

Бойко А.Ф., д-р тех. наук, проф.,
Пузачева Е.И., ст. преп.,
Жуков Е.М., канд. тех. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКЕ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОИЗНОСНОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ В РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ

E_Puzacheva@mail.ru

В статье изложены результаты исследований зависимости шероховатости обработанной поверхности при электроэрозионной прошивке малых отверстий от энергии импульсов и индуктивности высокой добротности в разрядной цепи генератора импульсов. Установлено, что шероховатость поверхности в большей степени зависит от величины индуктивности, причем, эта связь обратная. От энергии импульсов зависимость прямая и относительно меньшая. Получена интерполяционная модель зависимости шероховатости от энергии импульсов и величины индуктивности, которая позволяет найти оптимальные режимы обработки.

Ключевые слова. Электроэрозионная обработка, износ электрода, индуктивность, шероховатость поверхности.

Качество поверхности отверстий малого диаметра, полученных электроэрозионной прошивкой, оценивают ее шероховатостью и физико-химическими изменениями поверхностного слоя. Именно эти свойства, во многих случаях, определяют эксплуатационные показатели обрабатываемых деталей, и поэтому их исследование представляется важным как с научной, так и с практической стороны.

В работе [1] установлено, что, так как при электроэрозионной прошивке малых отверстий используют импульсы электрического тока малых энергий (от единиц до сотен микроджоулей), то дефектный слой от физико-химических изменений в поверхностном слое несущественен. Поэтому в данной работе исследовалась зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra от энергии импульсов E и величины индуктивности L высокой добротности в разрядной цепи генератора импульсов, а так же анализировался эффект взаимодействия этих двух факторов E и L . В работе [2] таких исследований не проводилось, так как использовался генератор коротких биполярных пик – импульсов без дополнительной индуктивности в разрядной цепи.

Исследования проводились на модернизированном электроэрозионном станке модели 04ЭП-10МФ2, в качестве рабочей жидкости использовалась обычная водопроводная вода, в качестве образцов использовались квадратные прутки 5x5x15мм из нержавеющей стали X18H10T, рабочие поверхности которых отполировывались до шероховатости не хуже $Ra = 0,05-0,08$ мкм. Необходимость высокого класса исходной шероховатости поверхности перед электроэрозионной обработкой объясняется

необходимостью исключения влияния технологического наследия (микронеровностей) обрабатываемой поверхности на результаты эксперимента. Электроды-инструменты для экспериментов для экспериментов изготавливались из вольфрамовых пластин, рабочая поверхность которых так же отполировывалась. Полученная шероховатость замерялась на профилографе-профилометре АБРИС ПМ-7 в трех сечениях. Находилось среднее значение шероховатости. Перед замером прибор откалибровывался с помощью прилагаемого образца шероховатости. Отклонение при этом не превышало 0,5%. В соответствии с выбранными факторами: энергии импульсов E и величина индуктивности L , в качестве исходной математической модели была выбрана следующая зависимость:

$$Ra = C \cdot E^\alpha \cdot L^\beta \quad (1)$$

Для определения постоянных параметров модели C, α, β была проведена серия экспериментов с использованием метода математического планирования эксперимента [3]. Ниже приведены результаты исследований.

В эксперименте были приняты следующие условия (табл. 1)

Таблица 1

Уровни факторов	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов	
	E , мкДж	L , мкГн	x_1	x_2
верхний	1282,05	8,21	+1	+1
средний	351,1	3,51	0	0
нижний	96,15	1,5	-1	-1

Исходная математическая модель (1) в результате логарифмирования линеаризуется и приводится к виду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (2)$$

где $y = \ln Ra$, $y = \ln C$, $b_1 = \alpha$, $b_2 = \beta$, x_1 и x_2 – кодированные значения факторов.

$$x_1 = \frac{2(\ln E - \ln E_{\max})}{\ln E_{\max} - \ln E_{\min}} + 1 = 0,7721 \ln E - 4,5254, \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln L - \ln L_{\max})}{\ln L_{\max} - \ln L_{\min}} + 1 = 1,1765 \ln L - 1,4770, \quad (4)$$

Натуральные значения факторов среднего уровня (см.таблицу1) определялись по формулам:

$$E_{cp} = e^{0,5(\ln E_{\max} + \ln E_{\min})} = 351,1 \text{ мкДж}$$

$$L_{cp} = e^{0,5(\ln L_{\max} + \ln L_{\min})} = 3,51 \text{ мкГн}$$

Для определения взаимного влияния факторов x_1 и x_2 и возможного повышения точности

Кодирование переменных x_1 и x_2 осуществлялась по следующим уравнениям преобразования:

математической модели (2) результаты опытов представим полиномом вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2, \quad (5)$$

где b_{12} – коэффициент взаимодействия факторов x_1 и x_2 .

Для определения коэффициентов уравнения (5) был проведен полнофакторный эксперимент типа 2^2 . Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в табл.2.

Таблица 2

№ опыта	Натуральные значения факторов		Кодированные обозначения факторов				\check{y}_j
	E, мкДж	L, мкГн	x_0	x_1	x_2	x_{12}	
1	1282,05	8,21	+1	+1	+1	+1	-0,1650
2	96,15	8,21	+1	-1	+1	-1	-0,7549
3	1282,05	1,5	+1	+1	-1	-1	0,3516
4	96,15	1,5	+1	-1	-1	+1	-0,1852

В данном эксперименте для компенсации влияния случайных погрешностей и повышения точности математических моделей было применено равномерное дублирование опытов. При этом все строки матрицы планирования имели одинаковое число параллельных опытов $n = 3$. Обработка результатов эксперимента проводилась в следующей последовательности:

1. Для каждой строки матрицы планирования по результатам n параллельных опытов вычисляем среднее арифметическое значение \check{y}_j выходного параметра:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}, \quad (6)$$

где u – номер параллельного опыта; y_{ju} – значение выходного параметра в u – том параллельном опыте j – той строки матрицы.

2. С целью оценки отклонений экспериментальных значений выходного параметра от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования вычисляем дисперсию σ_j^2 опыта по данным n параллельных опытов:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2, \quad (7)$$

Результаты расчетов по пунктам 1-2 приведены в таблице 3.

Таблица 3

Вспомогательная таблица для расчета дисперсий σ_j^2

№опыта	Ra, мкм	$y_{ju} = \ln Ra$	\check{y}_j	$(y_{ju} - \check{y}_j)^2$	σ_j^2
1	0,854	-0,1578	-0,1650	0,00005184	0,00039609
	0,829	-0,1875		0,00050625	
	0,861	-0,1497		0,00023409	
2	0,461	-0,7744	-0,7549	0,00038025	0,003884215
	0,504	-0,6852		0,00485809	
	0,447	-0,8052		0,00253009	
3	1,464	0,3812	0,3516	0,00087616	0,000796665
	1,417	0,3485		0,00000961	
	1,384	0,3250		0,00070756	
4	0,807	-0,2144	-0,1852	0,00085264	0,002667525
	0,806	-0,2157		0,00093025	
	0,882	-0,1256		0,00355216	

3. Проверяем гипотезу однородности четырех дисперсий (см. табл.3) с помощью G – критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии σ_2^2 к сумме всех дисперсий. Расчетное значение критерия:

$$G_p = \frac{\sigma_{\max}^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = 0,5015,$$

Расчетное значение критерия сравниваем с табличным $G_T = 0,7679$ [2], определенном при 5% уровне значимости по числу степеней свободы $f = n-1$ и числу сравниваемых дисперсий $N=4$. Так как $G_p < G_T$, то дисперсии однородны, а исследуемая величина y подчиняется нормальному закону.

4. Вычисляем дисперсию воспроизводимости σ_y^2 эксперимента:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 = 0,001936,$$

где N – число строк матрицы планирования.

5. По результатам эксперимента (см. табл.2) определяем коэффициенты уравнения (5):

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j = -0,1884;$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_1 = 0,2817;$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_2 = -0,2716;$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_1 \cdot x_2 = 0,0133;$$

где y_j – значение выходного параметра в j – том опыте эксперимента из $N = 4$ опытов; x_1, x_2 – кодированные значения факторов по матрице планирования.

Тогда уравнение регрессии примет вид:

$$y = -0,1884 + 0,2817 \cdot x_1 - 0,2716 \cdot x_2 + 0,0133 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (8)$$

6. Для статистической оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии (8) определяем дисперсии коэффициентов регрессии:

$$\sigma^2 \{b_i\} = \frac{1}{nN} \sigma_y^2 = 0,000161333,$$

7. Устанавливаем величину доверительного интервала коэффициента регрессии:

$$\Delta b_i = \pm t_T \sigma \{b_i\} = \pm 0,0292,$$

где $t_T = 2,3$ – табличное значение t – критерия Стьюдента [2] при принятом 5% уровне значимости и числе степеней свободы f , с которым определялась дисперсия σ_y^2 ; при равномерном дублировании опытов $f = (n-1)N = 8$;

$\sigma \{b_i\} = +\sqrt{\sigma^2 \{b_i\}} = 0,0127$, - ошибка в определении i – го коэффициента регрессии.

8. Проверяем статистическую значимость коэффициента регрессии. Коэффициенты b_0, b_1, b_2 по абсолютной величине больше доверительного интервала, следовательно, они значимы, коэффициент $b_{12} < \Delta b_i$, следовательно, он не значим, поэтому член регрессии, характеризующий эффект взаимодействия, исключается из уравнения. Тогда уравнение регрессии примет вид:

$$y = -0,1884 + 0,2817 \cdot x_1 - 0,2716 \cdot x_2, \quad (9)$$

9. Для оценки точности математической модели определяем дисперсию адекватности по формуле:

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{n}{f} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2 = 0,002115,$$

где \bar{y}_j – расчетное значение выходного параметра, вычисленное по модели (9); $f = N - (k+1) = 1$ – число степеней свободы, $k = 2$ – число факторов.

10. Проверяем гипотезу адекватности найденной математической модели (9) по F – критерию Фишера. Расчетное значение критерия:

$$F_P = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_y^2} = 1,092$$

Расчетное значение сравниваем с табличным:

$F_T = 5,3$ [2], определенным при 5% уровне значимости по числу степеней свободы $f_1 = N - (k+1) = 1$, для большей дисперсии (σ_{ad}^2) и числу степеней свободы $f_2 = N - (n-1) = 8$ для меньшей дисперсии (σ_y^2).

Так как $F_p < F_T$ для принятого уровня значимости, то модель (9) адекватна.

Полученное уравнение регрессии (9) раскодируем с помощью уравнений преобразования (3) и (4), которое после упрощения и потенцирования примет вид:

$$Ra = 0,3458 \cdot E^{0,2175} \cdot L^{-0,3195}, \quad (10)$$

По модели (10) были построены графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от энергии импульсов тока при $L = L_{cp} = 4,85\text{мкГн} = \text{const}$ (рис.1) и от дополнительной индуктивности высокой добротности в раз-

рядной цепи генератора импульсов при $E = E_{cp} = 641\text{мкДж} = \text{const}$ (рис.2). На рис.3 представлен объемный график зависимости шероховатости от энергии и индуктивности.

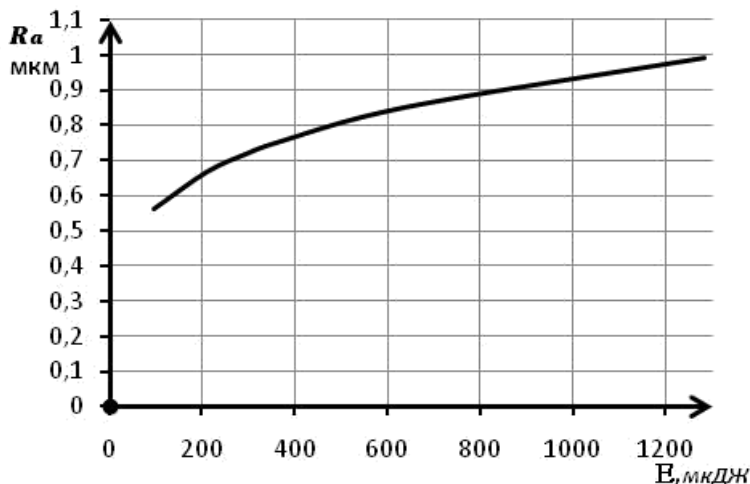


Рис.1 График зависимости шероховатости от энергии импульсов при индуктивности $L = 4,85\text{мкГн}$.



Рис.2 График зависимости шероховатости от индуктивности при энергии импульсов $E = 641\text{мкДж}$

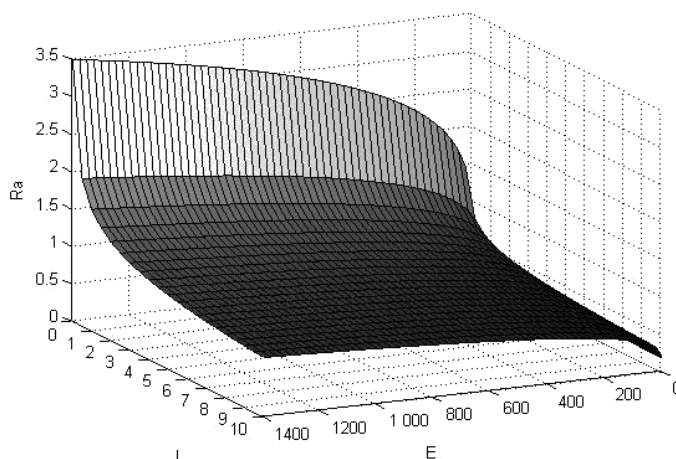


Рис.3 График зависимости шероховатости от энергии импульсов и индуктивности

Полученная математическая модель (10) и графики, показывают, что шероховатость поверхности в большей степени зависит от индуктивности, причем эта связь обратная. От энергии

импульсов зависимость прямая и относительно меньшая.

В ряде случаев максимально возможная производительность электроэрозионной прошивки отверстий ограничивается требованиями

по шероховатости, а точность, как правило, обеспечивается автоматически выбранными режимами. К этой группе относится большая номенклатура деталей электронных приборов с глубиной микроотверстий до 10 диаметров. Для обработки отверстий этой группы оптимальное

сочетание режимов обработки – энергии E и индуктивности L , целесообразно рассчитывать по интерполяционной модели вида (10), которую в связи с наличием двух факторов удобнее привести к дискретно-табличному виду (табл.4).

Таблица 4

Значения шероховатости отверстий R_a , мкм при обработке в воде нержавеющей стали X18H10T

Энергия импульсов, мкДж	Индуктивность в разрядной цепи, мкГн						
	1,5	2,37	3,65	4,96	8,21	15,16	25,6
6,41	0,455	0,393	0,343	0,311	0,264	0,217	0,184
14,1	0,540	0,467	0,407	0,369	0,314	0,258	0,218
21,15	0,590	0,510	0,444	0,403	0,343	0,282	0,238
30,13	0,637	0,551	0,480	0,435	0,370	0,304	0,257
64,1	0,751	0,649	0,565	0,512	0,436	0,352	0,303
96,15	0,820	0,709	0,617	0,560	0,476	0,392	0,331
211,54	0,974	0,841	0,733	0,664	0,566	0,465	0,393
301,28	1,051	0,908	0,791	0,717	0,611	0,502	0,425
352,56	1,088	0,940	0,819	0,742	0,632	0,520	0,439
641,03	1,239	1,071	0,933	0,846	0,720	0,586	0,500
1282,05	1,441	1,245	1,084	0,983	0,837	0,688	0,582

Выбирая по таблице ближайшее меньшее значение R_a относительно заданного чертежом детали, определяют требуемое оптимальное сочетание режимов обработки: энергия импульсов и индуктивность в разрядной цепи, с помощью которых обеспечивается наибольшая производительность. Например, при заданной шероховатости $R_a = 0,64$ мкм, имеет ближайшее меньшее табличное значение $R_{a\text{табл}} = 0,617$ мкм, которому соответствуют оптимальные режимы: $E_{\text{опт}} = 96,15$ мкДж, $L_{\text{опт}} = 3,65$ мкГн (см. отмеченное в табл.4).

Выводы:

1. Введение в разрядную цепь генератора импульсов индуктивности высокой добротности в значительной степени снижает шероховатость обработанной поверхности при электроэрозионной прошивке малых отверстий. Причем, степень влияния индуктивности на шероховатость выше степени влияния энергии импульсов.

2. Полученная интерполяционная математическая модель зависимости шероховатости обработанной поверхности от энергии импуль-

сов и индуктивности позволяет с помощью дискретно-табличного метода определять с высокой точностью оптимальные режимы обработки, при которых обеспечивается наибольшая производительность при соблюдении требований по шероховатости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий // монография. Белгород : Изд-во БГТУ, 2010. 314с..
2. Погонин А.А. Бойко А.Ф., Домашенко Б.В. Исследование переходных процессов при параллельном соединении транзисторных ключей в генераторах импульсов электроэрозионных станков // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова. 2005. №11. С. 368-376.
3. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М : Машиностроение, 1981. 184 с.