, C, v и плотности тока j показывает, что:

- максимальное снижение шероховатости A прямо пропорционально начальной шероховатости образца (рис. 2);
- постоянная времени τ увеличивается с ростом напряжения, температуры и начальной шероховатости (рис. 3);
- предельно достижимая шероховатость C увеличивается с ростом начальной шероховатости и температуры (рис. 4);

- скорость съема поверхностного слоя v снижается с ростом напряжения, температуры и начальной шероховатости (рис. 5);
- зависимость скорости съема поверхностного слоя от напряжения и температуры нелинейна из-за значимого парного взаимодействия данных факторов;
- величина плотности тока j линейно уменьшается с ростом напряжения и температуры.

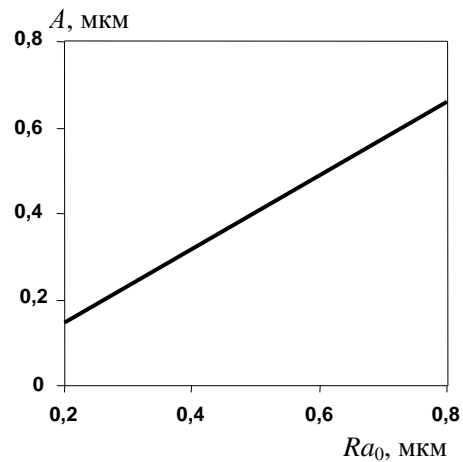


Рис. 2. Зависимость предельного снижения шероховатости от исходной шероховатости

Результаты математического моделирования с помощью моделей (3)–(4) с переменными параметрами (7)–(10) для шероховатости поверхности Ra и толщины съема поверхностного слоя Δh представлены на рис. 6–7 соответственно. Зависимость плотности тока j от напряжения и температуры электролита (11) приведена на рис. 8. Выявлено, что в моделируемом диапазоне условий обработки:

- шероховатость поверхности достигает наименьшего значения $Ra = 0,07$ мкм при $U = 250$ В и $T = 70$ °С;
- наименьшее значение толщины съема поверхностного слоя $\Delta h = 9$ мкм за 15 минут обработки достигается при $U = 350$ В и $T = 90$ °С;
- вольтамперная характеристика процесса ЭПП как электрической нагрузки нелинейна, а рабочий участок находится в области положительной статической проводимости порядка 1 мСим/см² и отрицательной динамической проводимости порядка минус $0,25$ мСим/см².

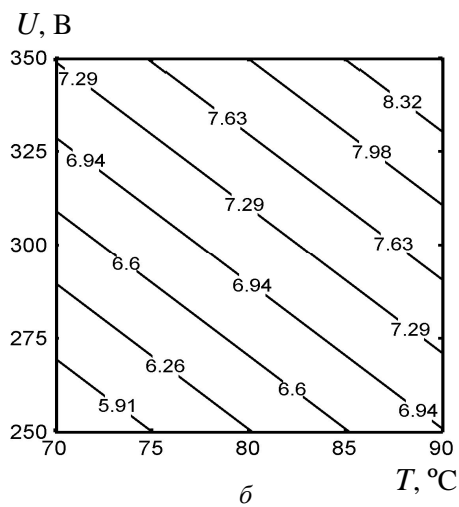
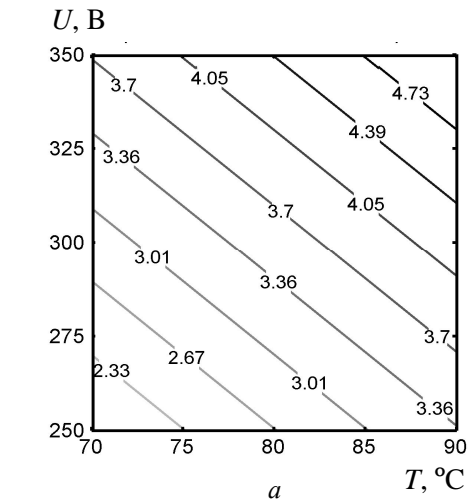


Рис. 3. Зависимость постоянной времени τ , мин от напряжения и температуры электролита при исходной шероховатости: $a - 0,32$ мкм; $b - 0,63$ мкм

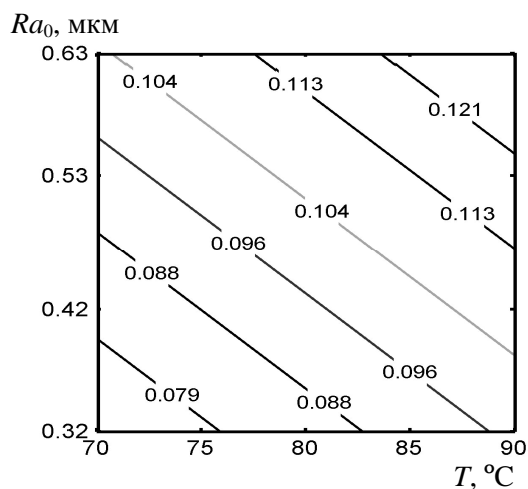


Рис. 4. Зависимость предельно достижимой шероховатости S , мкм от исходной шероховатости и температуры электролита

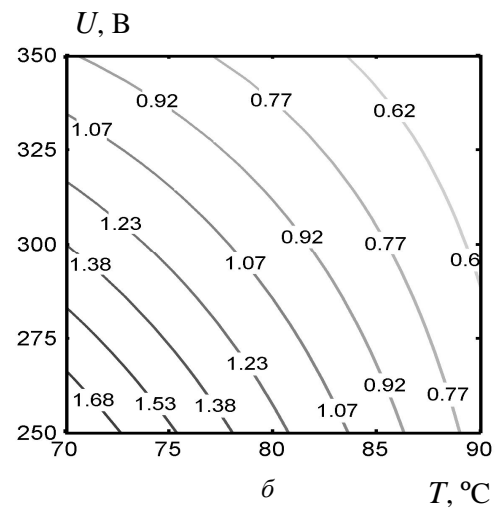
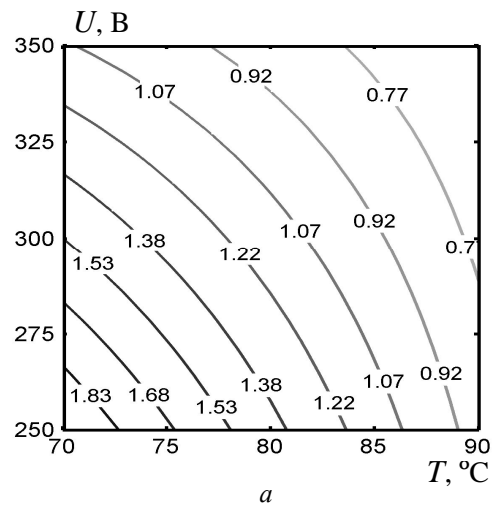


Рис. 5. Зависимость скорости съема поверхностного слоя v , мкм/мин от напряжения и температуры электролита при исходной шероховатости: $a - 0,32$ мкм; $b - 0,63$ мкм

Для проверки адекватности регрессионных моделей была проведена проверка гипотезы о близости к нулю математического ожидания остатков с использованием критерия Стьюдента t_e , проведена проверка гипотезы о статистической значимости всего уравнения регрессии в целом согласно критерию Фишера – Снедекора F , рассчитан коэффициент детерминации R^2 [5].

По результатам всех проведенных проверок разработанные модели адекватны. Значения коэффициентов уравнений регрессии и статистических критериев представлены в табл. 2.

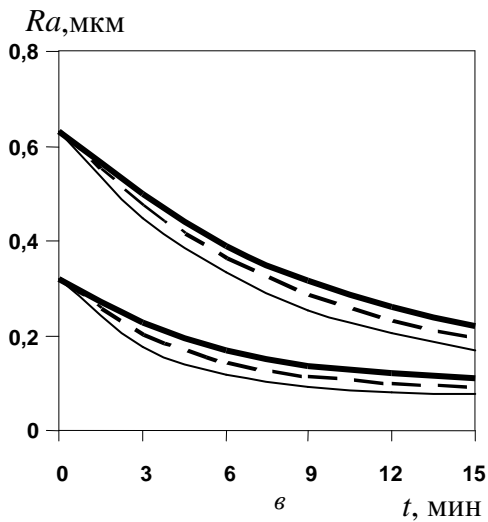
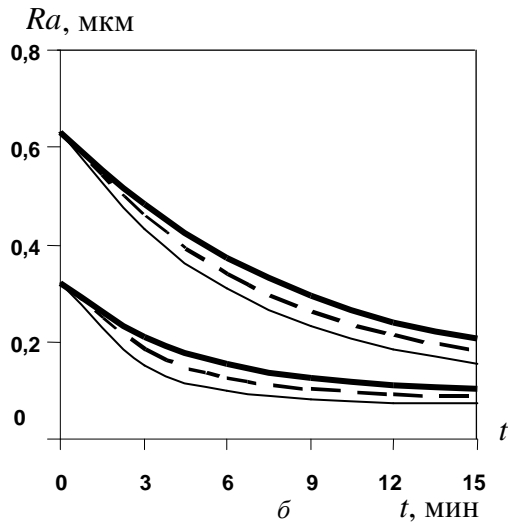
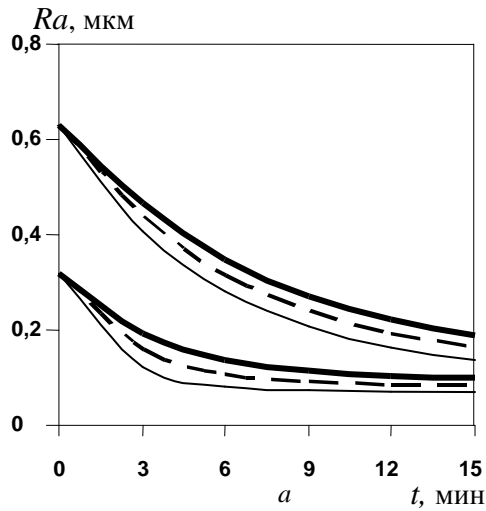


Рис. 6. Динамика шероховатости поверхности при температуре электролита 70(—), 80(--), 90(—) °С исходной шероховатости 0,32 и 0,63 мкм и напряжениях: $a - 250$; $b - 300$; $v - 350$ В

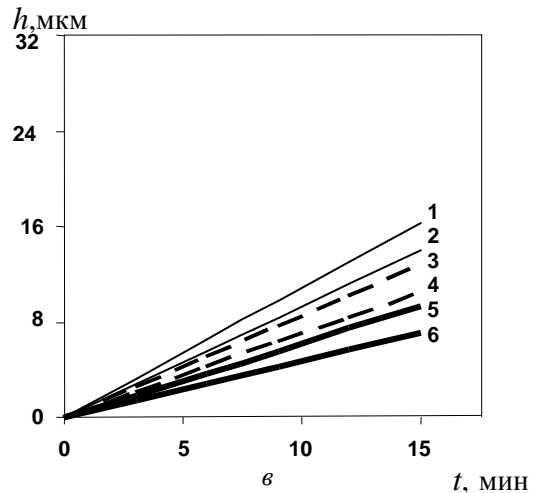
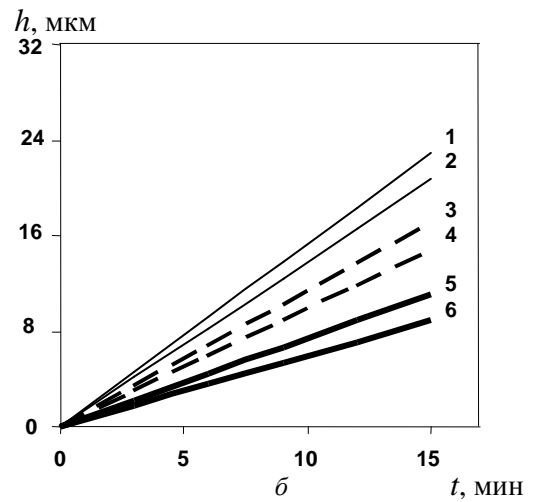
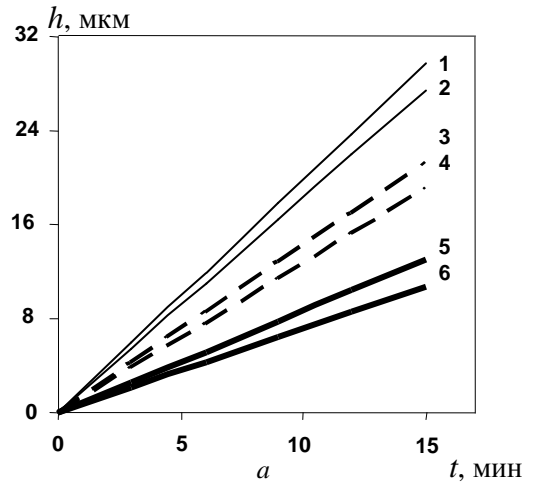


Рис. 7. Динамика толщины съема поверхностного слоя при температуре электролита 70 (—), 80 (--), 90 °С (—) и напряжениях: $a - 250$; $b - 300$; $v - 350$ В; прямые 1, 3, 5 соответствуют $Ra_0 = 0,32$ мкм; прямые 2, 4, 6 соответствуют $Ra_0 = 0,63$ мкм

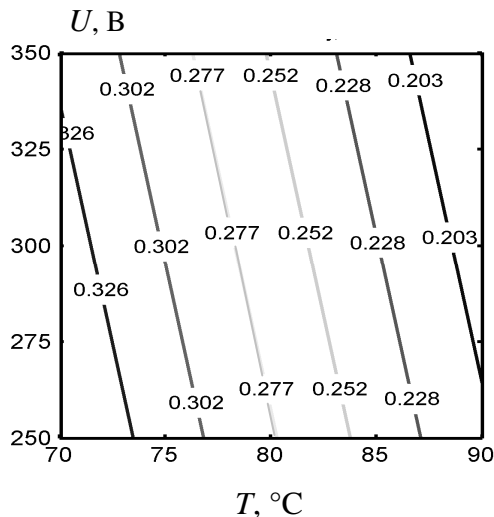


Рис. 8. Зависимость плотности тока j , А/см² от напряжения и температуры электролита

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из рис. 6, снижение шероховатости поверхности в ходе ЭПП носит экспоненциальный характер. Это может объясняться тем, что остроугольная форма микронеровностей в начале обработки приводит к высокой напряженности электрического поля вблизи микровыступов и активному образованию и воздействию на них пузырьков ПГО. С течением времени микронеровности сглаживаются, напряженность электрического поля становится более однородной, степень воздействия ПГО снижается вместе со скоростью полирования.

Толщина съема поверхностного слоя Δh в ходе ЭПП возрастает линейно за счет равно-

мерности процесса и отсутствия образования плотной оксидной пленки на поверхности. Уменьшение эффективной площади обрабатываемой поверхности вследствие сглаживания ее шероховатости не оказывает значительного влияния на динамику роста Δh , в отличие от начальной шероховатости поверхности Ra_0 . При меньших значениях Ra_0 площадь соприкосновения обрабатываемой металлической поверхности с электролитом больше, что приводит к увеличению анодного растворения поверхностного слоя. Для толщины съема поверхностного слоя оценка выхода по току составляет 20–32% от величины анодного растворения по закону Фарадея [6]. Такие значения объясняются, во-первых, наличием сухого пятна при пузырьковом кипении, во-вторых, эмиссией электронов в плазму разряда с поверхности электролитного катода и появлению тока проводимости, который, в отличие от тока переноса в электролите, не приводит к анодному растворению поверхностного слоя.

Значение плотности тока не изменяется во времени в условиях стабилизации температуры электролита и напряжения источника. Влияние исходной шероховатости поверхности на величину плотности тока пренебрежительно мало. Это свидетельствует о том, что изменение толщины парогазовой оболочки из-за изменения распределения напряженности на полируемой поверхности незначительно по сравнению со средней толщиной ПГО.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений регрессии и значения статистических критериев

Коэффициенты	Модель 1 (Ra)			Модель 2 (Δh)	Модель 3 (j)
	A	τ	C	ν	j
b_0	0,37649	5,3235	0,1003	1,0616	0,26468
b_1	–	0,8703	–	-0,2858	-0,014424
b_2	–	0,6786	0,0132	-0,3948	-0,072061
b_3	0,14428	1,7933	0,0159	-0,0751	–
b_4	–	–	–	0,1634	–
R^2 параметров	0,99	0,97	0,95	0,99	–
R^2 для МПП	0,99			0,99	0,99
Критерий Стьюдента t_e	0,0006	0,03	0,0004	1,51	0,21
Табличное значение $t_e(\alpha, \xi)$	2,1(0,95;16)	2,1(0,95;14)	2,1(0,95;15)	2,1(0,95; 13)	2,1(0,95;15)
Критерий Стьюдента t_e для МПП	0,09			3,2	0,21
Табличное значение $t_e(\alpha, \xi)$	2(0,95;82)			3,4(0,99;86)	2,1(0,95;15)
Критерий Фишера F	57,43			33,97	208,04
Табличное значение $F_T(\alpha; \xi_1; \xi_2)$	1,8(0,95;8;82)			2,5(0,95;4;86)	3,1 (0,95;2;98)

α – уровень значимости, ξ – число степеней свободы

ВЫВОДЫ

На основе экспериментальных методов исследования выявлены закономерности изменения шероховатости поверхности, толщины съема поверхностного слоя и плотности тока в ходе электролитно-плазменного полирования. Установлено, что значимыми факторами, определяющими качество обработки, являются среднее значение напряжения на электролизере, температура электролита и начальная шероховатость поверхности.

Разработаны математические модели с переменными параметрами, связывающие входные параметры: напряжение на электролизере, температуру электролита, начальную шероховатость поверхности и длительности обработки с выходными параметрами: шероховатостью поверхности, толщиной съема поверхностного слоя детали и плотностью тока. Полученные модели могут использоваться в составе автоматизированных систем управления технологическим процессом ЭПП качестве эталонных для выполнения функций диагностики и контроля свойств поверхности в ходе обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процесс электролитно-плазменной обработки деталей ГТД с предварительным формированием парогазовой оболочки / М. К. Смылова [и др.] // Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий: сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2008.

2. Куликов И. С., Ващенко С. В., Камнев А. Я. Электролитно-плазменная обработка материала. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.

3. Белкин П. Н. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Мир, 2005. 336 с.

4. Локтев Д. Е., Ушомирская Л. А., Новиков В. И. Исследование параметров электролитно-плазменного полирования низколегированной стали методом планирования полного факторного эксперимента // Металлообработка. 2009. № 5. С. 15–18.

5. Протасов К. В. Статистический анализ экспериментальных данных. М.: Мир, 2005. 232 с.

6. Мукаева В. Р., Парфенов Е. В., Тимофеев А. О. Электрохимические аспекты электролитно-плазменного полирования стали 20Х13 // Науч. тр. Рос. молодеж. науч. конф. Екатеринбург: Изд-во Уральск. ун-та, 2010. С. 175–176.

ОБ АВТОРАХ

Мукаева Вета Робертовна, инженер каф. теоретическ. основ электротехники. Дипл. магистр по инф. измерительн. технике и технологии (УГАТУ, 2011). Иссл. в области диагностики и моделир. технол. проц.

Парфенов Евгений Владимирович, докторант, доц. той же каф. Дипл. инженер по промышл. электронике (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по автоматизации и управлению технологическ. процессами и производствами (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. управления технологическ. процессами электролитно-плазменной обработки, цифровой обработки сигналов