

## ВВЕДЕНИЕ

**Электроэропионные (ЭЭ) технологии** получили очень широкое распространение. В первую очередь это связано с новыми конструкторскими решениями ряда изделий с деталями сложнейшей формы малых и больших размеров, деталей из сверхпрочных материалов, обладающих высокой твердостью, большой вязкостью, плохой обрабатываемостью резанием и другими подобными свойствами.

В современном производстве резко повысились требования к точности, шероховатости и качественным характеристикам поверхностей деталей. Возросли темпы и объемы работ технологической подготовки производства (ТПП) и автоматизация этих работ. Подготовка к выпуску новой продукции диктует правила скорейшей подготовки и изготовления сложной технологической оснастки. Все указанное еще больше усложняется в условиях гибкого массового производства.

В целом ряде процессов механической обработки (резанием) получаемые технологические параметры близки к предельно возможным. Дальнейшее повышение производительности при получении требуемых качественных характеристик у обработанных деталей путем совершенствования механической обработки уже не представляется возможным.

Одна из альтернатив механической обработке в современном производстве — электрофизические и электрохимические методы размерной обработки материалов. Среди этих методов особое место принадлежит электроэропионному (электроискровому) методу, как особенно эффективному, хорошо исследованному и обеспеченному для исполнения соответствующим оборудованием.

Электроэропионные (ЭЭ) технологии и оборудование применимы во всех отраслях промышленности. При этом прогресс некоторых отраслей напрямую связан с активным применением ЭЭ процессов на этапах не только технологической подготовки производства, но и при серийном производстве различных деталей. Но особенно эффективны ЭЭ технологии в инструментальном производстве, поскольку для создания любого изделия необходима технологическая оснастка: штампы, пресс-формы, формы для литья, специальный инст-

румент. Изготовление такой оснастки на обычном металлорежущем оборудовании чрезвычайно трудоемко и сопряжено с использованием дополнительно дорогих ручных слесарно-доводочных работ.

По сравнению с механической обработкой ЭЭ технологии (ЭЭ обработка) имеют целый ряд существенных преимуществ:

1. Процесс обработки не зависит от характеристик обрабатываемого материала: твердости, прочности, вязкости и др. ЭЭ технологии применимы при изготовлении деталей из твердых сплавов, термообработанных, жаропрочных и нержавеющих сталей, чугунов, а также титановых, алюминиевых и медных сплавов, графита и других материалов, обладающих токопроводностью.

2. Технологические показатели обработки (точность, качество поверхности) во многих случаях превосходят возможности механической обработки. При изготовлении сложнейших деталей ЭЭ процесс сравнительно просто может обеспечить точность обработки  $\pm 0,001$  мм при шероховатости поверхности  $Ra = (0,02-0,08)$  мкм (~11–12-й классы по ГОСТ 2789-59).

3. При ЭЭ копировально-прошивочной обработке возможно копирование формы инструмента-электрода сразу по всей поверхности заготовки (в отличие от механической обработки резанием). Простая кинематика формообразования позволяет осуществлять операции, невыполнимые механической обработкой, например получение отверстий с криволинейной осью, в полости сложной конфигурации, в труднодоступных местах заготовки, глубокие отверстия сверхмалого диаметра и др.

4. Процессы не оказывают силового воздействия на деталь, что позволяет обрабатывать тонкостенные элементы различных деталей без их деформации, вырезать из тонкого материала (например, из фольги) элементы сложной формы с малыми перемычками, а также обрабатывать детали из хрупких материалов.

5. Применимы для обработки заготовок любых размеров и назначений: от миниатюрных деталей радиоэлектронной аппаратуры до штампов массой в несколько тонн, т. е. можно использовать ЭЭ технологии в самых различных отраслях промышленного производства.

6. Не требуют специальных инструментов, твердых сплавов, абразивных и других дорогостоящих материалов.

7. Определенные схемы ЭЭ обработки дают возможность изменения в нужном направлении физико-механических и химических свойств поверхностного слоя обрабатываемых деталей для повышения износостойкости, поверхностной твердости, коррозионной стойкости и др.

8. Легкая автоматизация процесса ЭЭ обработки, простота программирования выполнения на станках (с ЧПУ) сложнейших работ, возможность проводить работы на станках в безлюдном режиме.

9. Отсутствие заусенцев на деталях после обработки, что сокращает трудоемкость и ликвидирует ручной труд.

10. Исключительная эффективность в изготовлении сопрягаемых деталей типа матрица-пуансон и аналогичных с обеспечением микронного зазора в соединении. При этом их обработка на оборудовании с ЧПУ возможна по одной программе.

**11.** Концентрация операций при изготовлении деталей. На одном ЭЭ станке при одной установке детали одной ЭЭ операцией можно практически полностью обработать эту деталь (или ее основные элементы), исключив множество механических и ручных операций: фрезерование, сверление, координатную расточку, протягивание, координатное шлифование, разметку, опиловку, шабрение, шлифовку, полирование, доводку и др.

Одна ЭЭ операция (например, проволочно-вырезная) при изготовлении штампов заменяет до 13 механических и слесарных операций. При этом возможно снизить: стоимость оснастки в 10 раз, трудоемкость в 15 раз, энергоемкость в 7 раз, количество рабочих мест в 6–7 раз, затраты на инструмент в 14 раз, отходы металла, простой оборудования, количество используемого оборудования, затраты на основные фонды. А также улучшаются качественные характеристики оснастки, в частности стойкость и др.

**От автора.** За теплое и дружеское отношение и оказанную помощь в работе автор выражает сердечную благодарность и признательность уважаемым рецензентам К. М. Иванову, А. В. Титову и работникам ОАО «Завод Магнетон» В. М. Андрианову, Д. А. Игнатенко, Т. М. Баевой, А. А. Павлову, Р. Я. Тумарову.

ГЛАВА  
**1**

# ПРИНЦИПЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

**Р**азмерная обработка токопроводящих материалов направленным действием электрического тока была открыта в 1940-х гг. супругами Борисом Романовичем и Натальей Иосифовной Лазаренко. В поисках защиты от электрической эрозии (разрушения) в высоковольтных выключателях ими было сделано предположение: коль скоро металлические материалы подвергаются разрушению от образующихся при (замыкании) размыкании контактов выключателя электрических искр (действия тока), то нельзя ли обратить это явление на пользу, т. е. на размерное разрушение, обработку токопроводящих материалов.

Оказалось, что можно, если обеспечить прохождение электрических импульсов тока между двумя электродами, поместив их в среду определенной рабочей жидкости (РЖ). При этом один из электродов представляет обрабатываемую заготовку, а другой — инструмент. Если сообщить инструменту поступательное движение (по мере разрушения заготовки вглубь), то можно получить необходимую форму и размер «колодца» (формообразования), т. е. деталь необходимой формы [1].

Так был открыт новый способ обработки токопроводных материалов — электроэроздионная (электроискровая) обработка (ЭЭО). Уже в 1945–1946 гг. лицензии на использование этого метода обработки были приобретены Францией, Англией, США, Швецией, Швейцарией, и открытие получило всемирное признание.

В дальнейшем над совершенствованием процесса электроэроздионной обработки, кроме супружеской пары Лазаренко, работали многие отечественные ученые, внесшие громадный вклад как в теорию процесса, так и в развитие его применения.

Термины и определения ЭЭО регламентируются ГОСТ 25331-82. По технологическим признакам установлены следующие виды ЭЭО: прошивание (ЭЭПр), вырезание (ЭЭВ), объемное копирование (ЭЭОК), отрезка (ЭЭОт), шлифование (ЭЭШ), доводка (ЭЭД), маркирование (ЭЭМ) и электроэроздионное упрочнение (ЭЭУ).

## 1.1. СХЕМА СЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ ЭЭО

**Электроэррозионная обработка** заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под действием электрических разрядов в результате электрической эрозии (ГОСТ 25331-82). Под **электрической эрозией** понимают разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между электродами электрических разрядов. При этом различают электрод-инструмент (ЭИ) и электрод-заготовку (ЭЗ). Для осуществления процесса между электродами всегда должен быть зазор, который определяется как межэлектродный промежуток (МЭП) и как межэлектродный зазор (МЭЗ).

**Межэлектродный промежуток (МЭП)** — пространство, заключенное между взаимодействующими поверхностями электрода-инструмента и электрода-заготовки (детали) при обработке.

**Межэлектродный зазор (МЭЗ)** — расстояние в рассматриваемом месте межэлектродного промежутка между поверхностями электрода-инструмента и электрода-заготовки (между отдельными выступами шероховатостей), перпендикулярными направлению подачи.

Съем материала при ЭЭО осуществляется рабочими импульсами. **Рабочий импульс** — импульсный разряд, производящий съем металла вследствие электрической эрозии и характеризующийся прохождением через межэлектродный зазор импульса электрического тока под напряжением, изменяющимся во время импульса.

Импульсы тока при ЭЭО формируются специальным генератором и подаются на два элемента-электрода: электрод-инструмент (ЭИ) и электрод-заготовку (ЭЗ). То есть генератор создает импульсы в электрической цепи, состоящей из нагрузки (электроды) и линий связи (рис. 1.1).

Электроды (заготовка-инструмент) помещены в рабочую жидкость (РЖ) — диэлектрик (как вариант — в среду жидких углеводородов). В простейшем варианте схемы (рис. 1.1) ток от источника 4 переменного тока промышленной частоты подается на выпрямитель 3 и далее на обкладки конденсатора 6, который заряжается. Токоограничивающий конденсатор 5 является предохранительным элементом.

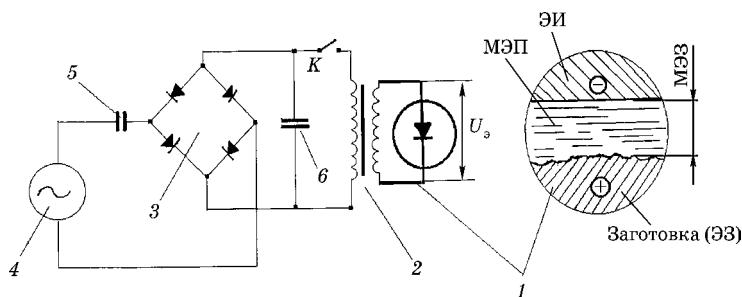


Рис. 1.1

Электрическая схема для осуществления ЭЭ процесса:

1 — электрод-инструмент и электрод-заготовка; 2 — трансформатор; 3 — выпрямитель; 4 — источник тока; 5, 6 — конденсаторы.

Разряд конденсатора 6 на первичную обмотку трансформатора 2 осуществляется ключом К. В качестве ключа может быть использован тиристор или какой-либо электронный элемент. Вторичная обмотка трансформатора подключена к электроду-инструменту и электроду-заготовке 1, между которыми, как указывалось, существует зазор, заполненный РЖ. Таким образом, при замыкании ключа К между ЭИ и ЭЗ создается напряжение  $U_3$ , определяющее потенциальную энергию импульса.

Для разрушения (схема) материала должен произойти разряд между электродом-инструментом и электродом-заготовкой (рис. 1.2).

Осуществление разряда регламентируется приложенным к электродам напряжением, временем формирования импульса, состоянием РЖ и величиной межэлектродного зазора.

Поскольку при ЭЭ обработке МЭП заполнен жидкостью средой, для прохождения импульса тока (разряда) необходимо, чтобы под действием тех или иных причин непроводящий слой жидкости превратился в проводник. Явление мгновенного превращения диэлектрика, заполняющего МЭП, в проводник называют пробоем межэлектродного промежутка, или процессом возникновения канала сквозной проводимости, или (более кратко) возникновения **стримера**.

Образование стримера обусловлено рядом процессов, протекающих в РЖ под действием внешнего электрического поля, возникающего приложении к электродам некоторой разности потенциалов. Считается [7], [9] и др., что одним из основных процессов является ударная или термическая ионизация вещества РЖ, заполняющей межэлектродный промежуток.

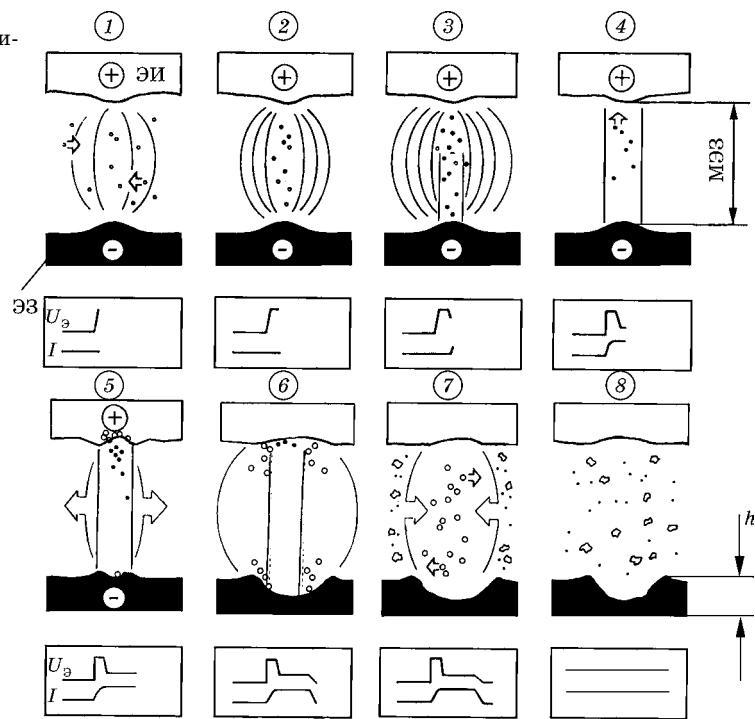
Как известно, в любом веществе всегда присутствует некоторое количество свободных носителей заряда (электроны и ионы), существование которых обусловлено рядом внешних факторов (космическое и ультрафиолетовое излучение и т. п.). Под действием электрического поля эти носители начнут двигаться в направлении градиента поля равноускоренно до тех пор, пока не произойдет соударение электрона или иона с молекулами вещества, при котором заряженная частица передаст часть своей энергии молекуле вещества и потеряет скорость.

Величина энергии, которую электрон или ион может передать нейтральной молекуле, пропорциональна величине падения потенциала, приходящегося на длину свободного пробега электрона или иона. Следовательно, чем больше величина напряжения, тем больше энергии электрон или ион передает встречной молекуле.

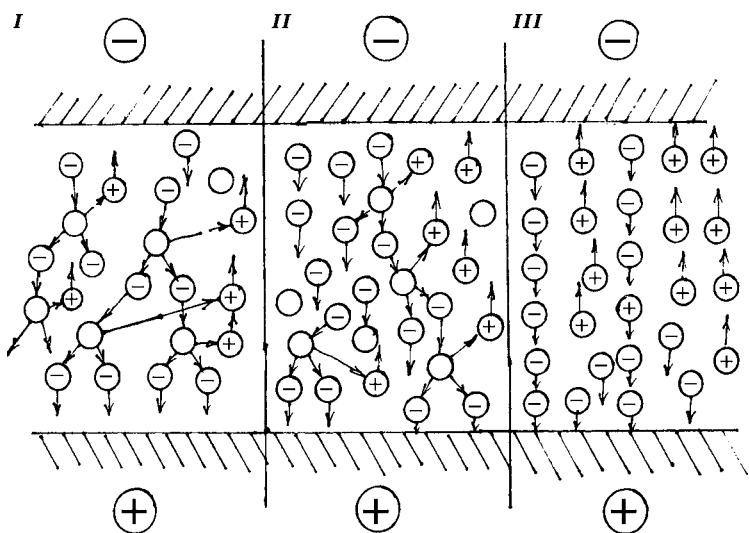
Длина свободного пробега электрона или иона зависит от плотности, температуры и давления среды, т. е. при прочих равных условиях с ростом напряжения на электродах будет расти и доля падения потенциала, приходящаяся на длину свободного пробега.

При некотором значении напряжения на электродах достигается такое состояние, при котором электрон может передавать встречной нейтральной молекуле энергию, достаточную для ионизации, т. е. из молекулы атома жидкости будет выбит хотя бы еще один электрон, который, как и первый, произведет ионизацию, и т. д. Произойдет лавинообразное нарастание числа новых носителей зарядов, что, наконец, приведет к перекрытию всего промежутка

**Рис. 1.2**  
Схема работы электрического импульса



**Рис. 1.3**  
Схема образования стримера



каналом, состоящим из свободных ионов и электронов и, следовательно, обладающим проводящими свойствами (рис. 1.3), т. е. образуется стример.

Естественно, что при данном МЭП характер процесса образования стримера зависит от многих факторов: от свойств, характера состояния РЖ, от степени ее загрязненности продуктами эрозии, от свойств поверхности электродов, от их материала и др. Это и определяет напряжение  $U_{\text{стр}}$  пробоя промежутка

между электродами (создание стримера) как  $U_{\text{стр}} = U_{\text{по}} \pm \Delta U$ , где  $U_{\text{по}}$  — среднее напряжение пробоя при данном МЭЗ,  $\Delta U$  — колебания напряжения из-за различных факторов.

Одним из важнейших свойств РЖ является степень электропроводности ее в нейтральном состоянии, иначе говоря, степень исходной ионизации. Если в процессе ЭЭ обработки искусственно менять степень ионизации РЖ, то можно успешно влиять на главнейшие параметры ЭЭ процесса — производительность, точность и шероховатость образующейся поверхности. Естественно, что при этом должны меняться система и характер подачи импульсов, их энергия и др.

Таким образом схема разряда при ЭЭ обработке определяется следующими стадиями (см. рис. 1.2). Приложение к электродам напряжения  $U_s$  (поз. 1, 2, рис. 1.2), в МЭЗ (при определенном его размере) образуется стример (поз. 3, рис. 1.2), что указывает на начало образования сквозной проводимости между электродами.

Взвешенные частицы рабочей жидкости ионизируются под действием  $U_s$  и устремляются от заготовки (ЭЗ) в сторону ЭИ (поз. 4, рис. 1.2).

Идет образование канала сквозной проводимости, создаются напряжения, которые и обеспечивают условия для прохождения разряда по траектории стримера по наикратчайшему расстоянию между поверхностями ЭИ и электродом-заготовкой.

Процесс образования стримера обычно длится очень короткое время, и прекращение МЭЗ проводящим каналом занимает не более  $10^{-8}\text{--}10^{-7}$  с. Как только стример достигнет поверхности заготовки (создан канал сквозной проводимости), следует разряд электрического импульса на поверхность заготовки (поз. 5, рис. 1.2). В результате разряда импульс тока, обладая энергией  $W_i$ , осуществляет работу (поз. 6, рис. 1.2), и локально приложенная к поверхности заготовки энергия импульса доводит в месте пробоя поверхность материала (металла) до высочайшей температуры. Поэтому происходит расплав металла и под действием электродинамических сил бризантный выброс его капли (поз. 7, рис. 1.2). Поток РЖ удаляет из зазора образовавшийся шлам.

В процессе взрыва и термодинамических явлений образуется атомарный спектр всех веществ, участвующих в процессе работы (РЖ, материал заготовки и инструмента). На поверхности детали возникла чаша (лунка глубиной  $h_a$ ), произошел съем материала, суть электроэрозионной обработки (поз. 7, рис. 1.2).

После прохождения импульса напряжение между электродами отсутствует, происходит деионизация рабочей среды (поз. 8, рис. 1.2). Вновь приложенное к электродам  $U_s$  создает предпосылку к образованию следующего разряда электрического импульса и т. д. Осуществление совокупности прохождения электрических разрядов от ЭИ к электроду-заготовке с определенной частотой их следования и реализует процесс ЭЭО.

Таким образом, повторение импульсов в различных точках инструмента (в точках наименьших МЭЗ) обеспечивает съем материала последовательно, слоями путем образования лунок.

Электрические свойства столба разряда как элемента электрической цепи довольно сложны [1], [2], [4], [7], [9] и др. В первом приближении его можно представить источником постоянной противоЭДС с напряжением 18–25 В. В на-

чальной стадии разряда напряжение на промежутке между электродами составляет порядка 18–25 В, а ток, протекающий по стримеру, определяется параметрами источника питания (генератора) и величиной противоЭДС.

Требования, предъявляемые к источнику питания ЭЭ станка, реализующего ЭЭ процесс:

- сформировать импульсы напряжения с амплитудой, большей напряжения образования стримера, т. е. должно удовлетворяться условие  $U_{\text{э(ген)}} \geq U_{\text{стр}} + \Delta U$ , где  $U_{\text{э(ген)}}$  — напряжение холостого хода генератора;
- обеспечить поступление энергии в МЭЗ в количествах, необходимых не только для развития процесса образования стримера, но и после его образования (когда нагрузкой генератора является рассмотренная выше противоЭДС) поддерживать в течение заданного времени необходимую величину тока через МЭЗ.

Энергия, выделяющаяся в МЭЗ,  $W_i = \int_0^{t_i} i(t)u(t)dt$ , где  $W_i$  в Дж;  $i(t)$  — ток через МЭЗ (по стримеру), А;  $u(t)$  — напряжение на МЭЗ, В;  $t_i$  — длительность импульса, с.

## 1.2. СВЕДЕНИЯ О ЕДИНИЧНОЙ ЛУНКЕ

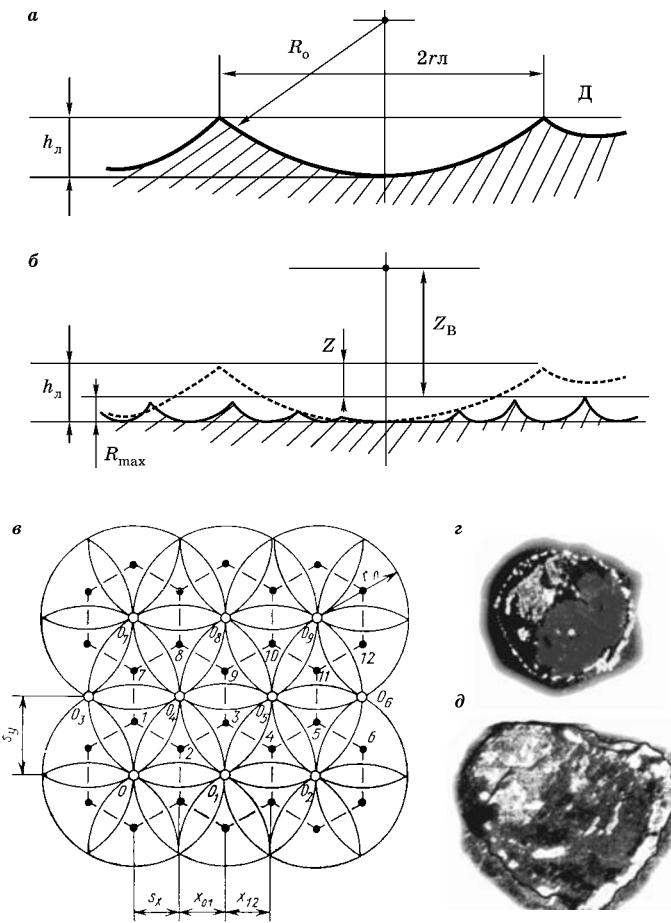
Процесс электроэррозии (удаление металла с поверхности электрода), определяемый выделившейся при разряде электрического тока энергией  $W_i$ , можно условно разделить на три стадии:

- получение энергии электродами;
- реализация этой энергии на фазовые превращения;
- удаление части металла с электродов.

Весь процесс ЭЭО характеризуется сложными явлениями различного характера: элементарными процессами в канале разряда и на электродах, т. е. ионизацией и движением заряженных частиц в канале разряда и в приэлектродных областях; тепловыми процессами — процессами распространения тепла; газо- и гидродинамическими явлениями; термомеханическими процессами и др. И все это обеспечивает получение за каждый разряд единичного следа на обрабатываемой поверхности — **единичной лунки** (см. рис. 1.4а) и совокупности таких лунок, как результат ЭЭО (рис. 1.4б).

Единичные лунки характеризуются радиусом  $R_o$ , глубиной  $h_l$  и их соотношением  $K = R_o/h_l$ . В принципе эти параметры определяют основные данные любого ЭЭ процесса — производительность, шероховатость обработанной поверхности и точность обработки. Размеры образующихся при ЭЭО лунок зависят от множества факторов: энергии  $W_i$  и длительности импульса, величины МЭЗ, состава и состояния РЖ, материала и полярности включения электродов, формы подаваемых импульсов, качественных характеристик ЭЭ оборудования, уровня его систем регулирования и управления и др.

Условно можно допустить, что после первого прохода на поверхности Д детали (рис. 1.4а) появляется волна углублений (лунок) с радиусом  $R_o$ . При этом удаляется материал заготовки в объеме каждой лунки, определенный глубиной  $h_l$ .

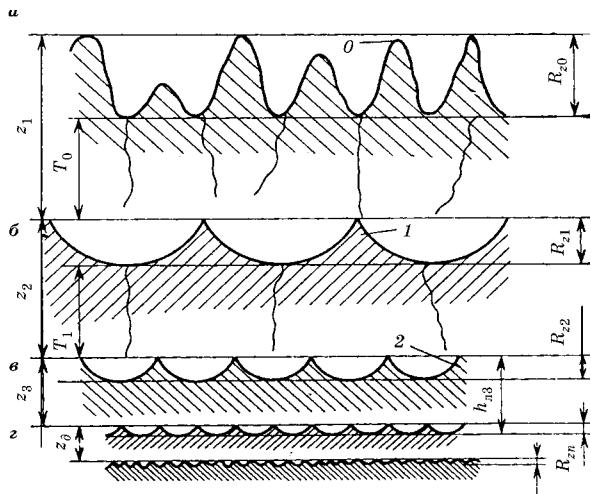


**Рис. 1.4**  
Параметры лунки, полученной при единичном разряде:

*а* — теоретический профиль; *б* — схема образования новой поверхности после удаления слоя металла; *в* — вид сверху на обработанную поверхность; *г, д* — фотографии лунок, образовавшиеся при обработке (*г* — сталь 4Х13 ( $\times 35$ );  $I_{\text{cp}} = 50 \text{ A}$ ;  $f = 1 \text{ кГц}$ ; *д* — сталь Ст 3 ( $\times 70$ );  $I_{\text{cp}} = 20 \text{ A}$ ;  $f = 1 \text{ кГц}$ ).



**Рис. 1.5**  
Профилограммы единичных лунок, полученных в стали (*а*), алюминии (*б*) и латуни (*в*), обработанных электроэррозионным способом на режимах:  
1 —  $I_{\text{cp}} = 2 \text{ A}$ ;  $f = 66 \text{ кГц}$ ; 2 —  $I_{\text{cp}} = 20 \text{ A}$ ;  $f = 1 \text{ кГц}$ ; 3 —  $I_{\text{cp}} = 50 \text{ A}$ ,  $f = 1 \text{ кГц}$ .



**Рис. 1.6**  
Теоретическая схема удаления материала заготовки последовательными проходами при электроэррозии

При втором проходе (рис. 1.4б), если разряды приходятся на вершины первоначальной волны, происходит уже съем слоя металла величиной  $z$  с образованием поверхности с шероховатостью  $R_{\max} = R_0 - z_b$ .

Естественно, что лункообразование происходит по всей обрабатываемой поверхности с образованием на ней своеобразной поверхности из сети лунок (см. рис. 1.4в). После удаления второго слоя металла впадины поверхности (дно лунок 0, 0<sub>1</sub>, 0<sub>2</sub>, 0<sub>3</sub>, 0<sub>4</sub> и т. д.) располагаются в центре своеобразных шестиугольников, образованных выступами на поверхности с примерным шагом  $S_x$ ,  $X_{01}$ ,  $X_{12}$  и т. д. (точки 1, 2, 3, 4 и др.). Естественно, что сказанное справедливо для теоретических рассуждений с определенными допущениями [7], [9] и др.

На практике реальный вид как единичной лунки, так и поверхности отличается от теоретического (рис. 1.4в–д и рис. 1.5). Это обуславливает отличие ряда расчетных (теория) данных по ЭЭО от реальных (практика), составляющее 20–30% и более. Однако теоретическое осмысление ЭЭ процесса позволяет иметь его качественную характеристику и дает реальные и четкие направления для ведения и регулирования ЭЭО на практике.

Размер образуемой лунки во многом зависит от энергии действующего импульса. Так, для определения параметра шероховатости  $R_z$  совокупности лунок с учетом их наложения при массовом воздействии разрядов можно использовать формулу [9]:

$$R_z = \beta^2 / 3 \cdot k \cdot \sqrt[3]{W_n},$$

где  $\beta$  — коэффициент перекрытия лунок,  $\beta = 1,2$ ;  $k$  — коэффициент, зависящий от материала электрода и длительности импульса.

Таким образом, обработку поверхности материала при электроэррозии можно представить последовательным воздействием на эту поверхность электрических импульсов различной мощности, в результате которого удаляются последовательно слои материала и исходная шероховатость поверхности ( $R_{z_0}$ ) (рис. 1.6а) постепенно уменьшается (через стадии  $R_{z_1}, R_{z_2}, R_{z_3}, \dots, R_{z_n}$ ) до шероховатости с параметром  $R_{z_n}$  (рис. 1.6б, в, г).

### 1.3. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ЭЭ ПРОЦЕССА

Изучением ЭЭО занималось много отечественных ученых, внесших определяющий вклад в вопросы физики и технологии ЭЭ процесса. Подробное изучение явлений воздействия электрического импульсного разряда в жидкой среде на различные материалы, определение качественных и количественных результатов этого воздействия для разных внешних условий, рассмотрение физической стороны ЭЭ процесса и многое другое выявило чрезвычайную сложность проблемы, неизученность многих ее сторон, скрывающих громадные потенциальные возможности этого уникального процесса обработки материалов.

Явления в межэлектродном промежутке, протекающие в процессе ЭЭО, весьма сложны и описываются в большинстве своем только качественно. Однако и из такого рода сведений был сделан ряд важных выводов для практики, вызвавших энергичное развитие технологии ЭЭО и ЭЭ оборудования.

Естественно, что данные по физическим основам ЭЭО представляют большой интерес для понимания сути ЭЭ процесса, для определения направлений его использования и совершенствования.

При исследовании ЭЭ процесса [9] зона МЭЗ, размером  $l_{\text{мэз}}$ , делится на три: анодную, катодную и зону столба разряда из-за существенного различия энергетических процессов, происходящих в этих частях (рис. 1.7).

Приэлектродные области  $l_{\text{k}}$  и  $l_{\text{a}}$  — тонкие прослойки, расположенные по границе между электродами и столбом разряда (размером  $l_{\text{c}}$ ). При размерной ЭЭО в большинстве случаев  $l_{\text{c}} \gg l_{\text{k}} + l_{\text{a}}$ . При этом полное падение потенциала МЭЗ во время разряда  $U_{\text{мэз}} = U_{\text{k}} + U_{\text{c}} + U_{\text{a}}$ , где  $U_{\text{k}}$ ,  $U_{\text{a}}$  — катодное и анодное падение потенциала;  $U_{\text{c}}$  — падение потенциала в столбе разряда.

Род и характер движения элементарных частиц в указанных частях МЭЗ достаточно различны. В анодной области  $l_{\text{a}}$  и в столбе разряда  $l_{\text{c}}$  перенос тока, главным образом, осуществляется электронами, поскольку ионы «медленно» диффундируют к катоду. В катодной области наблюдаются движение и перенос тока двумя видами частиц: ионы движутся к катоду, а электроны, эмитируемые с катода и образующиеся в канале разряда, движутся в противоположном направлении, т. е. к аноду. Электронный ток обеспечивается термоэмиссией; наблюдается также холодная эмиссия под действием приложенного поля и за счет местного искажения поля подходящими к катоду ионами.

Разделение зоны МЭЗ на три области позволяет энергию импульса  $W_{\text{i}}$  представить тремя составляющими, т. е. энергиями  $W_{\text{a}}$ ,  $W_{\text{k}}$  и  $W_{\text{c}}$ , выделяющимися на аноде, катоде и столбе разряда:  $W_{\text{i}} = (W_{\text{a}} + W_{\text{k}}) + W_{\text{c}}$ . Энергия, выделяющаяся на электродах,  $W_{\text{e}} = W_{\text{a}} + W_{\text{k}}$ .

Даже такое простое (на вид) теоретическое представление энергетической модели действия разряда при ЭЭО показывает возможные направления совершенствования ЭЭ процесса. Например, для увеличения производительности необходимо создать условия для максимального значения  $W_{\text{a}}$  — энергии, выделяемой на аноде, а для уменьшения износа катода (для уменьшения угара катода) следует стремиться к уменьшению количества энергии, выделяемой

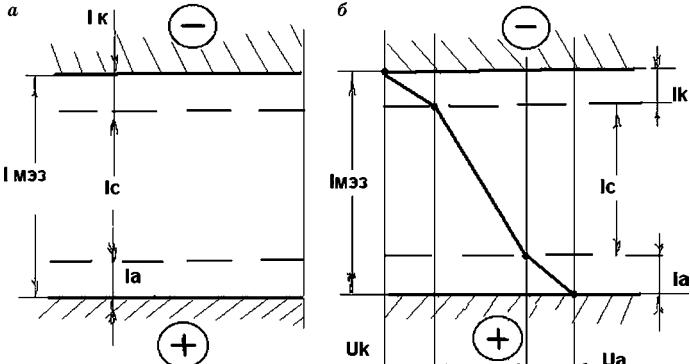


Рис. 1.7  
Зоны канала разряда (а) и распределение потенциала в канале (б)

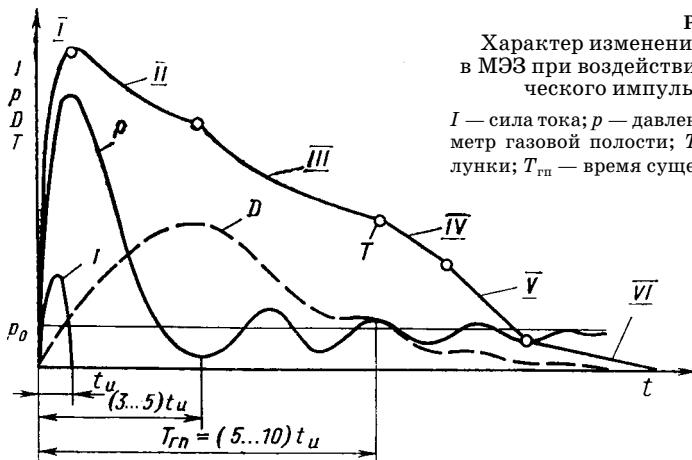


Рис. 1.8  
Характер изменения различных параметров в МЭЗ при воздействии на поверхность электрического импульса длительностью  $t_u$ :  
 I — сила тока;  $p$  — давление в газовой полости;  $D$  — диаметр газовой полости;  $T$  — температура поверхности лунки;  $T_{\text{пп}}$  — время существования газовой полости.

на катоде. Естественно, что это справедливо для случая работы при нормальной полярности, где анод — это заготовка, а катод — это инструмент.

Исследования процесса дают и много других результатов, полезных для практики. Так, например, установлено, что с увеличением МЭЗ доля энергии  $W_c$  увеличивается, но она падает при увеличении длительности разряда. В первом случае это снижает энергию, выделяющуюся на электродах (для производительности это хуже), а во втором — увеличивает (для производительности это лучше). Отсюда и такой вывод — уменьшение МЭЗ и увеличение длительности разряда снижает энергоемкость процесса [2], [7], [9].

Энергия импульса тока  $W_u$ , распределяясь между анодом, катодом и столбом разряда, выделяется в течение весьма короткого времени ( $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с) при высоких плотностях (рис. 1.8).

В результате происходит удаление металла с обрабатываемой заготовки, изменение структуры и свойств поверхностного слоя, образование внутренних напряжений, изнашивание электрода-инструмента, разложение РЖ и другие физические явления.

За счет энергии, созданной импульсом тока при его прохождении стримера, и за счет других факторов на поверхности электродов создается температура 4000–5000°C (см. рис. 1.8, ступень I) и более за время  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с в зависимости от длительности импульса  $t_i$ . Поэтому материал анода (катода) не только плавится в зоне действия импульса, но и частично испаряется, переходя в парообразное состояние. Окружающая канал разряда РЖ также мгновенно испаряется, образуя газовую полость. В начальный момент скорость движения границы газовой полости достигает 200 м/с, а давление — сотен атмосфер, поэтому материал электродов испытывает и значительное механическое давление.

После окончания действия импульса тока газовая полость продолжает расширяться (рис. 1.8, ступень II), растет ее диаметр  $D$ , что наряду с конденсацией паров материала электродов приводит к быстрому падению давления внутри полости до значения ниже атмосферного ( $P_0$ ). Когда размеры газовой полости приближаются к наибольшему значению (рис. 1.8, конец ступени II), а давление в ней к наименьшему, расплавленный перегретый материал электродов (в частности, анода), который находится в образовавшейся лунке, вскипает и выбрасывается из нее. При этом реактивная струя паров материала выдавливает из лунки жидкий материал, который, застывая, образует вокруг лунки окаймляющий валик. Выброс этой дополнительной порции материала происходит через некоторое время (примерно через 3–5  $t_i$ ) после окончания действия импульса с временем действия  $t_i$ .

Далее охлажденная поверхность лунки принимает окончательную форму (рис. 1.8, ступень III).

Затем процесс воздействия единичного импульса завершается (рис. 1.8, ступени IV, V, VI).

Вышеизложенное позволяет представить ЭЭО как обработку поверхности заготовки своеобразными микровзрывами, в которых сочетается тепловое и ударное воздействие на материал. Но приоритет при этом все же принадлежит тепловому температурному воздействию.

**Основные компоненты энергии, поступающие на электроды.** Процесс выделения энергии на электродах осуществляется, в основном, за счет движения заряженных частиц под действием электрического поля и их теплового движения.

В общем можно выделить следующие составляющие процесса как доли энергии  $W_{ак}$ , поступающие на электроды (а и к) в зависимости от разных факторов:

- электронную компоненту ( $W_{ae}$ );
- ионную компоненту ( $W_{ki}$ );
- термическую газокинетическую компоненту, определяемую бомбардировкой электродов частицами, составляющими канал разряда ( $W_{at}$ ,  $W_{kt}$ );
- факельную компоненту ( $W_{af}$ ,  $W_{kf}$ );
- компоненту теплового излучения — лучистая компонента ( $W_{ai}$ ,  $W_{ki}$ );
- объемную компоненту ( $W_{a\text{об}}$ ,  $W_{k\text{об}}$ ).

**Электронная компонента** (бомбардировка анода электронами). Ток на аноде является чисто электронным. Значение  $W_{ae}$  определяется суммарным действием всех электронов, пришедших на анод за время действия импульса,

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)