

УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article_59353e29817a52.65253211

С.Ю. Сьянов

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Представлена научно обоснованная методика разработки технологических процессов электроэрозионной обработки с учетом требований к качеству поверхностного слоя и производительности процесса. Приведены теоретические и экспериментальные зависимости, связывающие параметры качества поверхностного слоя деталей, производи-

тельность и износ электрода-инструмента с технологическими параметрами электроэрозионной обработки.

Ключевые слова: технологический процесс, электроэрозионная обработка, качество поверхностного слоя, производительность процесса, износ электрода-инструмента.

S.Yu. Syanov

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF ELECTRO-EROSION PROCESSING

Electric erosion machining (EEM) is one of the efficient and economically profitable methods of material machining in mechanical engineering. The EEM has a number of substantial advantages which widen a field of practical use of this machining method at manufacturing various products of mechanical engineering.

In spite of that EEM processes are studied thoroughly enough, at present there are no clear successive methods of EEM technological process development.

For the EEM technological process development there was defined an interaction of initial EEM data and parameters with the surface layer quality, the productivity and tool wear reasoning from theoretical experimental dependences describing an EEM process

and was offered a procedure for the development of operations in an EEM technological process.

As a result of investigations there are obtained theoretical and experimental dependences allowing the definition of machining modes depending on surface layer quality, machining productivity and permissible wear of a tool electrode, and also the recommendations on working liquid choice are given. All this will allow designing an EEM technological process with maximum productivity and required quality of a surface at minimum costs.

Key words: technological process, electric erosion machining, surface layer quality, process productivity, tool electrode.

Введение

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) - один из прогрессивных и экономически выгодных методов обработки материалов в машиностроении. Процесс формирования поверхностей деталей при ЭЭО осуществляется наиболее прогрессивным методом по сравнению с процессами механической обработки материалов резанием. ЭЭО позволяет проводить обработку как электропроводящих, так и неэлектропроводящих материалов независимо от их физико-механических свойств, формы и расположения поверхностей обрабатываемых деталей, что выгодно отличает ее от механической обработки резанием, в особенности при обработке труднообрабатываемых материалов.

Несмотря на положительные технические, технологические и экономические

показатели, ЭЭО имеет свои области применения и недостатки из-за своей физической природы. Основным недостатком ЭЭО - высокая энергоемкость по сравнению с обработкой резанием при изготовлении деталей простой формы из конструкционных материалов при одинаковых условиях обработки (производительности и качестве поверхностного слоя).

ЭЭО экономически выгодно применять при обработке изделий сложной пространственной формы и из труднообрабатываемых материалов, а также в тех случаях, когда поверхности достаточно сложно изготовить другими методами обработки.

Таким образом, ЭЭО имеет ряд существенных преимуществ, которые расширяют область практического применения данного метода обработки при произ-

водстве различных изделий машиностроения.

Процессы, протекающие при ЭЭО, подробно изучены, выявлено влияние технологических режимов обработки на качество поверхностного слоя, точность, износ

Разработка технологического процесса электроэрозионной обработки

Задача, которая решается при разработке технологического процесса, - определение оптимальных параметров ЭЭО, обеспечивающих минимальные затраты и максимальную производительность при требуемом качестве поверхностного слоя детали. Эту задачу в общем случае можно решить путем разбиения общего припуска на операционные и определения оптимальных параметров для каждой операции ЭЭО.

Исходными данными для проектирования технологического процесса ЭЭО являются материал детали, геометрические характеристики обрабатываемой поверхности, припуск на обработку, геометрические и физико-механические параметры качества поверхностного слоя детали, точность обработки, допустимый износ электрода-инструмента и требуемая производительность процесса.

При обработке поверхностей электроэрозионным методом технологический процесс можно разбить на следующие операции (или переходы): предварительная, получистовая и окончательная.

Предварительная операция необходима для удаления основной части припуска за минимальное время при минимальном износе инструмента.

Получистовая операция проводится для получения заданной точности и уменьшения высоты неровностей поверхности и толщины измененного слоя.

Окончательная обработка выполняется для получения заданных геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя за минимальное время.

На протекание и результаты процесса ЭЭО оказывают влияние следующие факторы: полярность импульсов и материал электродов, электрические и временные параметры импульсов напряжения и тока, подводимых к электродам (форма, частота, скважность, амплитуда и т.д.), конструк-

электрода-инструмента и производительность процесса [1; 4; 5].

Однако четких последовательных методов разработки технологических процессов ЭЭО до сих пор не существует.

тивные особенности электродов и характеристики рабочей жидкости.

Для разработки ТП и алгоритма обработки представим взаимосвязь исходных данных и параметров ЭЭО с качеством поверхностного слоя, производительностью и износом инструмента, исходя из теоретико-экспериментальных зависимостей, описывающих процесс ЭЭО [1; 2; 3; 5] (таблица).

В результате исследований [1 - 5] получены теоретические и экспериментальные зависимости, позволяющие определить режимы обработки в зависимости от качества поверхностного слоя детали, производительности обработки и допустимого износа электрода-инструмента, что позволяет спроектировать технологический процесс ЭЭО.

Исходя из данных таблицы разработка технологического процесса (операции) ЭЭО детали в общем случае осуществляется в следующей последовательности:

1. Разработка маршрута обработки.

1.1. Определение количества операций (переходов).

1.2. Разбиение общего припуска на операционные.

1.3. Определение требований к точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей для каждой операции (перехода) ЭЭО.

2. Разработка операций технологического процесса ЭЭО.

2.1. Выбор оборудования.

2.2. Выбор электрода-инструмента.

2.3. Выбор рабочей жидкости.

2.4. Определение режима обработки:

- выбор полярности разрядных импульсов;

- выбор формы разрядных импульсов;

- определение параметров импульсов;

- выбор параметров прокачки рабочей жидкости;

- выбор параметров релаксации и вибрации инструмента;

Точность ЭЭО

Точность ЭЭО определяется, во-первых, факторами, свойственными любому методу размерной обработки, и, во-вторых, факторами, характерными только для ЭЭО.

- определение величины межэлектродного зазора.

2.5. Определение времени обработки.

Эти факторы определяют соответствующие погрешности, совокупность которых создает суммарную погрешность.

Таблица

Взаимосвязь исходных данных и параметров ЭЭО с качеством поверхностного слоя, производительностью и износом инструмента

Условия обработки		Энергия импульсов	Свойства обрабатываемого материала	Свойства материала электрода-инструмента	Свойства диэлектрической жидкости	Исходная волнистость инструмента	Исходная волнистость детали	Исходное макроотклонение детали	Исходное макроотклонение инструмента			
Геометрические характеристики обрабатываемой поверхности	Параметры шероховатости	Rmax	+	*	-	-	0	0	0	0		
		Rz	+	*	-	-	0	0	0	0		
		Ra	+	*	-	-	0	0	0	0		
		Rp	+	*	-	-	0	0	0	0		
		Sm	+	*	-	-	0	0	0	0		
	Параметры волнистости	Wz	+	*	+	-	*	-	(+)	(+)	0	0
		Sm _w	+	*	+	-	*	-	(+)	(+)	0	0
Hmax		+	*	+	+	*	-	0	0	+	+	
Параметры физико-механических свойств поверхностного слоя	H _{μ0}		0	-	*	+	+	*	0	0	0	0
	h _{μ0}		+	*	-	+	*	-	0	0	0	0
	σ ₀		+	*	+	+	*	-	-	-	-	-
Износ электрода-инструмента		γ	+	*	+	+	+	-	-	-	-	-
Производительность процесса		Q	+	*	+	+	+	-	-	-	-	-

Примечания: 1. Знак «+» обозначает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует увеличению определенного параметра качества поверхности. 2. Знак «-» обозначает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует уменьшению определенного параметра качества поверхности. 3. Знак «0» обозначает, что изменение данного условия обработки не оказывает влияния на определенные параметры качества поверхности. 4. Знаком «*» помечены условия обработки, оказывающие основное влияние на определенные параметры качества поверхности. 5. В скобках указаны условия обработки, оказывающие влияние только в тех случаях, когда есть предварительная обработка.

К основным неизбежным причинам, вызывающим погрешность ЭЭО, относятся следующие:

1. Неточность изготовления станка ($\Delta_{ст}$).
2. Погрешность ($\Delta_{у.з}$), вызванная неточностью установки заготовки в приспособлении на рабочем столе.
3. Погрешность ($\Delta_{у.эи}$), обусловленная неточностью установки электрода-инструмента на станке. Она в первую очередь зависит от непараллельности геометрической оси электрода-инструмента направлению подачи.

Каждая из этих погрешностей может быть сведена к минимуму, если в процессе установки используют современные измерительные приборы или отсчетные микроскопы; при этом каждая из погрешностей может составить не более 0,01-0,02 мм.

К специфическим погрешностям ЭЭО относят следующие:

1. Погрешность ($\Delta_{мэз}$), вызванная наличием в процессе обработки зазора между электродом-инструментом и деталью.
2. Погрешность торцевого межэлектродного зазора ($\Delta_{тмэз}$) при колебании на-

пряжения и изменении загрязненности рабочей среды. При одновременной обработке партии деталей не выходит за пределы 0,008-0,01 мм. Погрешность ($\Delta_{бмэз}$) бокового зазора несколько больше и зависит от условий подвода рабочей среды.

3. Погрешность ($\Delta_{изн}$), вызванная износом электрода-инструмента. Зависит от его эрозионной стойкости, режима ЭЭО и глубины погружения электрода-инструмента в изделие или ширины реза и скорости перемотки проволоки.

При электроэрозионной проволочной резке можно отметить следующие характерные для указанного вида обработки источники погрешностей:

1. Износ направляющих электрод-проволоку фильер (как верхней, так и нижней).
2. Отклонение оси электрода от вертикали.
3. Упругие деформации электрода от различных силовых воздействий.
4. Отклонения параметров режущих электромагнитных импульсов.

Геометрические параметры качества поверхностного слоя

Профиль поверхности при ЭЭО образован большим количеством взаимно перекрывающихся лунок, которые имеют различные геометрические параметры ввиду того, что коэффициент перекрытия может в течение одной обработки принять любое значение из интервала от 1 до 2. Микрогеометрия обработанной поверхно-

сти зависит от условий ЭЭО, в том числе от теплофизических свойств материалов заготовки и инструмента, размеров обрабатываемой поверхности, типа рабочей жидкости и других условий. Высотные и шаговые параметры шероховатости поверхности можно определить по следующим теоретическим зависимостям [5]:

$$Rz = 3 \sqrt{\frac{(2\beta-1)IU\tau\eta}{(4\beta+1)c\rho T_{пл}}}; R_{max} = 1,73Rz;$$

$$Ra = 0,398Rz; Rp = 0,671Rz; Sm = \sqrt{\frac{8\beta+4}{2\beta-1}}Rz; tp = 100 - 10\sqrt{100-p},$$

где I – технологический ток, А; U – технологическое напряжение, В; τ – длитель-

ность импульса тока, мкс; η – коэффициент полезного использования энергии импуль-

са; c – удельная теплоемкость материала изделия, Дж/кг·°С; ρ – плотность материала изделия, кг/м³; $T_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала, °С; ρ – уровень сечения, %.

Формирование волнистости при ЭЭО будет зависеть от схемы формообразования деталей:

1. Копирование формы профилированного электрода-инструмента или его сечения. Данную операцию называют прошиванием. Существуют методы прямого и обратного копирования.

2. Взаимное перемещение обрабатываемой заготовки и непрофилированного электрода-инструмента. При этой схеме возможно вырезание сложнопрофильных деталей и разрезание заготовок непрофилированными электродами, электроэрозионное шлифование плоских и цилиндрических поверхностей.

3. Сочетание перемещений заготовки и профилированного электрода (огибание или обкат). Этот метод редко применяют, но он позволяет получить деталь сложной формы при простой форме электрода-инструмента.

На формирование волнистости при электроэрозионной обработке оказывает влияние множество факторов, которые могут присутствовать или отсутствовать в зависимости от схемы обработки и от того, ведется ли обработка в сплошном материале или обрабатывается заранее подготовленная поверхность.

К основным факторам, влияющим на получаемую волнистость поверхности при ЭЭО, можно отнести: параметр, обусловленный влиянием исходной волнистости заготовки, $H1$; параметр, обусловленный влиянием исходной волнистости инструмента, $H2$; параметр, обусловленный влиянием колебаний технологических режимов обработки, $H3$.

При различных схемах формообразования поверхностей деталей указанные факторы могут оказывать или не оказывать

влияние на волнистость получаемой поверхности.

При обработке по первой схеме формообразования (прямое и обратное копирование) на получаемую волнистость оказывают влияние: при обработке в сплошном материале – параметры $H2$ и $H3$; при обработке заранее подготовленных поверхностей – параметры $H1$, $H2$ и $H3$.

При второй схеме обработки (разрезание, вырезание, шлифование и т.п.) основное влияние оказывает параметр $H3$. Параметры $H1$ и $H2$ не оказывают влияния ввиду того, что при перемещении инструмента относительно заготовки или заготовки относительно инструмента не происходит копирования геометрических параметров поверхности.

При изготовлении деталей методом копирования происходит копирование геометрических форм инструмента. Следовательно, копируется и исходная волнистость поверхности инструмента, а также исходная волнистость обрабатываемой заготовки. Вследствие износа инструмента исходная волнистость детали копируется на инструмент, а с поверхности инструмента обратно на деталь (этот процесс можно назвать «схема двойного копирования волнистости»). При износе инструмента его исходная волнистость копируется на поверхность детали не полностью, а лишь частично.

В зависимости от схемы формообразования и режимов обработки степень влияния параметров $H1$, $H2$ и $H3$ на образование волнистости будет различной.

Таким образом, среднюю волнистость поверхности при электроэрозионной обработке можно получить, просуммировав перечисленные составляющие по правилу суммирования случайных величин [1; 4].

1. Прямое и обратное копирование:

- при обработке заранее подготовленных поверхностей

$$W_z = \sqrt{10^{-4} \gamma^2 \left[(W_{z_{исх}}^H)^2 + (W_{z_{исх}}^{заг})^2 \right] + (W_{z_{исх}}^H)^2 (1 - 0,02\gamma) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \tau \eta}{c \rho T_{пл}}} \right)^2 \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right)^2},$$

где I – сила тока при обработке, А; U_{max} – максимальное напряжение при обработке,

$U_{max} = U + \Delta U$ (ΔU – перепад напряжения), U_{min} – минимальное напряжение при

обработке, $U_{\min}=U-\Delta U$, В; τ - длительность импульса, с; η - коэффициент полезного использования энергии импульса; c - удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·°С; ρ - плотность обрабатываемого материала, кг/м³; $T_{\text{пл}}$ - температура плавления обрабатываемого материала, °С; $Wz_{\text{исх}}^{\text{заг}}$ - исходная волнистость за-

готовки, мм; $Wz_{\text{исх}}^{\text{и}}$ - исходная волнистость инструмента, мм; γ - относительный объемный износ электрода-инструмента, % [3];

- при обработке в сплошном материале

$$Wz = \sqrt{\left(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}}\right)^2 \left(1 - 0,02\gamma + 10^{-4}\gamma^2\right) + \left(0,5\sqrt[3]{\frac{I\tau\eta}{c\rho T_{\text{пл}}}}\right)^2 \left(\sqrt[3]{U_{\text{max}}} - \sqrt[3]{U_{\text{min}}}\right)^2}.$$

2. Разрезание, вырезание, шлифование и т.п. При данной схеме и данных операциях обработки средняя волнистость бу-

дет определяться только лишь составляющей НЗ:

$$Wz = 0,5\sqrt[3]{\frac{I\tau\eta}{c\rho T_{\text{пл}}}} \left(\sqrt[3]{U_{\text{max}}} - \sqrt[3]{U_{\text{min}}}\right).$$

Физико-механические параметры качества поверхностного слоя

Разрушение электродов при ЭЭО происходит за счет импульсов технологического тока, что приводит не только к удалению материала заготовки, но и к нагреву тонких поверхностных слоев. Нагрев, а также охлаждение данных слоев происходят с высокими скоростями, что, в свою очередь, обуславливает изменение физико-механических свойств материала заготовки.

Для того чтобы анализировать микротвердость и остаточные напряжения при ЭЭО, необходимо в первую очередь знать распределение температурного поля в поверхностном слое изделия [1; 2].

$$H_{\mu 0} = 4,04 \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}}, \quad h_{\mu} = 10^{-3} \frac{A_{\text{и}}^{0,234} \Pi_{\text{и}}^{0,409}}{\Pi_{\text{д}}^{0,236}},$$

где $A_{\text{и}}$ - энергия импульса, Дж; $\Pi_{\text{и}}$ - критерий Палатника материала инструмента, Дж·Вт/м⁴; $\Pi_{\text{д}}$ - критерий Палатника материала детали, Дж·Вт/м⁴.

На величину и глубину залегания технологических остаточных напряжений (ТОН) влияют силовой σ_c и тепловой σ_T факторы процесса обработки, а также фазовые превращения $\sigma_{\text{ф}}$, протекающие в зоне обработки.

Влияние силового фактора при ЭЭО очень мало, поэтому на формирование ТОН будут оказывать основное влияние

Зная распределение температуры по глубине и используя данные материаловедения, можно спрогнозировать структуру материала, а следовательно, и ожидаемую твердость. Однако реальная твердость будет отличаться от прогнозируемой, так как скорости охлаждения будут не всегда выше или равны критической.

Также для определения поверхностной микротвердости материала и глубины залегания материала с измененными физико-механическими свойствами при электроэрозионной обработке можно воспользоваться зависимостями, полученными экспериментально:

тепловой фактор процесса обработки и фазовые превращения, протекающие в зоне обработки. Тогда ТОН при ЭЭО можно рассчитать по зависимости

$$\sigma_0 = \pm \sigma_T \pm \sigma_{\text{ф}}.$$

Тепловой фактор может привести к формированию на поверхности как растягивающих ТОН, так и сжимающих.

При локальном нагреве материала происходит быстрый нагрев тонкого поверхностного слоя материала небольшой площади на незначительную глубину до очень высоких температур с последующим

охлаждением. Следовательно, верхний слой испытывает растягивающую нагрузку со стороны нижнего слоя (растягивающие ТОН, $\sigma_0 < 0$), а нижний - сжимающую нагрузку со стороны верхнего слоя (сжимающие ТОН, $\sigma_0 > 0$).

Если фазовые превращения, протекающие при обработке, сводятся к превращению γ -фазы (ГКЦ решетки) в α -фазу

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} E \left[\alpha \left(- \frac{A_{\text{и}} \eta}{c \rho (2 \sqrt{\pi a \tau})^3} \text{EXP} \left[- \frac{(y - y_{\text{пл}})^2}{4 a \tau} \right] \right) - \frac{\sigma_{\text{T}}}{E} \right],$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; α – коэффициент линейного расширения материала, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; σ_{T} – предел текучести материала, Па; a – температуропроводность материала, $\text{м}^2/\text{с}$; y – расстояние от источника тепла до рассматриваемого слоя, м; $y_{\text{пл}}$ – расстояние, определяющее зону плавления материала (рассчитывается

(ОЦК решетку), то формируются сжимающие ТОН, если наоборот – растягивающие.

Зная зависимости для расчета деформаций и температуру в поверхностном слое материала, получаем окончательную зависимость для расчета ТОН:

по зависимости), м; $A_{\text{и}}$ – энергия импульса, Дж; η – коэффициент полезного использования энергии импульса; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг \cdot $^{\circ}\text{C}$; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м 3 ; τ – длительность импульса, с.

Износ и производительность

Объемный износ электрода-инструмента и производительность процесса ЭЭО можно определить по следующим зависимостям [3]:

$$\gamma = 0,34 \frac{60 \eta_1 U I 10^6}{c_{\text{и}} \rho_{\text{и}} T_{\text{пл}_{\text{и}}}},$$

$$Q = \frac{60 \eta U I 10^6}{c_{\text{д}} \rho_{\text{д}} T_{\text{пл}}},$$

где γ – объемный износ электрода-инструмента, мм 3 /мин; Q – производительность электроэрозионной обработки, мм 3 /мин; η – коэффициент полезного использования энергии импульса; η_1 – коэффициент, показывающий, какое количество

энергии идет на разрушение электрода-инструмента; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления обрабатываемого материала, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{пл}_{\text{и}}}$ – температура плавления материала инструмента, $^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{д}}$ – удельная теплоемкость материала детали, Дж/кг \cdot $^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{и}}$ – удельная теплоемкость материала инструмента, Дж/кг \cdot $^{\circ}\text{C}$; $\rho_{\text{д}}$ – плотность материала детали, кг/м 3 ; $\rho_{\text{и}}$ – плотность материала инструмента, кг/м 3 ; U – напряжение, В; I – ток, А.

Знание производительности процесса и износа электрода-инструмента позволит определить технологическое время операции ЭЭО, а также параметры волнистости.

Рабочие жидкости

Существуют различные виды электроэрозионной обработки, в каждом из которых применяются различные рабочие жидкости, обеспечивающие оптимальные режимы обработки материала.

При формировании пробоя большое влияние оказывает диэлектрическая прочность рабочей среды и особенно её вязкость.

Как правило, на черновых режимах применяются вязкие рабочие жидкости с

вязкостью $(5-6,6)10^{-4}$ м 2 /с (смесь керосин – масло индустриальное), а чистовые операции производятся в жидкостях с меньшей вязкостью – $(1,8-3,1)10^{-4}$ м 2 /с (керосин или углеводородное сырье).

Для черновой обработки используются более густые рабочие жидкости, потому что они способствуют более интенсивному удалению продуктов эрозии и тем самым значительно повышают производительность процесса. Чистовая же обработ-

ка требует получения на выходе высоких качественных показателей и геометрической точности, поэтому для финишной обработки используются менее вязкие жидкости, что способствует получению высокого качества поверхностного слоя и геометрических размеров.

Электропроводность на черновых режимах должна быть около 0,04 - 0,05 Ом⁻¹·см⁻¹, а на чистовых – 0,03 - 0,04 Ом⁻¹·см⁻¹. Рабочую жидкость следует ме-

Межэлектродный зазор

При электроэрозионной обработке пробой промежутка между электродами наступает раньше их касания, поэтому размеры электрода всегда отличаются от размеров обрабатываемых контуров на удвоенную величину межэлектродного зазора.

Наибольшее влияние на величину межэлектродного зазора оказывают электрический режим обработки и обрабатываемый материал.

Заключение

Таким образом, с использованием таблицы, последовательности проектирования технологического процесса ЭЭО, расчетных и экспериментальных зависимостей проектируется технологический процесс ЭЭО для конкретного изделия.

Для обеспечения нормального протекания процесса ЭЭО необходимо подвести к электродам импульсы технологического тока с требуемыми формой и параметрами, а также ввести в межэлектродный промежуток поток диэлектрической жидкости для удаления продуктов обработки и охлаждения рабочей зоны. Кроме того, необходимо поддерживать оптимальный размер межэлектродного зазора.

При ведении ЭЭО меняются условия обработки и выходные характеристики как

нить при электропроводности 0,05 Ом⁻¹·см⁻¹, так как при 0,06 Ом⁻¹·см⁻¹ производительность на чистовых режимах падает в шесть - десять раз. Обработка твердых сплавов должна проводиться с большим значением проводимости рабочей жидкости, чем обработка стали. Для снижения износа электродов и повышения производительности электроэрозионной обработки в рабочую жидкость добавляют поверхностно-активные вещества.

Межэлектродный зазор для различных групп материалов можно рассчитать по зависимостям:

- для твердых сплавов

$$\delta = 0,074 I^{0,25} \tau^{0,25} U^{0,42},$$

- для сталей

$$\delta = 0,064 I^{0,25} \tau^{0,25} U^{0,42},$$

где U – напряжение, В; I – ток, А; τ - длительность импульса тока, с.

при переходе от одного этапа обработки к другому, так и в пределах одного этапа. Это приведет к изменению качества поверхностного слоя и производительности процесса. Поэтому для достижения максимальной производительности и требуемого качества поверхности при минимальных затратах необходимо детально разрабатывать технологический процесс ЭЭО и определять оптимальные параметры его ведения. Это возможно при помощи представленных рекомендаций, методики разработки технологического процесса ЭЭО и расчетных зависимостей, связывающих качество поверхностного слоя, межэлектродный зазор, производительность и износ инструмента с основными параметрами электроэрозионного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Съянов, С.Ю. Связь параметров электрофизической обработки с показателями качества поверхности, износа инструмента и производительностью процесса / С.Ю. Съянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 1 (17). - С. 14-19.
2. Федонин, О.Н. Методика определения технологических остаточных напряжений при механической и электрофизической обработке / О.Н. Федонин, С.Ю. Съянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2002. - № 4. - С. 32.

3. Федонин, О.Н. Управление износом инструмента и производительностью процесса при электроэрозионной обработке / О.Н. Федонин, С.Ю. Сьянов, Н.И. Фомченкова // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 3. - С. 85-88.
4. Сьянов, С.Ю. Технологическое управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 3. - С. 85-88.
1. Syanov, S.Yu. Connection of electro-physical working parameters with surface quality, tool wear and process productivity / S.Yu. Syanov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2008. - No 1(17). - pp. 14-19.
2. Fedonin, O.N. Methods for technological residual stress definition at machining and electro-physical working / O.N. Fedonin, S.Yu. Syanov // Metal Working (Technology, Equipment, Toolware). - 2002. - No 4. - pp. 32.
3. Fedonin, O.N. Tool wear and productivity control at electro-erosion machining / O.N. Fedonin, S.Yu. Syanov, N.I. Fomchenkova // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2014. - No 3. - pp. 85-88.
4. Syanov, S.Yu., Technological control of quality parameters in surface layer of machinery at electro-erosion machinery / S.Yu. Syanov // High Technologies in Mechanical Engineering. - 2014. - No 6. - pp. 24-29.
5. Syanov, S.Yu. Theoretical definition for quality parameters of surface layer in parts, tool-electrode wear and process productivity at electroerosion machining / S.Yu. Syanov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2016. - No 1(49). - pp. 67-73.
5. Сьянов, С.Ю. Теоретическое определение параметров качества поверхностного слоя деталей, износа электрода-инструмента и производительности процесса при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 1 (49). - С. 67-73.

Статья поступила в редколлегию 27.12.16.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Петрешин Д.И.*

Сведения об авторах:

Сьянов Сергей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического универ-

Syanov Sergey Yurievich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Automated Technological Systems"

ситета, тел.: (4832) 58-82-85, e-mail: SERG620@mail.ru.

Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-85, e-mail: SERG620@mail.ru.