

ПЛАНИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИРОВКЕ

Аннотация. В статье рассмотрен статистический метод построения математической модели электролитно-плазменной полировки (ЭПП) трубной заготовки по плану Бокса-Бенкина. Разработана модель электролитно-плазменной полировки для конструкционной стали Ст3. Выведена зависимость конечной шероховатости поверхности при ЭПП от основных факторов, влияющих на ход процесса. По выведенной зависимости построены поверхности отклика исследуемого параметра от факторов эксперимента.

Ключевые слова. Электролитно-плазменная полировка, шероховатость, плотность тока, напряжение, время обработки, план Бокса-Бенкина.

Актуальность. Для получения требуемого качества поверхностного слоя деталей существует целый ряд различных методов обработки, в том числе электрохимическое, химическое, механическое полирования, однако, получить заданную шероховатость поверхности трудно, дорогостояще, а зачастую затруднительно, особенно используя экологически чистые методы обработки материалов [1]. В этом отношении электролитно-плазменное полирование является высокоэффективным процессом обработки изделий из токопроводящих материалов в нетоксичных средах, имеющих более высокие экологические и экономические показатели. Наиболее близким, по получаемым параметрам качества обрабатываемой поверхности и технологическому оснащению, к ЭПП является электрохимическое полирование, но в отличие от него, в электролитно-плазменной технологии используются экологически безопасные водные солевые растворы, которые в несколько раз дешевле токсичных кислотных компонентов. Однако, отсутствие в литературе зависимостей изменения качества обрабатываемой поверхности от параметров процесса ЭПП и диапазона рациональных режимов обработки конструкционных сталей затрудняет

разработку технологических процессов с применением метода ЭПП и установлении режимов работы оборудования.

Целью работы является моделирование процесса ЭПП, для определения рациональных режимов обработки, получения заданной шероховатости, повышения качества поверхности и снижения энергозатрат технологического процесса.

Методика экспериментов. Эксперименты проводились на разработанной установке с дистанционным управлением процесса ЭПП (рис. 1). В качестве исследуемых образцов использовалась трубная заготовка Ш20х1.15 длиной 6 мм из конструкционной стали марки Ст3 с исходной шероховатостью $Ra=0.8$ мкм. Полировка осуществлялась в диапазоне рабочих напряжений $U=280-380$ В; при плотности тока $J=0,2-0,3$ А/см²; в 3%-ом водном растворе $(NH_4)_2SO_4$; температура электролита поддерживалась постоянной $t_e=90-95$ °С. Параметры шероховатости и металлографические исследования осуществлялись с помощью бесконтактного интерференционного 3-D профилографа «Micron-alpha». Моделирование процесса ЭПП осуществлялось по трехфакторному плану Бокса-Бенкина. Полученные результаты обрабатывались вероятностно-статистическим методом с использованием программ MICROSOFT Excel 2007 и модуля STATISTICA 10.

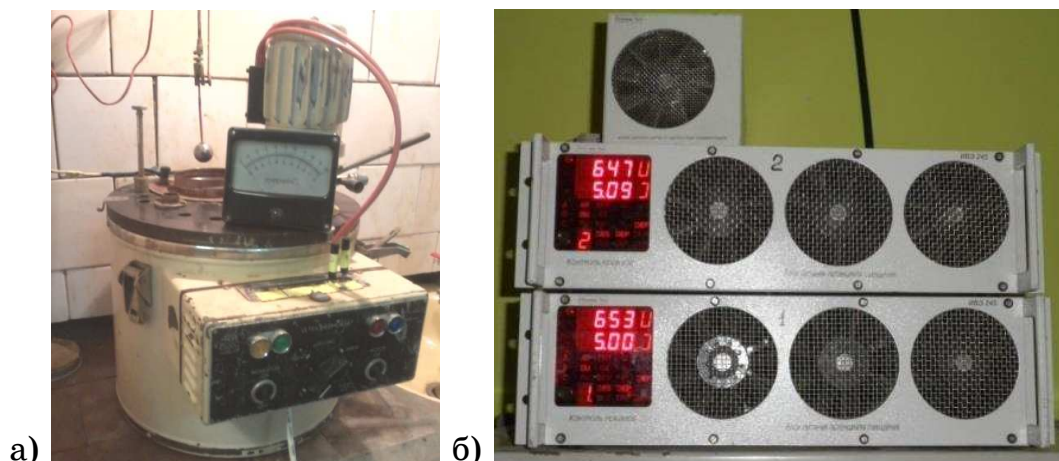


Рисунок 1 – Экспериментальная электролитно-плазменная установка:

а) Общий вид установки без блока питания;

б) Блок питания для установки ЭПП

В качестве параметра, отражающего качество заготовки использовалась шероховатость поверхности Ra , мкм. В качестве параметров, характеризующих ход процесса ЭПП, были выбраны: время

обработки T , с; постоянное напряжение U , В и плотность тока j , А/см².

К реализации принимается D-оптимальный план Бокса-Бенкина размерности $K = 3$, позволяющий провести математико-статистическую обработку данных при варьировании трех компонентов на трех уровнях. D-оптимальные планы обеспечивают минимальный объем эллипсоида рассеивания оценок параметров, минимизируют максимальную дисперсию в заданной области плана, обладают свойством рототабельности и имеют наименьший определитель ковариационной матрицы. Свойство рототабельности сводится к тому, что точки матрицы планирования подбираются с обеспечением одинаковой точности предсказания значений функций отклика и независимости от направления исследования.

Общее число опытов по плану Бокса-Бенкина для $K = 3$ составляет:

$$N_{\text{общ}} = N + N_o = 12 + 3 = 15 \quad (1)$$

где N_o - число опытов в центре плана.

Уравнение регрессии в общем случае имеет вид:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Коэффициенты регрессии были рассчитаны по расчетной матрице плана Бокса-Бенкина.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования фактора		
			Верхний	нулевой	Нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
Напряжение	X1	В	380	340	300
Время обработки	X2	Мин	6	4,5	3
Плотность тока	X3	А/см ²	0,3	0,25	0,2

В результате проведения трехуровневого, трехфакторного эксперимента показано улучшение шероховатости на 2-3 класса. Профи-

лограммы и топография поверхности исследуемых образцов показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

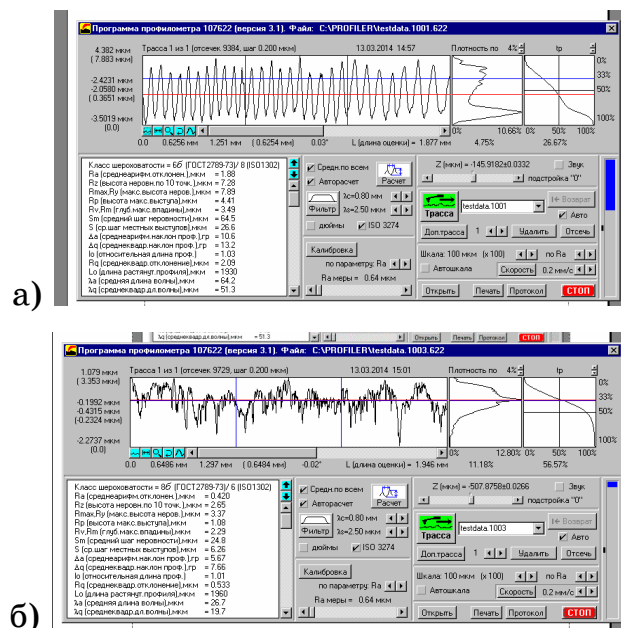


Рисунок 2 – Профилограмма поверхности:

а) – до обработки; б) - после ЕПП

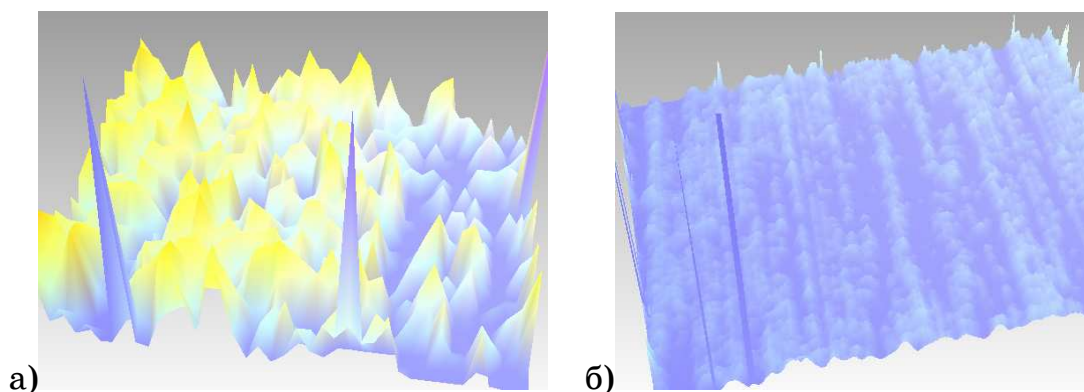


Рисунок 3 – Топография поверхности образца:

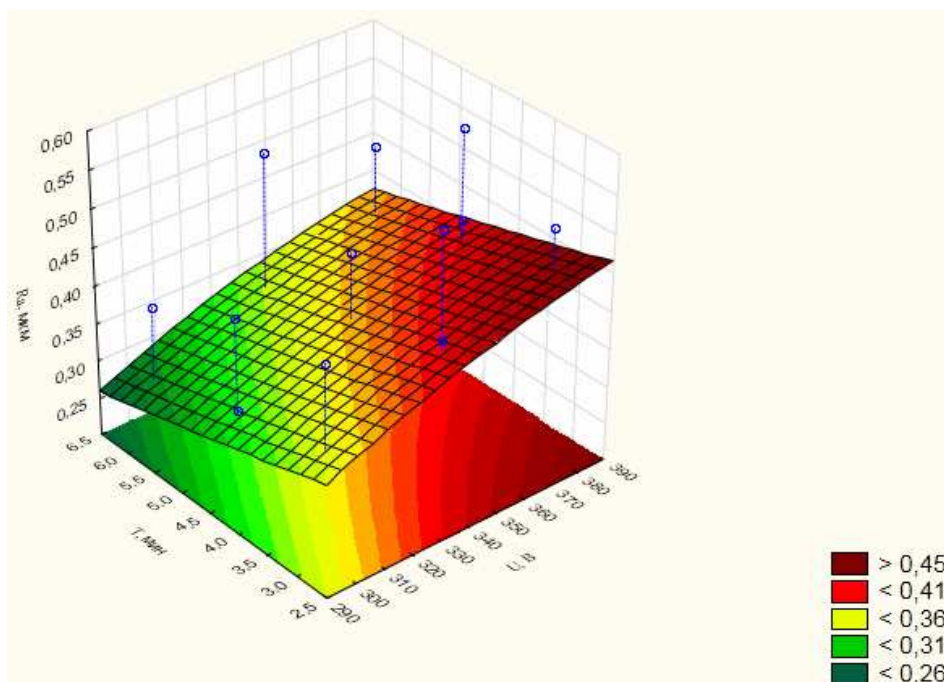
а) – до обработки; б) – после обработки

После обработки экспериментальных данных была получена следующая математическая зависимость:

$$Y = 0,46 + 0,0463x_1 - 0,034x_2 + 0,075x_3 - 0,01125x_3^2 + 0,0125x_1x_2 + 0,02x_2x_3 \quad (3)$$

При этом средняя ошибка опыта составила $\varepsilon_{cp} = 0,000384\%$, а максимальная $\varepsilon_{max} = 0,262\%$. Адекватность полученной математической модели проверена при помощи F-критерия Фишера. В соответствии с полученной математической моделью, построены поверхности функ-

ции отклика (рис. 4–6). Поверхность отклика, полученная уравнением (3), представляет не что иное как пятимерный параболоид.



Рисцунок 4 - Поверхность функции отклика при варьировании параметрами: U (X_1) – рабочее напряжение; T (X_2) – время обработки при фиксированном значении $J = 0.25 \text{ А/см}^2$ (центр эксперимента)

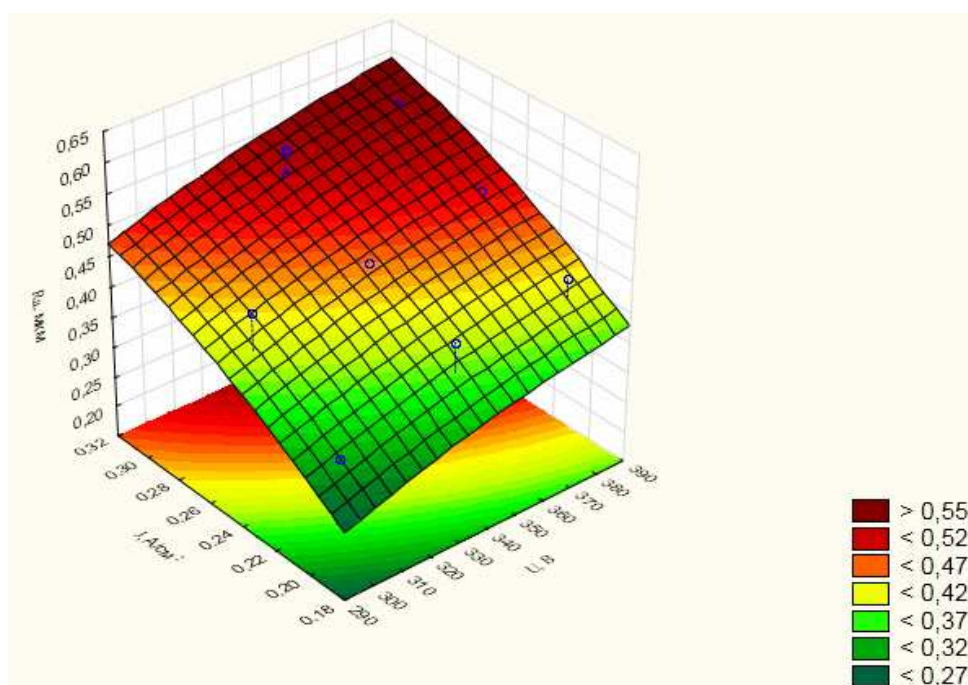


Рисунок 5 - Поверхность функции отклика при варьировании параметрами: J (X_3) – плотность тока; U (X_1) – рабочее напряжение при фиксированном значении $T = 4,5$ мин (центр эксперимента)

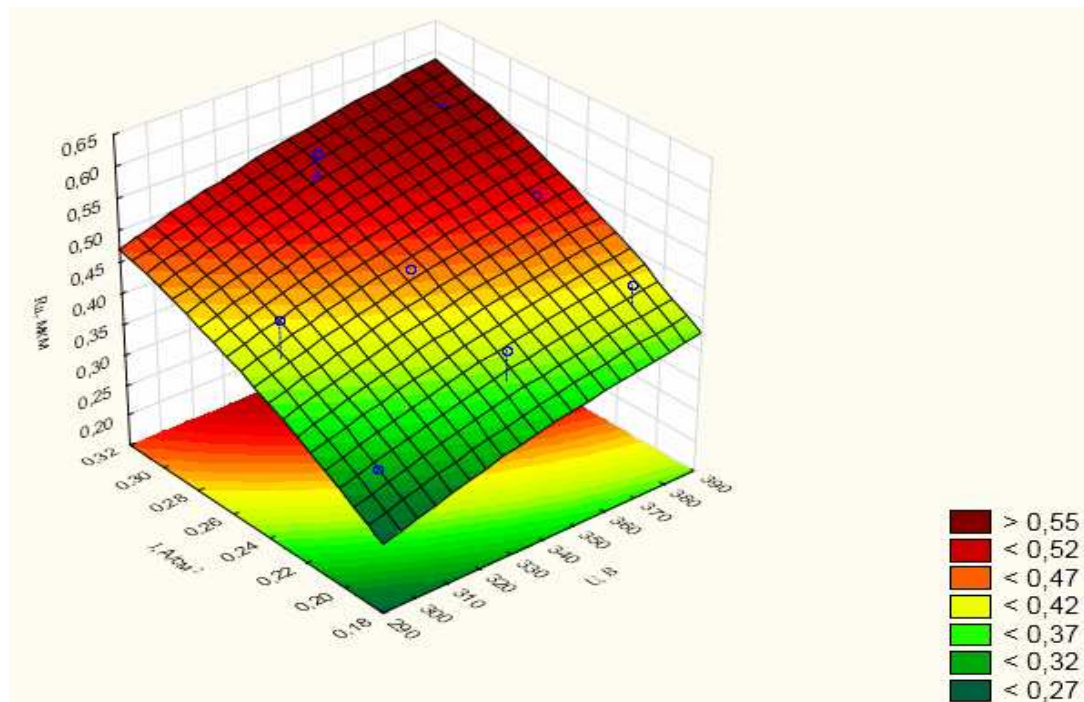


Рисунок 6 - Поверхность функции отклика при варьировании параметрами: J (X_3) – плотность тока; U (X_1) – рабочее напряжение при фиксированном значении $T = 4,5$ мин (центр эксперимента)

Анализируя поверхности функции отклика и полученную математическую зависимость, можно сделать вывод, что на эффективность снижения шероховатости исследуемые параметры влияют неоднозначно. Существенная зависимость на исследуемый критерий Y наблюдается от влияния плотности тока J , заметное воздействие оказывает рабочее напряжение U , и менее значительное влияние оказывает время обработки, что полностью подтверждает проведенные теоретические исследования. Полученное уравнение дает основание для отработки параметров рациональной настройки предлагаемого устройства по критерию повышение эффективности его работы.

Располагая общим видом зависимости эффективности работы от параметров настройки устройства (3), рациональные значения U , J , T находим как решение системы трех уравнений, представляющих собой частные производные по dU , dT , dJ . В результате решения системы уравнения методом Крамера определили условия, при которых установка, для получения необходимой шероховатости $Ra = 0.25$, работает наиболее эффективно:

$$U = 300 \text{ В}, T = 6 \text{ мин}, J = 0.2 \text{ А/см}^2$$

Выводы. В результате активного эксперимента по трехфакторному плану Бокса-Бенкина построена математическая модель процесса электролитно-плазменного полирования, подтвержденная экспериментально.

1. Применение модели позволило выбрать рациональный режим ЭПП с параметрами $U = 300\text{В}$, $T = 6\text{мин}$, $J = 0.2\text{А/см}^2$ для получения конечной шероховатости $Ra = 0.25$ мкм трубы из стали Ст3 с начальной шероховатостью $Ra = 1.0$ мкм.

2. Экспериментально доказано эффективность использования модели для повышения качества поверхности и снижения энергозатрат по сравнению с традиционными методами обработки путем выбора рациональных режимов ЭПП в технологическом процессе полировки труб из стали Ст3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. — 3-е изд. — М.: «Диалектика», 2007. — С. 912.
2. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. — Минск: Беларуская наука, 2010. — 232 с.
3. Патент РФ № 2268326 С25 F 7/00. Установка электролитно-плазменного полирования / Р. Г. Касимов, В. Н. Горяйнов, А. О. Балахнин. — Оpubл. 20.01.2006
4. Сафьян П.П., Тутык В.А., Чигиринец Е.Э. Пароплазменный разряд как метод повышения коррозионной стойкости внутренней поверхности труб // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2012. - № 9. — С.751-756.
5. Патент України на корисну модель UA 84917 МПК7 С23 G5/00-Спосіб електронно променевого очищення внутрішньої та / або зовнішньої поверхні труб.- Тутык В.А., Масляний М.В., Наддтока В.М., Литвиненко О.Г., Дейнеко Л.М., Масленіков Д.В.- Оpubл.. грудень 2013.