

УДК 621.7-4

С.Ю. Съянов

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОТ УСЛОВИЙ ИХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Представлены теоретические зависимости параметров шероховатости, волнистости, микротвердости, остаточных напряжений от условий электроэрозионной обработки, дающие возможность технологического управления параметрами качества деталей машин при электроэрозионной обработке.

Ключевые слова: качество поверхности, шероховатость поверхности, волнистость поверхности, остаточные напряжения, микротвердость, электроэрозионная обработка.

В основу электроэрозионной обработки (ЭЭО) положен процесс электрической эрозии, в результате которой происходит удаление материала с поверхности изделия. Поверхность электродов разрушается вследствие плавления и частичного испарения материала. В результате этого на поверхности остаются углубления, называемые лунками, параметры которых зависят от следующих факторов:

- 1) величины тока, протекающего между электродами;
- 2) величины напряжения, приложенного к электродам;
- 3) физико-механических характеристик материалов инструмента и изделия, которые в общем виде можно описать критерием Палатника ($P = c\rho\lambda T^2$, где c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности материала, T – температура плавления материала);
- 4) характеристик диэлектрической жидкости;
- 5) коэффициента перекрытия лунок β , который определяется как отношение расстояния между центрами соседних лунок к радиусу лунки (коэффициент β лежит в интервале от 1 до 2).

Микрорельеф поверхности 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 указанного интервала. Поэтому для получения зависимостей, связывающих параметры электрической эрозии и показатели шероховатости поверхности, были сделаны допущения:

- все лунки одинаковы;
- коэффициент перекрытия лунок β постоянен на протяжении всей обработки и равен своему среднему значению.

С учетом сформулированных допущений и физической природы протекающих процессов были получены теоретические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности при электроэрозионной обработке [1, 4, 6]. Полученные зависимости требовали корректировки ввиду сделанных допущений. Для их уточнения был установлен закон распределения коэффициента перекрытия лунок β [1, 4].

Коэффициент β подчиняется закону нормального распределения со следующими параметрами: $\beta_{cp}=1,5$; $\sigma=0,167$. Найденный закон распределения коэффициента β позволил найти вероятностный коэффициент перекрытия лунок и тем самым уточнить имеющиеся зависимости. Кроме того, знание закона распределения позволило разделить такие параметры шероховатости, как R_z и R_{max} (при сделанных допущениях $R_z = R_{max}$).

Таким образом, были окончательно получены следующие зависимости для определения высотных и шаговых параметров шероховатости:

$$Rz = 3 \sqrt[3]{\frac{(2\beta-1)IU\tau U}{(4\beta+1)c\rho T_{пл}}};$$

$$R_{max} = 1,73Rz;$$

$$Ra = 0,398Rz;$$

$$Rp = 0,671Rz;$$

$$S_m = \sqrt{\frac{8\beta+4}{2\beta-1}} Rz;$$

$$tp = 100 - 10\sqrt{100-p},$$

где I – технологический ток, А; U – технологическое напряжение, В; τ – длительность импульса тока, мкс; η – коэффициент полезного использования энергии импульса; c – удельная теплоемкость материала изделия, Дж/кг·°С; ρ – плотность материала изделия, кг/м³; $T_{пл}$ – температура плавления материала изделия, °С; p – 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 она в сплошном материале или обрабатывается заранее подготовленная поверхность.

К основным факторам, влияющим на получаемую волнистость поверхности при ЭЭО, можно отнести:

- 1) параметр, обусловленный влиянием исходной волнистости заготовки, – Н1;
- 2) параметр, обусловленный влиянием исходной волнистости инструмента, – Н2;
- 3) параметр, обусловленный влиянием колебаний технологических режимов обработки, – Н3.

При различных схемах формообразования поверхностей деталей указанные факторы могут оказывать или не оказывать влияние на волнистость получаемой поверхности.

При обработке в сплошном материале по первой схеме формообразования на получаемую волнистость влияют лишь параметры Н2 и Н3. При обработке заранее подготовленных поверхностей влияние на получаемую волнистость оказывают параметры Н1, Н2 и Н3.

При второй схеме обработки (разрезание, вырезание, шлифование и т.п.) основное влияние оказывает параметр Н3. Параметры Н1 и Н2 не будут влиять ввиду того, что при перемещении инструмента и заготовки относительно друг друга не будет происходить копирования геометрических параметров поверхности.

При изготовлении деталей методом копирования происходит копирование геометрической формы инструмента. Следовательно, копируется и исходная волнистость поверхности инструмента, а также исходная волнистость обрабатываемой заготовки. Благодаря износу инструмента исходная волнистость детали копируется на инструмент, а с по-

верхности инструмента обратно на деталь (этот процесс можно назвать «схема двойного копирования волнистости»). За счет износа инструмента его исходная волнистость копируется на поверхность детали не полностью, а лишь частично.

Таким образом, составляющие волнистости можно рассчитать по следующим зависимостям:

1. Если относительный объемный износ инструмента не превышает 100 %, то

$$H1 = 0,01\gamma Wz_{исх}^{заг}; \quad (1)$$

$$H2 = Wz_{исх}^и - 0,01\gamma Wz_{исх}^и,$$

где $Wz_{исх}^{заг}$ - исходная волнистость заготовки; $Wz_{исх}^и$ - исходная волнистость инструмента; γ - относительный объемный износ инструмента.

2. Если относительный объемный износ инструмента более 100%, то составляющая волнистости H1 рассчитывается по зависимости (1), а составляющая H2 - по зависимости

$$H2 = 0,01\gamma Wz_{исх}^и - Wz_{исх}^и.$$

В рассматриваемом случае копируется незначительная часть высотного параметра исходной волнистости, зато при таком износе могут увеличиваться шаговые параметры волнистости.

Составляющая волнистости H3 присутствует при изготовлении изделий по любой технологической схеме, применяемой при электроэрозионной обработке. Схема формирования данной составляющей показана на рис. 1.

Обработка осуществляется импульсами тока, амплитудное значение которых может отличаться от номинального значения из-за нестабильности питающего напряжения (оно в зависимости от типа применяемого генератора импульсов может колебаться в различных пределах). Именно по этой причине и появляется составляющая волнистости H3, которую можно рассчитать по зависимости

$$H3 = 0,53 \sqrt{\frac{I \tau \eta}{c \rho T} \left(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}} \right)},$$

где I – сила тока при обработке, А; U_{max} – максимальное напряжение при обработке ($U_{max}=U+\Delta U$, ΔU – перепад напряжения), В; 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 – температура плавления обрабатываемого материала, °С.

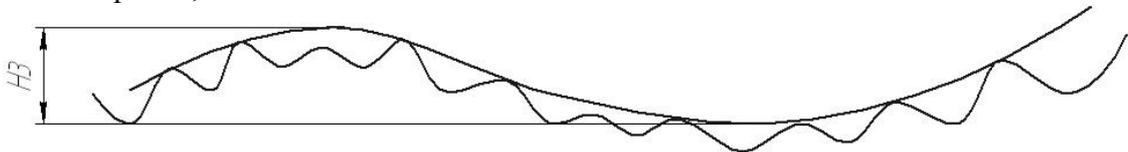


Рис. 1. Схема формирования составляющей волнистости H3

В зависимости от схемы формообразования и режимов обработки степень влияния перечисленных составляющих на образование волнистости будет различной. Среднюю волнистость поверхности при электроэрозионной обработке можно получить, просуммировав перечисленные составляющие по правилу суммирования случайных величин:

$$Wz = \sqrt{H1^2 + H2^2 + H3^2}.$$

Таким образом, получаем следующие зависимости для расчета волнистости поверхности при ЭЭО:

1. Прямое и обратное копирование:

- обработка заранее подготовленных поверхностей:

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

- обработка в сплошном материале:

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

2. Разрезание, вырезание, шлифование и т.п. (при данной схеме и данных операциях обработки средняя волнистость будет определяться только лишь составляющей НЗ):

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

Для использования полученных зависимостей необходимо знать относительный объемный износ электрода-инструмента. На износ электрода-инструмента при ЭЭО оказывают основное влияние следующие факторы:

- режим обработки;
- физико-механические свойства материала детали;
- физико-механические свойства материала электрода-инструмента.
- геометрия электрода-инструмента.

На основании изложенного, зная объем металла, удаляемого с поверхности за один импульс [5], мы можем определить объемный износ электрода-инструмента:

Объем материала, удаляемого с поверхности за один импульс:

$$V = \frac{\eta_1 \int_0^{\tau_u} U I d\tau_u}{c_{и} \rho_u T_{пл_{и}}},$$

где U – напряжение, В; I – ток, А; τ_u – длительность импульса, с; η_1 – коэффициент, показывающий, какое количество энергии идет на разрушение электрода-инструмента (можно рассчитать по методике, представленной в [2; 3]); $c_{и}$ – удельная теплоемкость материала инструмента, Дж/кг·°С; $\rho_{и}$ – плотность материала инструмента, кг/м³; $T_{пл_{и}}$ – температура плавления материала инструмента, °С.

Усредняя по времени значения тока и напряжения и зная объем материала, удаляемого за один импульс, находим объемный износ электрода-инструмента в единицу времени:

$$\gamma_{\tau} = \frac{60 \eta_1 U I}{c_{и} \rho_u T_{пл_{и}}},$$

где γ_{τ} – объемный износ электрода-инструмента, мм³/мин.

Отсюда можно определить относительный объемный износ электрода-инструмента:

$$\gamma = \frac{60 \eta_1 U I t_0}{c_{и} \rho_u T_{пл_{и}} V_{и}} 100\%,$$

где t_0 – время обработки, мин; $V_{и}$ – начальный объем электрода-инструмента, мм³.

Таким образом, получены теоретические зависимости для расчета волнистости при основных схемах формообразования ЭЭО.

Разрушение электродов при ЭЭО, происходящее за счет импульсов технологического тока, 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 [2; 3]. Точно рассчитать температуру в окрестностях области разряда не представляется возможным, так как нет сведений о тепловых потоках, начальной конфигурации поверхностей электродов и другой информации. Поэтому для определения температуры делается ряд допущений:

1. Разряд – стационарный точечный источник тепла.
2. Теплофизические постоянные не изменяются в течение времени протекания процесса.
3. Тепловые потоки усредняются.

Так как нагрев происходит в результате воздействия кратковременного теплового источника постоянной силы, то такой источник можно считать мгновенным. Из теории теплопроводности известно, что температуру в любом слое при мгновенном источнике энергии можно рассчитать по зависимости

$$T = T_0 - \frac{Q}{c\rho(2\sqrt{\pi a \tau})^3} \text{EXP}\left[-\frac{y^2}{4a\tau}\right],$$

где Q – энергия импульса; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность материала; a – температуропроводность материала; τ – длительность импульса; y – расстояние от источника тепла до рассматриваемого слоя; T_0 – температура окружающей среды.

Исключая из представленной формулы зону плавления материала и раскрывая энергию импульса, окончательно получим зависимость для расчета температуры в поверхностном слое материала:

$$T = T_0 - \frac{A_{и} \eta_{и}}{c\rho(2\sqrt{\pi a \tau})^3} \text{EXP}\left[-\frac{(y - y_{пл})^2}{4a\tau}\right], \quad (2)$$

где $A_{и}$ – энергия импульса технологического тока; $\eta_{и}$ – коэффициент полезного использования энергии импульса; $y_{пл}$ – расстояние, определяющее зону плавления материала, которое рассчитывается по зависимости

$$y_{пл} = \sqrt{-4a\tau \ln\left[\frac{(T_{пл} - T_0)c\rho(2\sqrt{\pi a \tau})^3}{A_{и} \eta_{и}}\right]}.$$

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.

На величину и глубину залегания технологических остаточных напряжений (ТОН) оказывают влияние силовой σ_c и тепловой σ_T факторы процесса обработки, а также фазовые превращения, протекающие в зоне обработки, σ_ϕ .

Влияние силового фактора при ЭЭО очень мало, поэтому на формирование ТОН будут в основном влиять тепловой фактор процесса обработки и фазовые превращения, протекающие в зоне обработки. Тогда ТОН при ЭЭО можно рассчитать по зависимости

$$\sigma_0 = \pm \sigma_T \pm \sigma_\phi.$$

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. В начальный момент времени поверхностный слой с температурой T_1 увеличивает свой объем в результате теплового расширения (рис. 2 а). Нижележащие слои с меньшей температурой T_0 препятствуют этому. Создается устойчивое состояние, при котором верхний слой расширился вследствие тепловой деформации $\epsilon_{\text{тепл}}$ и растянул нижний слой до пластической деформации $\epsilon_{\text{пласт}}$ (рис. 2 б). Затем верхний слой остывает и стремится занять исходный объем (рис. 2 в), но нижний слой этому препятствует. В результате создается новое устойчивое состояние, при котором верхний слой находится в состоянии упругого растяжения (его длина меньше номинальной после пластического растяжения). 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 $\sigma_0 > 0$) (рис. 2 г).

Если фазовые превращения, протекающие при обработке, сводятся к превращению γ -фазы (ГКЦ решетки) в α -фазу (ОЦК решетку), то формируются сжимающие ТОН, если наоборот – растягивающие.

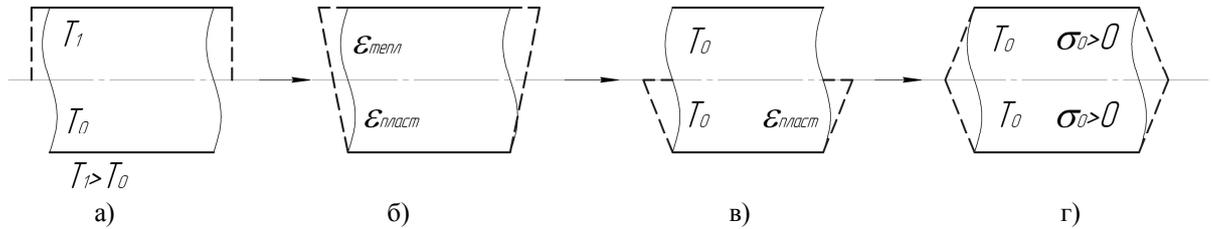


Рис. 2. Влияние теплового фактора при локальном нагреве материала заготовки

Таким образом, уравнение, описывающее формирование суммарных ТОН σ_0 , будет иметь вид

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} E (\epsilon_{\text{тепл}} - \epsilon_{\text{пласт}}), \quad (3)$$

где E – модуль упругости первого рода; $\epsilon_{\text{тепл}}$ – тепловая деформация; $\epsilon_{\text{пласт}}$ – пластическая деформация.

Деформации рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\epsilon_{\text{тепл}} = \alpha (T_1 - T_0); \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{пласт}} = \frac{\sigma_T}{E}, \quad (5)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала; T_0 – начальная температура обработки; T_1 – температура обработки; σ_T – предел текучести материала.

Подставляя выражения (4, 5) в (3) и (2) в (4), получим окончательную зависимость для расчета ТОН:

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} E \left[\alpha \left(- \frac{A_n \eta_n}{c \rho (2 \sqrt{\pi a \tau})^3} \text{EXP} \left[- \frac{(y - y_{\text{пл}})^2}{4 a \tau} \right] \right) - \frac{\sigma_T}{E} \right].$$

Все приведенные теоретические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности, волнистости, микротвердости и остаточных напряжений позволят еще на стадии технологической подготовки производства определить условия ЭЭО для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сьянов, С.Ю. Связь параметров электрофизической обработки с показателями качества поверхности, износа инструмента и производительностью процесса / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 1 (17). - С. 14-19.
2. Сьянов, С.Ю. Определение остаточных напряжений, износа инструмента и производительности при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2006. - № 2. - С. 59-61.
3. Сьянов, С.Ю. Связь микротвердости и остаточных напряжений с параметрами электроэрозионной обработки / С.Ю. Сьянов // Наука и образование XXI века: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. - 2013. - С. 237-240.
4. Сьянов, С.Ю. Технологическое управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин при электроэрозионной обработке / С.Ю. Сьянов // Научные технологии в машиностроении. - 2014. - № 6 (36). - С. 24-29.
5. 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.
6. Макаров, В.Ф. Оптимизация процесса скоростного электроэрозионного сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов / В.Ф. Макаров, Р.С. Абзаев, А.В. Владыкин // Справочник. Инженерный журнал. - 2013. - № 7(196). - С. 8- 13.

Материал поступил в редколлегию 25.02.15.