

УДК 621.7+621.9

АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ БРЕЦКИХ

ведущий инженер-электроник ПетрГУ

vsysun@psu.karelia.ru

ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ СЫСУН

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электроэнергетики, декан физико-технического факультета ПетрГУ

vsysun@psu.karelia.ru

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

В статье подробно рассмотрена физика электрической эрозии и описана аппаратура, применяемая для резания, прошивания, маркировки материала, шлифовки и упрочнения поверхностей.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, электрический разряд, эрозия, поверхность

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии. Метод был разработан во время Великой Отечественной войны Б. Р. и Н. И. Лазаренко, предложившими использовать обычно вредную электрическую эрозию контактов для технологических целей обработки материалов (см. об этом: [1], [2], [3], [4]). Для предотвращения сварки и сохранения локальности обработки используют низкие напряжения, импульсный электрический разряд, при котором нагрев от контакта не успевает распространиться на всю деталь, и перемещение детали. Наиболее целесообразно использовать электроэрозионную обработку для деталей из твердых сплавов и при профильной обработке, когда металлорежущая технология трудно применима. Схема процесса ЭЭО показана на рис. 1.

Процесс ЭЭО происходит в рабочей жидкости (РЖ), которая заполняет межэлектродное пространство (МЭП), при этом один из электродов – заготовка, а другой электрод – инструмент (ЭИ). С целью преимущественной эрозии заготовки, а не инструмента применяют стойкие к эрозии электроды (CuC, CuW, C и др.), определенную полярность тока (при коротких импульсах на электрод-инструмент подают минус (включение на прямую полярность), при очень длинных – плюс (включение на обратную полярность)), при возможности – перемещение электрода.



Рис. 1. Схема процесса ЭЭО

Типичные режимы:

- для черновой обработки сталей: $U = 18 \div 36$ В, $I = 20 \div 120$ А, $t_n = 200 \div 2000$ мкс;
- для чистовой обработки сталей: $U = 40 \div 180$ В, $I = 1 \div 5$ А, $t_n = 5 \div 200$ мкс;
- для чистовой обработки твердых сплавов: $U = 100 \div 200$ В, $I = 0,2 \div 2$ А, $t_n = 1 \div 10$ мкс.

При электроэрозионной обработке в воздухе или газовой среде происходит перемешивание и взаимное нанесение материалов электродов друг на друга. Их взаимодействие, а также взаимодействие с газовой средой приводит к образованию и нанесению на заготовку новых сплавов и соединений (нитридов из азота воздуха, карбидов – при графитовом инструменте и т. д.). Происходит также диффузия новых соединений в заготовку, измельчение зерен в приповерхностном слое толщиной в десятки доли миллиметра. Такая обработка называется *электроэрозионным упрочнением* (ЭЭУ). Для стабилизации процесса обработки используется вибрация инструмента с частотой $f_{ЭИ} \sim 50$ Гц.

1. ФИЗИКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ

При сближении электродов до расстояния нескольких десятков микрометров в отдельных местах (микровыступы) напряженность поля даже при напряжениях в десятки вольт может достигнуть пробойного значения. Возникает электрический разряд.

Итак, первая стадия процесса – пробой, образование узкого канала проводимости. Пробой начинается при достижении средней напряженности поля

$$E_{ср} = \frac{U}{d} = (1 \div 2) \cdot 10^3 \text{ В/мм},$$

где U – напряжение пробоя, d – минимальное межэлектродное расстояние (рис. 2а).

Вторая стадия – это образование вокруг канала проводимости газовой полости из паров жидкости и металлов, расширение канала проводимости и газовой полости в рабочую жидкость со скоростью до 150–200 м/с (примерно скорость звука). При этом на наружной границе канала образуется фронт уплотнения, под микровыступом локализуется нагрев металла детали. Когда разрядная емкость мала, канал разряда существенно не успевает расшириться и разряд протекает в виде искры. При этом анод сильнее эродирует, чем катод. В случае заполнения зазора жидким диэлектриком расширение канала также затрудняется. За счет выделения энергии на электродах на границах разрядного канала образуются лунки проплавления, увеличивающиеся при увеличении амплитуды тока и длительности импульса (рис. 2б). Температуру в заготовке после протекания импульса тока можно найти, считая источник тока точечным и распространение тепла полусферическим с радиусом r .

$$T = T_0 + \frac{W_{и} \eta}{c \rho \cdot 8(\pi \alpha t_{и})^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4 \alpha t_{и}}},$$

где T_0 – начальная температура, $W_{и}$ – энергия импульса, η – КПД, c – теплоемкость, ρ – плотность, $\alpha = \lambda / c \rho$ – температуропроводность, λ – теплопроводность.

Третья стадия протекает после прекращения тока. Канал разряда начинает деионизоваться, газовая полость и окружающая ее жидкость про-

должают расширяться по инерции, создавая в центре над лункой разрежение. Расплавленный металл в лунке вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток, откуда выносятся рабочей жидкостью. Иногда для улучшения его удаления применяют прокачку рабочей жидкости. Чем более вязкая рабочая жидкость, тем лучше она захватывает и уносит продукты эрозии.

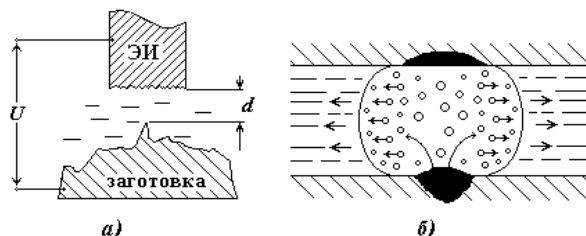


Рис. 2. Стадии пробоя:

а – образование узкого канала проводимости; б – образование вокруг канала проводимости газовой полости из паров жидкости и металлов, расширение канала проводимости и газовой полости в рабочую жидкость

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОПЕРАЦИЙ

2.1. Электроэрозионная отрезка (ЭЭОт)

ЭИ 2 перемещается по направлению к заготовке 1 со скоростью $V_{п.ЭИ}$; заготовка неподвижна. ЭЭОт выполняют в ванне с РЖ (с вибрацией ЭИ или без нее, рис. 3а).

ЭИ 2 вращается со скоростью $V_{в.ЭИ}$ и подается на заготовку со скоростью $V_{п.ЭИ}$. Заготовка жестко закрепляется на рабочем столе или вращается со скоростью $V_{в.з}$. РЖ подают поливом через сопло 3 или погружением в ванную с РЖ (рис. 3б).

ЭИ 2 (проволока или лента) движется со скоростью $V_{п.ЭИ}$ (рис. 3в).

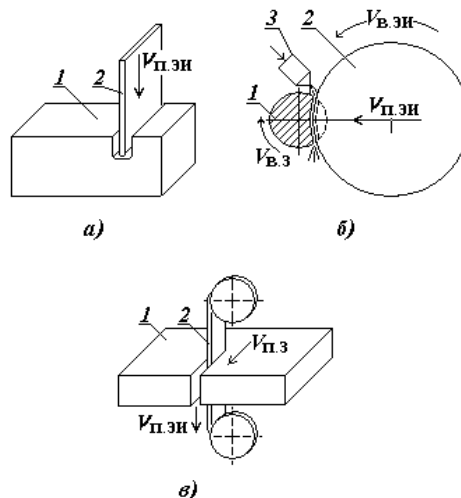


Рис. 3. Электроэрозионная отрезка

2.2. Электроэрозионное вырезание (ЭЭВ)

Операция ЭЭВ (рис. 4) обеспечивается перемещением заготовки 1, закрепленной на столе

4, по координатам X и Y со скоростями $V_{п.х}$ и $V_{п.у}$ и при движении проволочного ЭИ 2 относительно заготовки со скоростью $V_{п.эи}$.

ЭЭВ производится с погружением электродов в РЖ и поливом РЖ; перемещение заготовки по заданной траектории осуществляется по копиру 3, скрепленному с заготовкой через прокладку 5, по программе или фотошаблону.

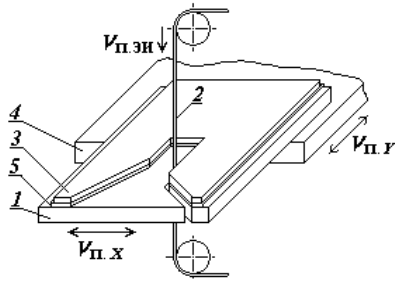


Рис. 4. Электроэрозионное вырезание

2.3. Электроэрозионное прошивание (ЭЭПр)

Происходит подача ЭИ 2 в направлении на заготовку 1 со скоростью $V_{п.эи}$, вращение ЭИ и заготовки со скоростями $V_{в.эи}$ и $V_{в.з}$ и вибрации ЭИ с частотой $f_{эи}$ (рис. 5).

Обработку производят прямым копированием в ванне с РЖ с одновременной прокачкой ее через ЭИ (или без прокачки); для стабилизации процесса обработка производится с вибрацией ЭИ; возможна обработка групповыми ЭИ.

ЭЭПр отверстий с криволинейной осью обеспечивается подачей ЭИ 2 относительно заготовки 1 со скоростью $V_{п.эи}$ и вибрацией с частотой $f_{эи}$.

Обработка производится прямым копированием в ванне с РЖ; прокачка РЖ через ЭИ используется редко; для стабилизации обработки ЭИ придают вибрацию.

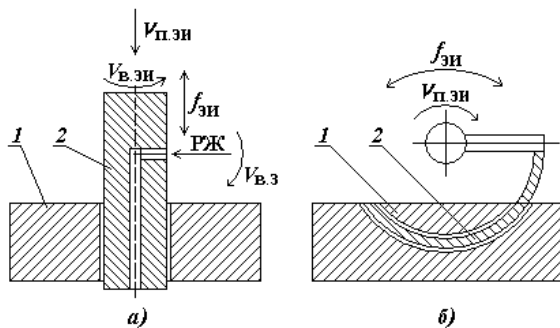


Рис. 5. Электроэрозионное прошивание

2.4. Электроэрозионное объемное копирование (ЭЭОК)

Одноконтурная схема обеспечивает подачу ЭИ 2 со скоростью $V_{п.эи}$ (рис. 6).

Обработка производится прямым копированием в ванне с РЖ с прокачкой (или без прокачки) ее через каналы 3 в ЭИ; для стабилизации обработки используют вибрацию ЭИ, а для повышения точ-

ности обработки – осцилляцию с окружной скоростью $V_{о.эи}$.

Многоконтурная схема работает от одного регулятора подачи; все движения аналогичны одноконтурной схеме; заготовка 1 неподвижна.

Блок ЭИ состоит из секций 2 и 6, изолированных прокладкой 4; обработка производится от одного или нескольких генераторов импульсов (ГИ); операция выполняется с погружением электродов в РЖ и прокачкой ее через каналы 3 и 5.

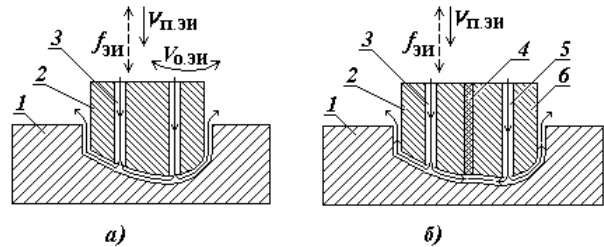


Рис. 6. Электроэрозионное объемное копирование

2.5. Электроэрозионное шлифование (ЭЭШ)

При электроэрозионном шлифовании происходит подача РЖ поливом через сопло 3.

Круглое ЭЭШ (рис. 7а) обеспечивается вращением ЭИ 2 с окружной скоростью $V_{в.эи}$, дискретной подачей в направлении заготовки со скоростью $V_{п.по.эи}$ и продольной возвратно-поступательной подачей $V_{п.пр.эи}$; заготовка 1 вращается с окружной скоростью $V_{в.з}$.

При плоском ЭЭШ (рис. 7б) необходимо обеспечить вращение ЭИ 2 с окружной скоростью $V_{в.эи}$, вертикальную дискретную подачу в направлении заготовки 1 со скоростью $V_{п.эи}$. Заготовка имеет продольное возвратно-поступательное перемещение со скоростью $V_{п.пр.з}$ и поперечное дискретное со скоростью $V_{п.по.з}$.

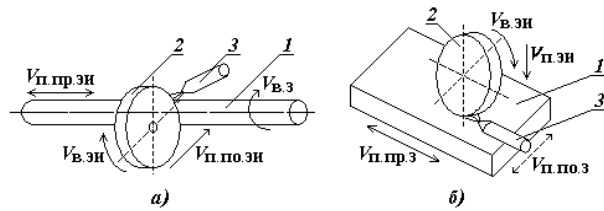


Рис. 7. Электроэрозионное шлифование:
а – круглое; б – плоское

2.6. Электроэрозионное маркирование (ЭЭМ)

Электроэрозионное маркирование производится аналогично электроэрозионному копированию, но без осциллирующего движения ЭИ.

2.7. Электроэрозионное упрочнение (ЭЭУ)

Ручное ЭЭУ обеспечивается вибрацией ЭИ 2 с частотой $f_{эи}$; контактирование ЭИ с заготовкой

1 обеспечивается ручным подводом электромагнитного вибратора 3 с закрепленным в нем ЭИ к заготовке и ручным перемещением инструмента (строчками) (рис. 8).

Межэлектродная среда – воздух или безокислительная газовая; шаг строчек не должен превышать 1/4 диаметра лунки. Данная операция осуществляется при необходимости изменения физико-химических свойств поверхностных слоев заготовок.

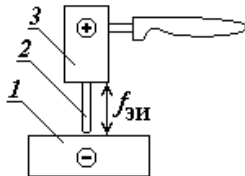


Рис. 8. Электроэрозионное упрочнение

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

1. Производительность Q – отношение объема или массы удаленного металла ко времени обработки. При разрезании и упрочнении под производительностью понимают отношение площади обработки (среза) ко времени обработки.

Производительность пропорциональна энергии импульса и частоте $Q = k \cdot W_{\text{и}} \cdot f$, где коэффициент пропорциональности не постоянен, а зависит от соотношения между амплитудой тока и длительностью импульса, а также от частоты. Для максимальной производительности необходимо достичь оптимального соотношения между $I_{\text{макс}}$ и $t_{\text{и}}$.

Для повышения производительности при электроэрозионной обработке применяют многоконтурную и многоэлектродную схемы обработки.

Типичные значения производительности $Q = 50 \div 500 \text{ мм}^3/\text{мин}$.

2. Точность – степень соответствия формы и размеров готовой детали чертежу. Точность определяется:

- точностью изготовления электрода-инструмента,
- эрозией инструмента,
- погрешностью обработки.

Типичные значения точности (технологический зазор δ , рис. 9):

- $\delta = 0,15 \div 0,5 \text{ мм}$, точность $0,01 \div 0,005 \text{ мм}$ при черновой обработке,
- $\delta = 0,05 \div 0,005 \text{ мм}$, точность $0,002 \div 0,005 \text{ мм}$ при чистовой обработке.

3. Качество поверхности определяется шероховатостью (высота неровностей). Высота неровности «R» зависит от глубины лунки и степени перекрытия лунок. Для лучшего качества поверхности нужно уменьшать энергию импульса и увеличивать частоту, а также уменьшать подачу. Существует эмпирическая зависимость высоты микронеровностей $R_{\text{макс}}$ от отношения средней силы тока $I_{\text{ср}}$ к частоте импульсов f при ЭЭО заготовок из стали углеродистой, низколегированной и жаропрочной на никелевой основе при медном ЭИ:

$$R_{\text{макс}} (\text{мкм}) = 20 \left(\frac{I_{\text{ср}}}{f} \right)^{0,54} = 20 (I_{\text{макс}} \cdot t_{\text{и}})^{0,54},$$

где единицы измерения $I_{\text{ср}} - \text{А}$, $f - \text{кГц}$, $t_{\text{и}} - \text{мс}$.

Средняя шероховатость $R_{\text{ср}}$ составляет:

- $0,3 \div 0,6 \text{ мкм}$ при чистовой обработке сталей,
- $0,2 \div 0,3 \text{ мкм}$ – твердых сплавов,
- $20 \div 40 \text{ мкм}$ при черновой обработке,
- до 200 мкм при обдирке.

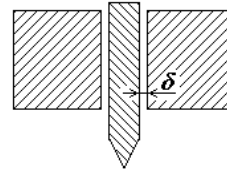


Рис. 9. Технологический зазор

4. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ

Рабочие жидкости должны удовлетворять целому ряду требований:

- при пробое важна диэлектрическая прочность жидкости, что обеспечивает малые пробойные межэлектродные промежутки;
- на стадии разряда существенной является способность связать и удалить разложившиеся вещества, не оставляя окисных и других пленок на электродах;
- после разряда особое значение имеет вязкость рабочей среды, которая способствует захвату продуктов эрозии. Одновременно с помощью рабочей среды осуществляется охлаждение рабочей зоны и предотвращение оплавления поверхности электродов;
- рабочая жидкость дополнительно должна иметь высокую температуру вспышки, низкую испаряемость, хорошую фильтруемость, отсутствие запаха и низкую токсичность.

В качестве рабочих жидкостей могут быть использованы:

1. Масло индустриальное И12А, И30А, И40А (вязкость $\nu = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$).
2. Смесь керосина с маслом И12А, 1:1, $\nu = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.
3. Сырье углеводородное, $\nu \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.
4. Трансформаторное масло, $\nu = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.
5. Рабочая жидкость РЖ-3, $\nu \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.
6. Рабочая жидкость РЖ-8, $\nu = (6 \div 8,5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Отметим, что керосин имеет вязкость $\nu = 0,018 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, вода – $\nu = 0,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для маркирования широко применяют РЖ – дизельное топливо.

Все эти рабочие жидкости по отношению к воде имеют существенно большую вязкость и меньшую коррозионную способность, но сильнее разлагаются и загрязняют электроды. Кроме того, они дороги.

5. ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ

ЭИ должен обеспечивать стабильную работу во всем диапазоне рабочих режимов и макси-

мальную производительность при малом износе. ЭИ должен быть достаточно жестким, суммарная деформация (усилия прокатки РЖ, температурная деформация и др.) не должна превышать 0,3 % допуска на основные размеры детали. Конструкция ЭИ должна быть технологичной, а стоимость – ниже стоимости основного изделия (штампа, пресс-формы и т. д.) не менее, чем в три раза. На поверхности ЭИ не должно быть вмятин, трещин, царапин, расслоения.

При обработке углеродистых инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе используют графитовые и медные ЭИ. Для черновой ЭЭО из этих материалов применяют ЭИ из алюминидовых сплавов и чугуна, а при обработке отверстий – ЭИ из латуни.

При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и других металлов применяют ЭИ из композиционных материалов, содержащих медь, вольфрам и другие добавки, так как при графитовых ЭИ не обеспечивается высокая производительность из-за низкой стабильности процесса, а ЭИ из меди имеют большой износ.

Электроды-инструменты для вырезки обычно изготавливают из вольфрамовой, молибденовой или латунной проволоки. Вольфрамовая проволока имеет большую удельную прочность, но низкую удельную проводимость и применяется при диаметрах проволоки $d_{пр} \leq 0,08$ мм. Молибден имеет большую проводимость, чем вольфрам, $d_{пр} \leq 0,1 \div 0,2$ мм; латунь и медь применяют при диаметрах $d_{пр} \geq 0,1 \div 0,3$ мм.

При прошивании электроды-инструменты изготавливают в виде стержней и трубок с отверстием для подачи рабочей жидкости (рис. 10).

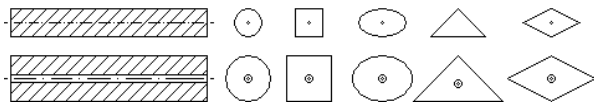


Рис. 10. Форма электродов-инструментов

6. ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ

В таблице приведены типовые технологические режимы, обеспечивающие оптимальную производительность, шероховатость и износ инструмента.

Технологические характеристики обработки твердого сплава ВК 8 электродом из латуни

$t_{ц}$, мкс	$I_{ср}$, А	f , кГц	Q , мм ³ /мин	R , мкм	S , мм ²
62	30	8	48	20	500
12	27	44	43,5	2,5	500
5	25	100	36,5	2,5	500
2,5	17	200	27	2,5	500
2,5	8	200	13	1,25	250
1,1	3	440	3,5–4	0,63	50
0,6	1,7	440	1,9	0,63	50

7. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Генераторы импульсов

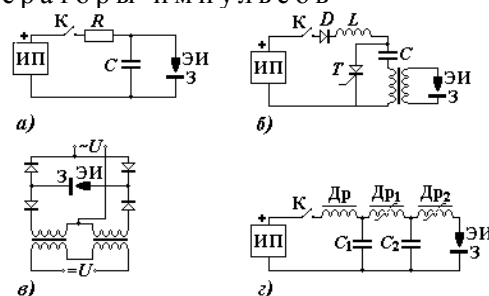


Рис. 11:

а – релаксационный RC-генератор, б – управляемый генератор, в – магнитно-насыщенный генератор, г – многозвенный магнитный генератор, ЭИ – электрод-инструмент, З – заготовка (деталь), К – коммутатор, ИП – источник питания

Типовые станки

- 4720М, МА4720У – настольный копировально-прошивочный, $Q = 70$ мм³/мин, $R = 0,4 \div 0,8$ мкм, точность – $0,03 \div 0,04$ мм, программное перемещение стола;
- 4К722АФ1, 4Д722В – копировально-прошивочный, координатный, особо высокой точности с адаптивно-программным управлением, $Q = 500$ мм³/мин, точность – $0,01 \div 0,02$ мм;
- 4П724ФЗМ – копировально-прошивочный с ЧПУ, $Q = 200$ мм³/мин, точность – $0,05$ мм;
- 4Б611, 4В611 – переносной для извлечения остатков сломанного инструмента, скорость углубления – до 15 мм/мин;
- 4531ФЗ – вырезной проволоочный для профильных деталей, поверхность среза ~ 40 мм²/мин;
- ЭФА – фотокопировальный станок, 20 мм²/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под ред. В. Н. Волосатова. Л.: Машиностроение, 1986. 719 с.
2. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Под ред. Е. Ф. Немилова. Л.: Машиностроение, 1989. 164 с.
3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В. П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 307 с.
4. Электроэрозионная обработка металлов / Под ред. Никашевича И. Т. Минск: Наука и техника, 1988. 216 с.