

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет ИТМО»

# ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## Лекция 14

Преподаватель: Помпеев Кирилл Павлович  
канд. техн. наук, доцент ФСУиР  
e-mail: [kir-pom@mail.ru](mailto:kir-pom@mail.ru), [kppompeev@itmo.ru](mailto:kppompeev@itmo.ru)

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Общие сведения

Современные электрохимические и электрофизические методы обработки (ЭХ и ЭФ МО) материалов основаны на электрохимических, электрофизических, светолучевых и иных явлениях, исследуемых теоретической физикой.

Эти явления используются в практических целях для обработки заготовок и изготовления деталей как из обычных конструкционных, так и из высокопрочных и труднообрабатываемых металлических и неметаллических материалов.

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Общие сведения

ЭХ и ЭФ МО используются, как для непосредственного выполнения операций, так и для интенсификации операций, выполняемых традиционными методами резания.

В ряде случаев ЭХ и ЭФ МО являются наиболее эффективными и экономичными или вообще единственно возможными.

ЭХ и ЭФ МО могут быть размерными (обеспечивающими заданные размеры и форму) и безразмерными (отделочными).

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Общие сведения

К технологическим особенностям и достоинствам ЭХ и ЭФ МО по сравнению с традиционными следует отнести:

- бесконтактность обработки;
- широкие технологические возможности по обработке заготовок сложной формы, получению заданных размеров и шероховатости;
- меньшую зависимость режимов обработки от физико-механических свойств обрабатываемых материалов и влиянию на них;
- сравнительно простой и долговечный инструмент, а в ряде случаев его отсутствие;
- возможность автоматизации технологических процессов.

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Общие сведения

К недостаткам ЭХ и ЭФ МО следует отнести:

- сравнительно высокую энергоемкость технологических процессов;
- определенную громоздкость установок (в основном за счет специальных источников питания и оборудования для подготовки и подачи технологической среды);
- сложность их эксплуатации с учетом требований безопасности труда и пожароопасности.

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Классификация ЭХ и ЭФ МО

В зависимости от преимущественного характера воздействия электрического тока (электромагнитного поля) ЭХ и ЭХ МО разделяют на:

- электрохимическую обработку (ЭХО – химическое воздействие);
- электроэрозионную обработку (ЭЭО – тепловое воздействие):
  - электроискровую обработку;
  - электроимпульсную обработку;
  - электроконтактную обработку (ЭКО);
- лучевую обработку (тепловое воздействие):
  - электронно-лучевую обработку (ЭЛО);
  - лазерную обработку (ЛО);

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Классификация ЭХ и ЭФ МО

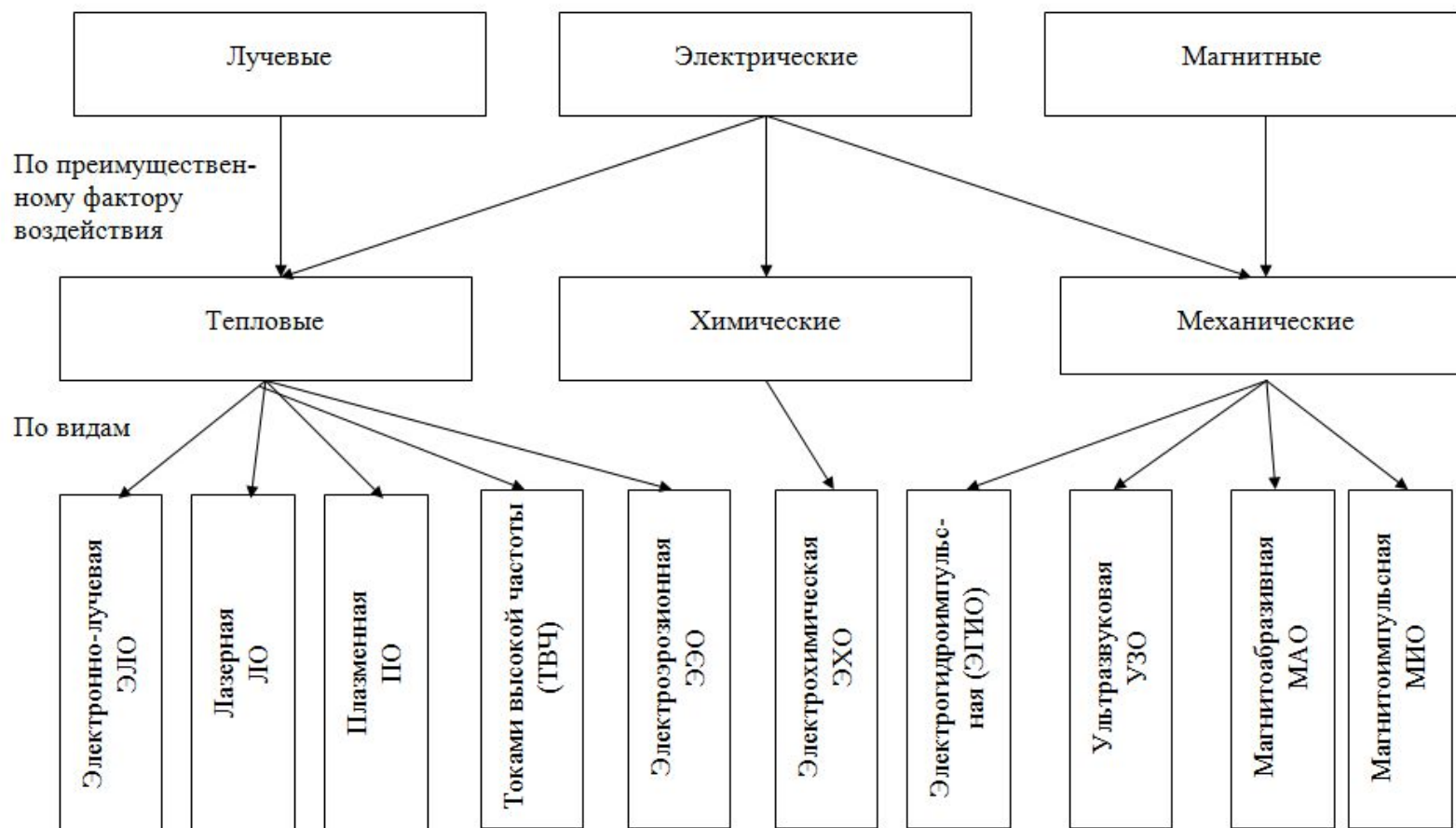
ЭХ и ЭХ МО разделяют на (окончание):

- высокочастотную обработку (ТВЧ – тепловое воздействие);
- магнитноабразивную обработку (МАО – механическое воздействие магнитного поля);
- ультразвуковую обработку (УЗО – механическое воздействие ультразвуковых колебаний);
- импульсную обработку (ИО – механическое воздействие поля):
  - электрогидроимпульсную обработку (ЭГИО);
  - магнитоимпульсную обработку (МИО);
- комбинированные методы обработки.

# Электрохимические и электрофизические методы обработки заготовок

## Классификация ЭХ и ЭФ МО

По непосредственной природе источника воздействия





# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

ЭХО использует анодное растворение металла заготовки.

Растворение (съем) металла происходит в результате электролиза материала электродов, соединенных с источником постоянного тока и погруженных в токопроводящий раствор – электролит.

Электрод, соединенный с положительным выводом источника тока, является анодом (заготовка).

Второй электрод (катод) соединен с отрицательным выводом источника тока и является инструментом.

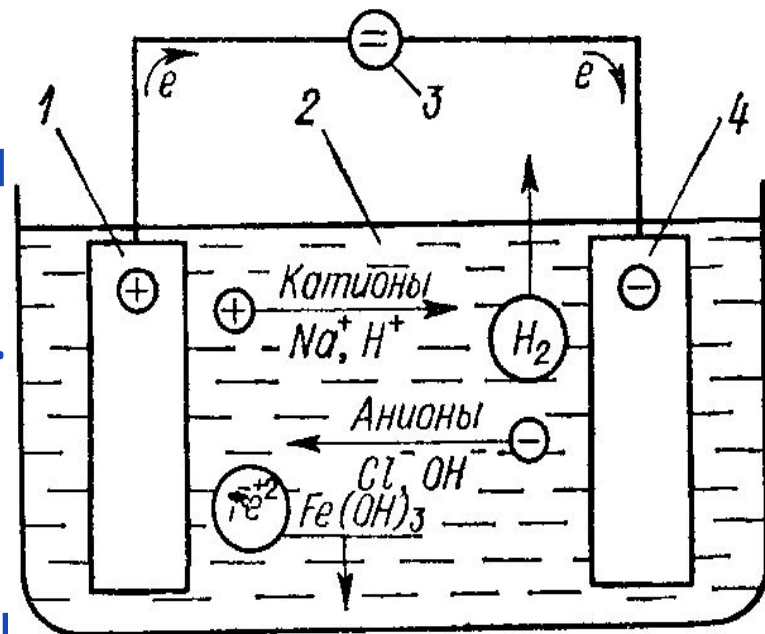
# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

При прохождении электрического тока через электролит происходит растворение анода и осаждение металла на катоде.

Используют такие электролиты которых катионы не доходят до катода и не осаждаются на нем.

При этом потенциал материала инструмента (катода) должен быть более положительным, чем потенциал осаждения катионов на инструменте.



1 – электрод-анод; 2 – электролит;  
3 – источник питания; 4 –  
электрод-катод

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

Только это обеспечивает сохранность формы электрода-инструмента.

Для стабилизации обработки и удаления снятого металла часто используют прокачку электролита между заготовкой и инструментом.

Для обеспечения устойчивости обработки необходимо создать течение электролита между заготовкой и инструментом, удаляющее снятый металл и газы, предотвращающее нагрев электролита.

Наибольшее влияние на точность обработки оказывает газосодержание электролита.

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

Исходя из этого, необходимо обеспечивать определенную скорость течения электролита.

Для этого электролит должен иметь определенное давление на входе в зазор между заготовкой и инструментом, обеспечивающее необходимую скорость его протекания.

Его определяют исходя из величины давления на выходе из зазора, принятого по условиям работы установки, и значения падения давления в зазоре.

Точность электрохимической обработки зависит как от обычных причин (погрешности технологической системы), так и от стабильности параметров процесса обработки – напряжения, электропроводности,

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

При высокой стабильности параметров установки ЭХО и зазорах  $\delta < 0,02$  мм достигается точность до 5 мкм.

При ЭХО шлифовании точность соизмерима с обычными методами.

Шероховатость поверхностей при ЭХО зависит от состава электролита, температуры, скорости его протекания и анодной плотности тока.

Электролизом получают шероховатость с  $Ra=2,5 \dots 0,63$  мкм, при комбинированных методах – до 0,02 мкм.

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

Снижение температуры электролита, повышение плотности тока и скорости подачи электролита снижают шероховатость.

Качество поверхности можно улучшить также введением в электролит сжатого воздуха под давлением на 50...100 кПа выше давления электролита.

Некоторые операции ЭХО осуществляют при неподвижных заготовке и инструменте (например, калибрование и маркировку), но большинство разновидностей ЭХО осуществляется при перемещении инструмента относительно заготовки<sub>14</sub>

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

При точении и абразивной обработке перемещают и заготовку, и инструмент.

При перемещении инструмента относительно заготовки используют непрерывный, циклический или импульсно-циклический режимы.

При непрерывном режиме обработки рабочая подача инструмента выполняется с постоянными скоростью и напряжением (требуется стабилизация напряжения в пределах 1...3 %).

В этом режиме обрабатываются отверстия и полости с точностью до 0,05...0,15 мм.

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

При циклическом режиме вначале без напряжения устана-вливают инструмент с зазором от заготовки на 0,2...0,5 мм.

Затем на 5...30 секунд подают напряжение и работают с рабочей подачей инструмента, снимая припуск.

Затем выключают напряжение и вновь выставляют зазор 0,2...0,5 мм и повторяют обработку.

Стабилизация напряжения может быть более грубой.

В этом случае обрабатываются поверхности сложной формы с точностью 0,15...0,8 мм.

Скорость подачи инструмента должна равняться



# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Физическая сущность процесса ЭХО

При импульсно-циклическом режиме инструмент без напряжения устанавливают с зазором от заготовки на 0,03...0,1 мм.

Затем в течение 0,1...0,8 секунд подается напряжение импульсной формы и происходит обработка.

После этого напряжение снимается, инструмент отводят и прокачивают электролит, затем цикл повторяется.

При такой обработке отсутствуют погрешности и не требуется стабилизация напряжения.

Обрабатываются поверхности сложной формы с

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Электролиты

В качестве электролитов в ЭХО используют:

- водные растворы кислот, солей и щелочей (хлориды, нитраты и сульфаты натрия и калия с добавками борной, лимонной или соляной кислот, ингибиторов коррозии);
- поверхностно-активные вещества (ПАВ), снижающие гидравлические потери (ОП-7, ОП-10 и др.);
- коагуляторы и т.д.

Электролиты обеспечивают прохождение электрического тока в зазоре между заготовкой и инструментом, необходимые химические реакции на

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Электролиты

Электролиты должны обладать следующими свойствами:

- иметь невысокую вязкость, быть нетоксичными, взрыво- и пожаробезопасными, некоррозиоактивными;
- не вступать в побочные реакции;
- обеспечивать анодное растворение металла заготовки только в зоне обработки (обладать локализирующей способностью).

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Инструменты ЭХО

Конструкция электрода-инструмента для ЭХО определяется:

- видом обработки;
- типом и материалом самого инструмента;
- его способом крепления и установки;
- размерами своих рабочих поверхностей;
- необходимостью электроизоляционного покрытия;
- механической прочностью.

Инструменты состоят из рабочих (активных) и пассивных поверхностей.

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Инструменты ЭХО

Активные элементы всегда токопроводящие, пассивные могут быть и непроводниками электрического тока.

Материал активных частей должен иметь малое удельное электросопротивление, коррозионную стойкость к действию электролита, высокую адгезию к электроизоляциям, механическую прочность, хорошую обрабатываемость.

Для выделения обрабатываемых поверхностей и концентрации обработки в нужных местах под инструментом и предотвращения влияния пассивных и конструктивных элементов нерабочие поверхности

# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Технологические процессы ЭХО

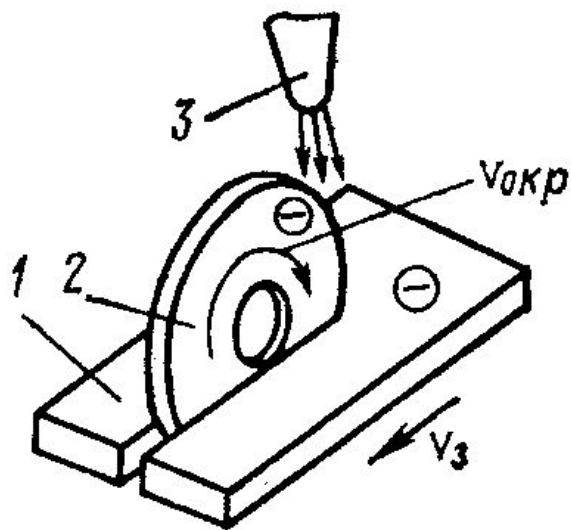
С помощью ЭХО могут реализовываться различные виды обработки:

- отрезка;
- объемное копирование;
- точение;
- прошивание;
- калибрование;
- удаление заусенцев;
- маркировка деталей;
- полирование;
- анодно-механическая отрезка;
- шлифование;
- заточка инструмента;
- доводка отверстий сложной формы;
- суперфиниширование, хонингование.

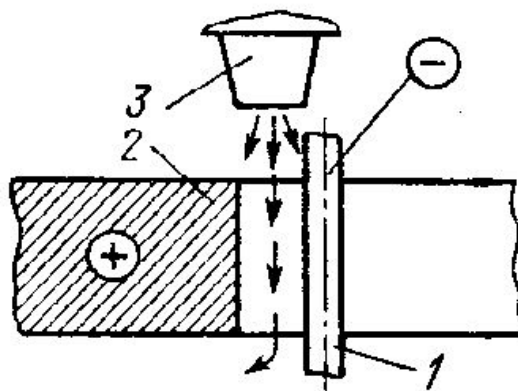
# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Схемы видов ЭХО

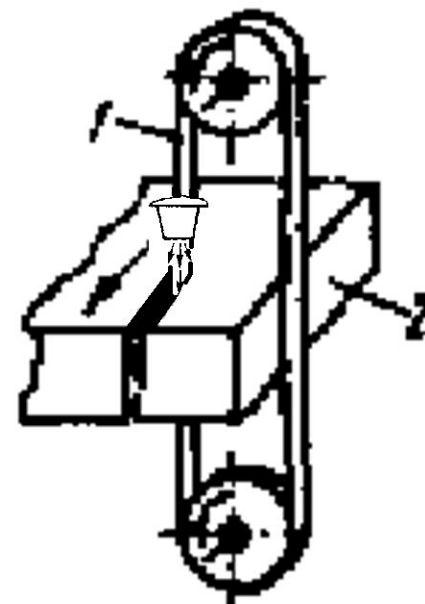
Отрезка  
металлическим  
диском, абразивным  
или алмазным кругом  
с электропроводной  
связкой



Отрезка  
металлической  
проволокой



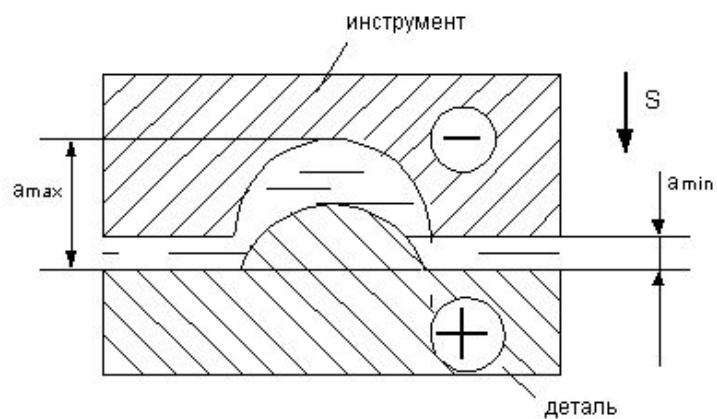
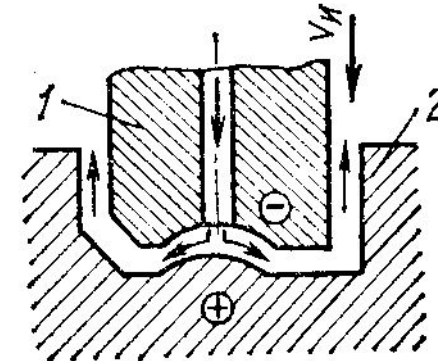
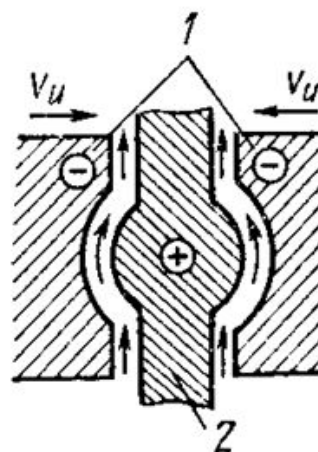
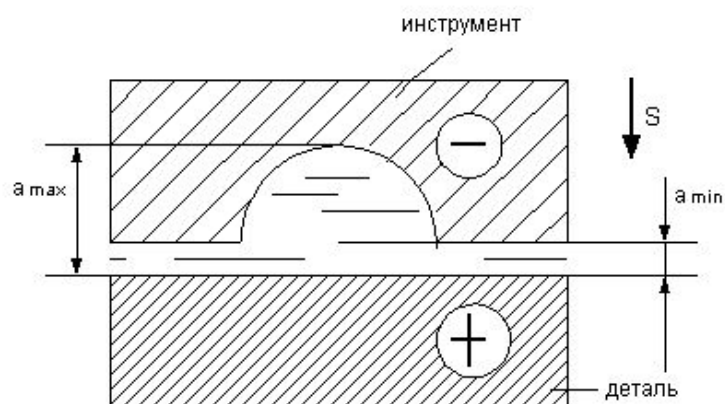
Отрезка  
металлической  
лентой



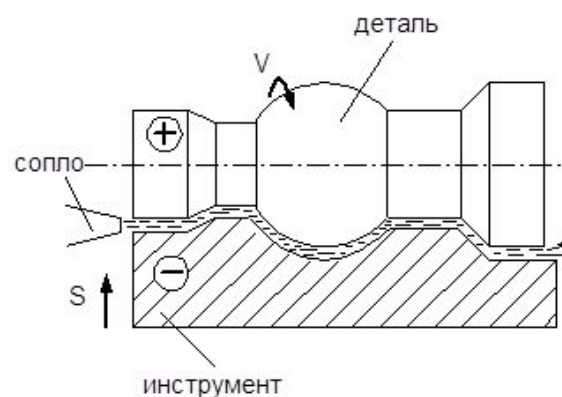
# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Схемы видов ЭХО

### Объемное копирование



### Точение

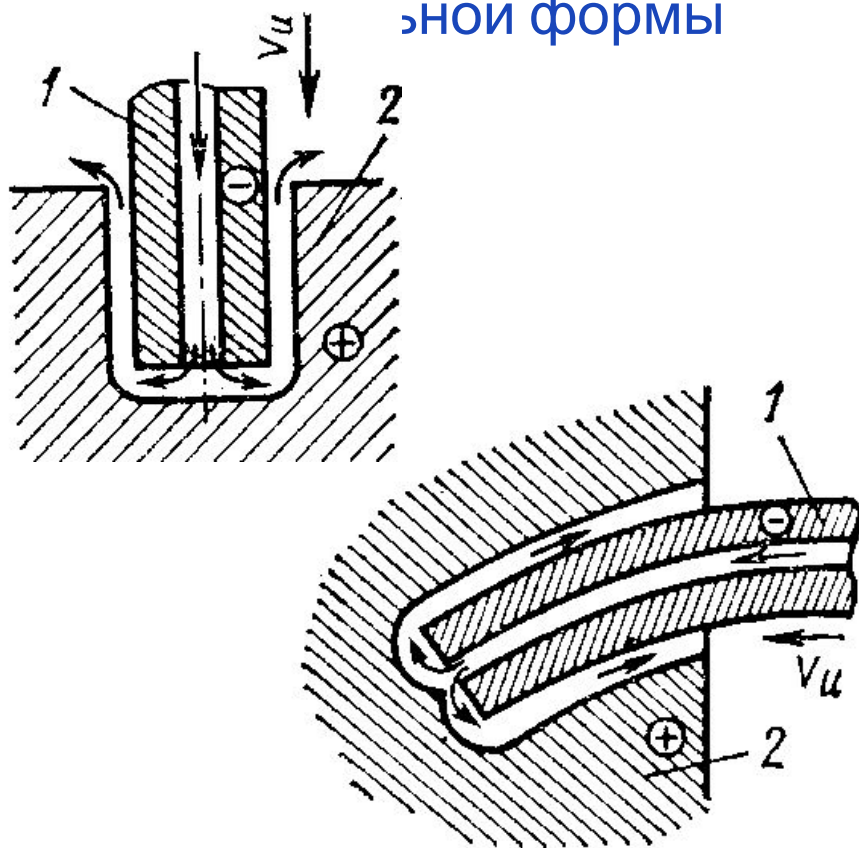




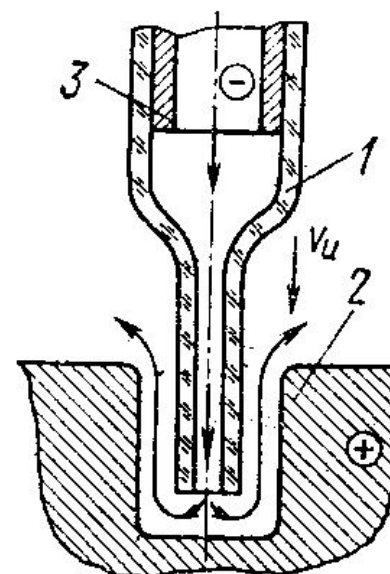
# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Схемы видов ЭХО

Прошивание сквозных и глухих отверстий  
эной формы



Прошивание сквозных и глухих отверстий малого диаметра струей электролита, по которой пропущен ток

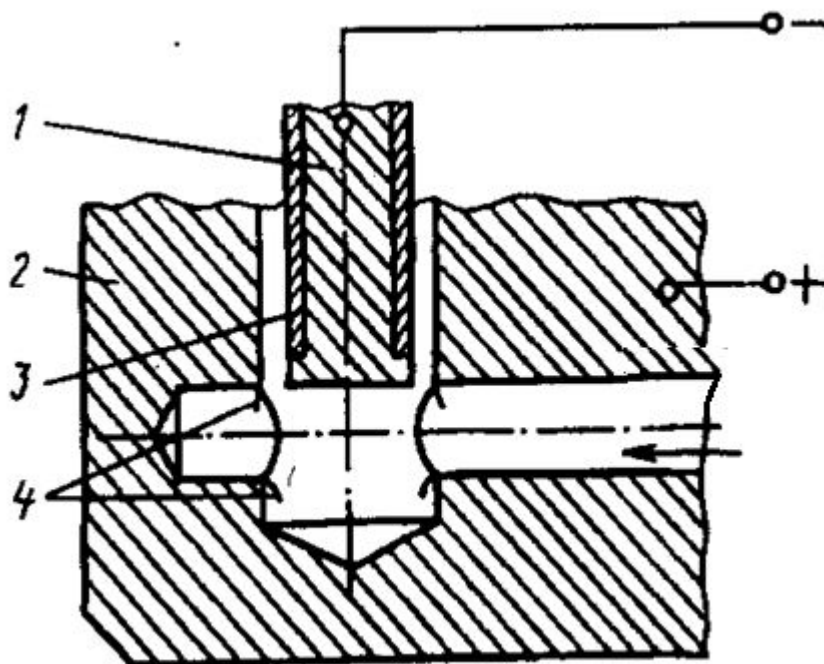


# Электрохимическая обработка (ЭХО)

## Схемы видов ЭХО

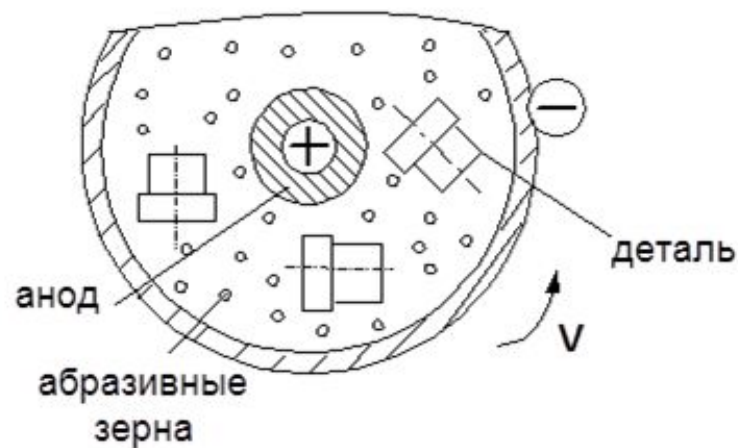
Удаление заусенцев в

отверстиях



1 – инструмент; 2 – заготовка;  
3 – изоляция; 4 – заусенцы

Электрохимическая  
галтовка деталей



# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Физическая сущность процесса ЭЭО

ЭЭО заключается в изменении формы, размеров, шеро-ховатости и свойств поверхности заготовки в результате электрической эрозии, возникающей при повторяющихся импульсных электрических разрядах между заготовкой и инструментом, погруженными в жидкость.

Разряд – импульс электротока в зазоре между заготовкой и инструментом, при котором в малых объеме и времени электроэнергия переходит в тепловую.

В канале разряда происходит нагрев, расплавление и выброс материала электродов, его выброс с

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

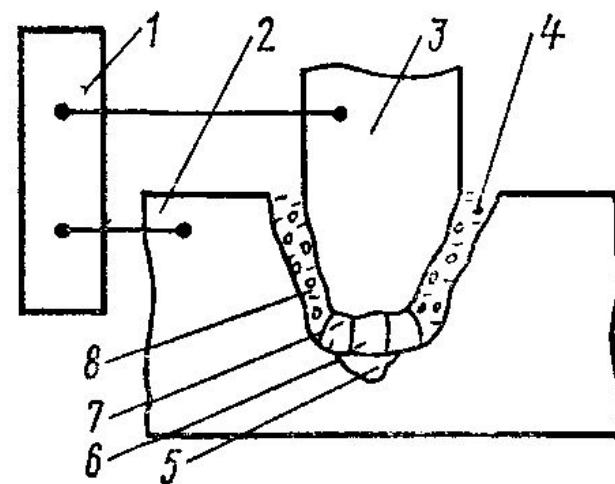
## Физическая сущность процесса ЭЭО

При этом образуются также волны, выносящие частицы заготовки из-под инструмента.

Рабочая жидкость в зазоре концентрирует действие разряда, сжимает его и делает более кратковременным.....

Гидродинамические силы выбрасывают частицы металла из зоны разряда.

Разряды инициируются вибрацией инструментов и импульсным питанием от источника тока.



- 1 – генератор импульсов;
- 2 – заготовка;
- 3 – инструмент; 4 – капли расплавленного металла;
- 5 – эрозионная лунка;
- 6 – плазменный канал разряда;
- 7 – газовый пузырь;
- 8 – рабочая жидкость

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Физическая сущность процесса ЭЭО

Режим ЭЭО подбирается так, чтобы разрушение происходило только на поверхности заготовки, что зависит от материала, инструмента, полярности и формы импульсов.

Производительность ЭЭО и шероховатость обработанных поверхностей зависит от:

- свойств материала инструмента;
- энергии, выделяемой при разрядах (или, иначе, от силы тока в разряде);
- свойств рабочей жидкости.

С увеличением среднего значения силы тока производительность растет до определенного предела, увеличивается шероховатость поверхности заготовки и

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Физическая сущность процесса ЭЭО

С помощью ЭЭО можно обрабатывать токопроводящие материалы любой механической прочности, твердости, вязкости и хрупкости.

При этом нет необходимости в механических усилиях, значительно снижены отходы.

В зависимости от длительности и периодичности импульсов, вырабатываемых источником тока, и способов их формирования различают следующие способы обработки:

- электроискровой;
- электроимпульсный;
- электроконтактный.

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Физическая сущность процесса ЭЭО

В *электроискровом* режиме напряжение пробоя  $U = 40 \dots 180$  В, длительность импульса  $\tau_{\text{имп}} = 5 \dots 200$  мкс, сила тока  $I = 0,5 \dots 5$  А.

При *электроимпульсном* режиме  $U = 18 \dots 36$  В,  $\tau_{\text{имп}} = 500 \dots 10000$  мкс, сила тока  $I = 20 \dots 120$  А.

Максимальная производительность достигается при отношении  $I / \tau_{\text{имп}} = 5 \dots 8$  мА/с.

Полярность подключения источника тока зависит от длительности импульсов и материала электрода-инструмента.



# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Физическая сущность процесса ЭЭО

Прямая полярность (на инструмент-электрод подается напряжение от отрицательного полюса источника питания) применяется при обработке с малой длительностью импульсов (электроискровая).

В электроимпульсном режиме применяется обратная полярность.

Правильно выбранная полярность существенно снижает износ инструмента, который может составлять от 5 до 300 % массы удаленного с заготовки материала.

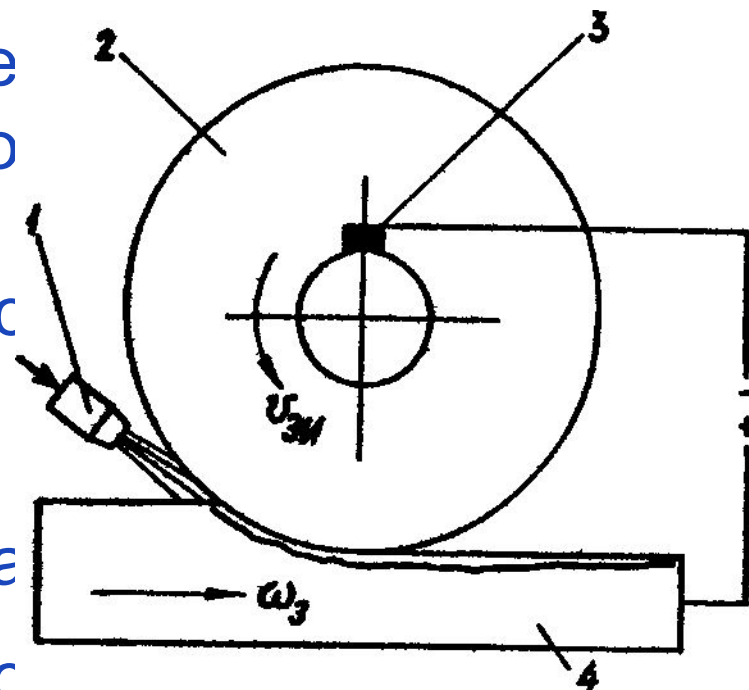


# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Физическая сущность процесса ЭЭО

При *электроконтактном* режиме импульсы тока формируются непосредственно в промежутке между инструментом и заготовкой вследствие их относительного движения и наличия микровыступов на рабочей поверхности инструмента

Для ЭЭО используется преимущественно постоянный ток, заготовка имеет положительную полярность, инструмент – отрицательную.



- 1 – сопло подачи РЖ;
- 2 – инструмент;
- 3 – щеточное устройство;
- 4 – заготовка

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Рабочие жидкости для ЭЭО

Рабочая жидкость, находящаяся в зазоре между заготовкой и инструментом:

- формирует узкий канал разряда, концентрирующий большие плотности энергии;
- создает ударные гидродинамические поля, удаляющие продукты эрозии заготовки;
- стабилизирует процесс разряда, обеспечивая непрерывную последовательность импульсов;
- и охлаждает инструмент.

Вследствие электронного механизма пробоя жидкости диаметр канала сначала имеет размер несколько мкм и плотности энергии в нем велики, а температура достигает  $30.000^{\circ}\text{C}$ .

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Рабочие жидкости для ЭЭО

В ходе развития разряда происходит разрыв сплошности рабочей жидкости и возникают ударные волны, распространяющиеся от канала разряда.

Жидкость должна иметь:

- термическую стабильность физико-химических свойств;
- низкую коррозионную активность к материалам заготовки и инструмента;
- высокую температуру вспышки;
- низкую испаряемость;
- легко очищаться;
- быть экологически безвредной.

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Рабочие жидкости для ЭЭО

В качестве рабочих жидкостей используют низкомолекулярные углеводородные жидкости (керосин, индустриальные масла И12А, ИС20А, их смеси, трансформаторное масло, жидкости РЖ-3, РЖ-8) и воду.

Для черновой обработки используют более вязкие жидкости (с высокой вязкостью: И12А, ИС20А, РЖ-8).

Для чистовой обработки используют жидкости с малой вязкостью (керосин, трансформаторное масло, РЖ-3, вода).

Электроконтактную обработку можно выполнять в <sup>36</sup>

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Инструменты ЭЭО

Инструменты ЭЭО должны быть достаточно жесткими и противостоять различным условиям деформаций (усилиям прокатки РЖ, высокой температуре).

Конструкция инструментов зависит от вида операций, причем в ряде случаев в них предусматриваются каналы для подачи рабочей жидкости.

В других случаях подача и отсос выполняются через специальную подставку или обработка ведется в ванне с прокаткой или без нее.

Профиль и геометрия рабочей части инструмента выполняются как зеркальное отображение полости

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Инструменты ЭЭО

При этом размеры уменьшаются на величину межэлектродного зазора и припуска на последующую обработку.

В общем случае величина торцового зазора составляет 0,02...0,15 мм, бокового – 0,04...0,45 мм в зависимости от величины и частоты импульсов.

Уменьшение износа инструментов достигается правильным выбором материала, параметров импульса тока, свойств рабочей жидкости, снижением вибрации инструмента и площади обрабатываемой поверхности.

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Технологические процессы ЭЭО

С помощью ЭЭО могут реализовываться следующие виды обработки:

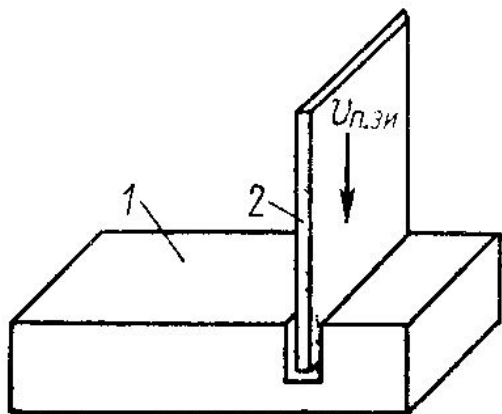
- отрезка;
- объемное копирование;
- прошивание;
- вырезание;
- шлифование;
- упрочнение;
- шаржирование.

ЭЭО широко используется: для обработки матриц и пуансо-нов штампов, внутренних отверстий фильер; извлечения сломанных сверл, метчиков, крепежа; изготовления сеток и решеток.

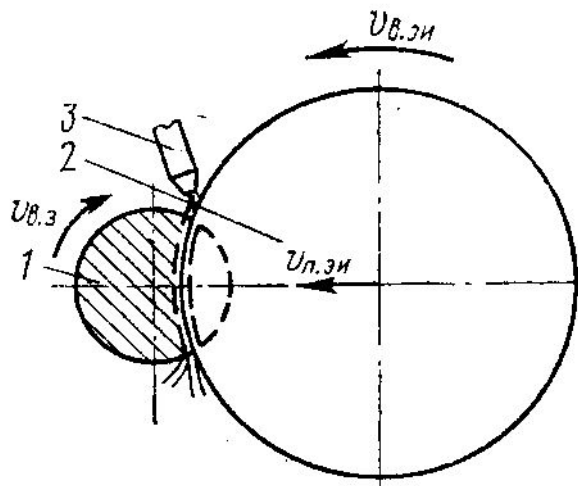
# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Схемы видов ЭЭО

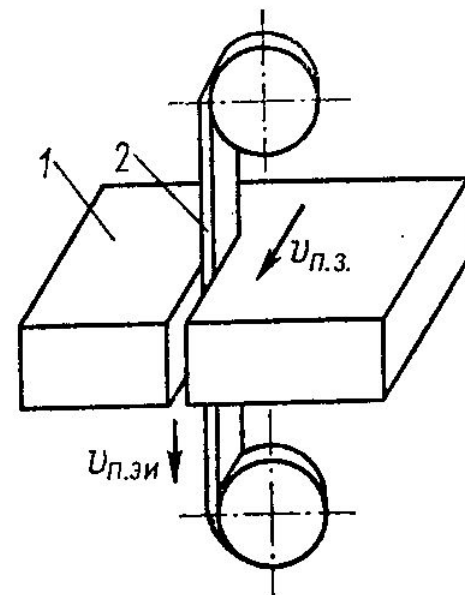
Отрезка пластиной



Отрезка  
вращающимся  
диском



Отрезка движущейся  
лентой или проволокой



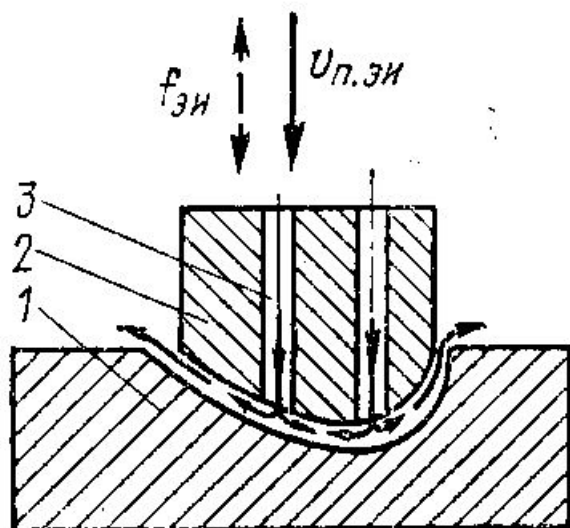
- 1 – заготовка;
- 2 – инструмент;
- 3 – сопло для подачи технологической среды



# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

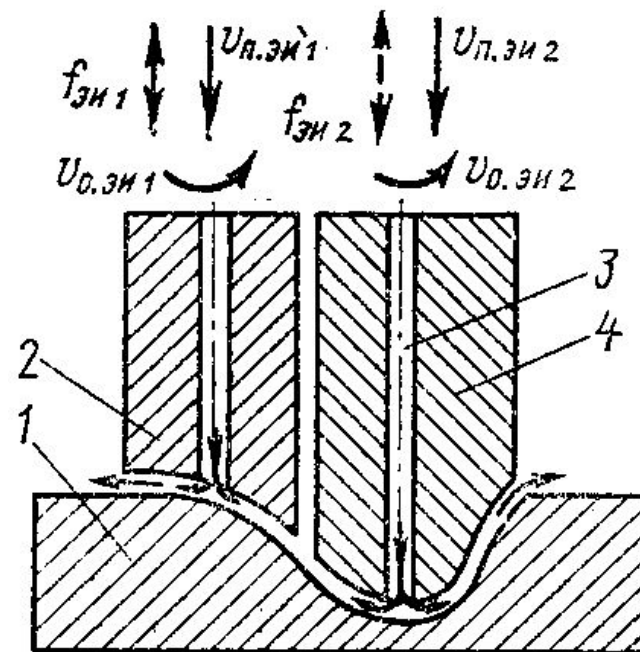
## Схемы видов ЭЭО

Объемное копирование  
одним инструментом



1 – заготовка;  
2, 4 – инструменты;  
3 – каналы для подачи  
технологической среды

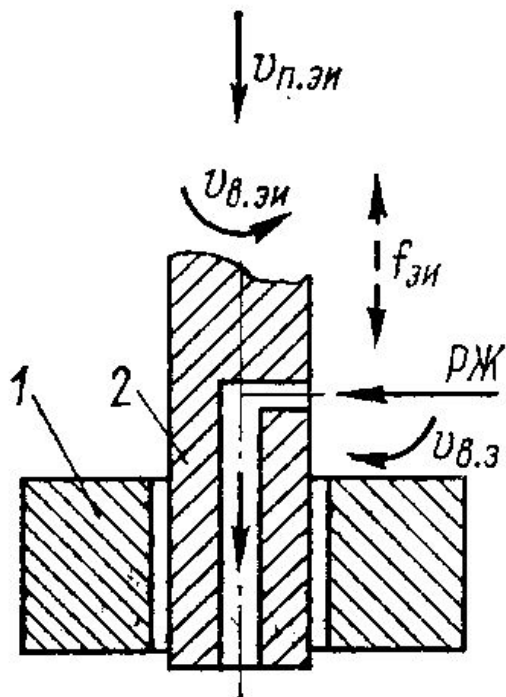
Объемное копирование  
несколькими (двумя)  
инструментами



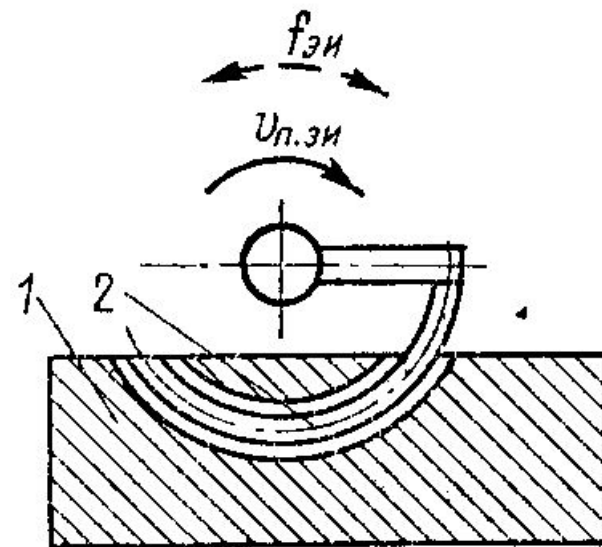
# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Схемы видов ЭЭО

Прошивание сквозных и глухих отверстий, окон, полостей и щелей



Прошивание криволинейных сквозных и глухих отверстий

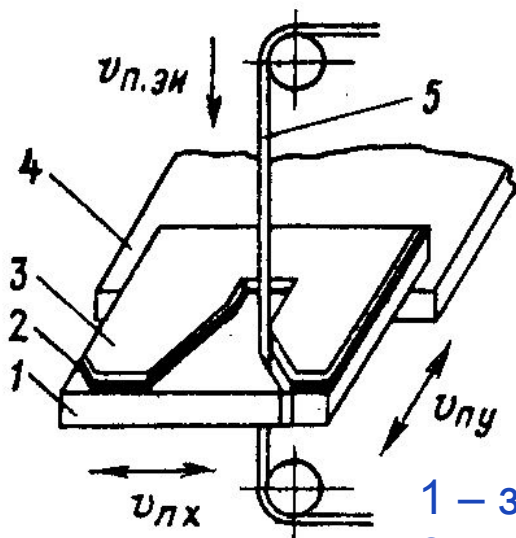


1 – заготовка;  
2 – инструмент

# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

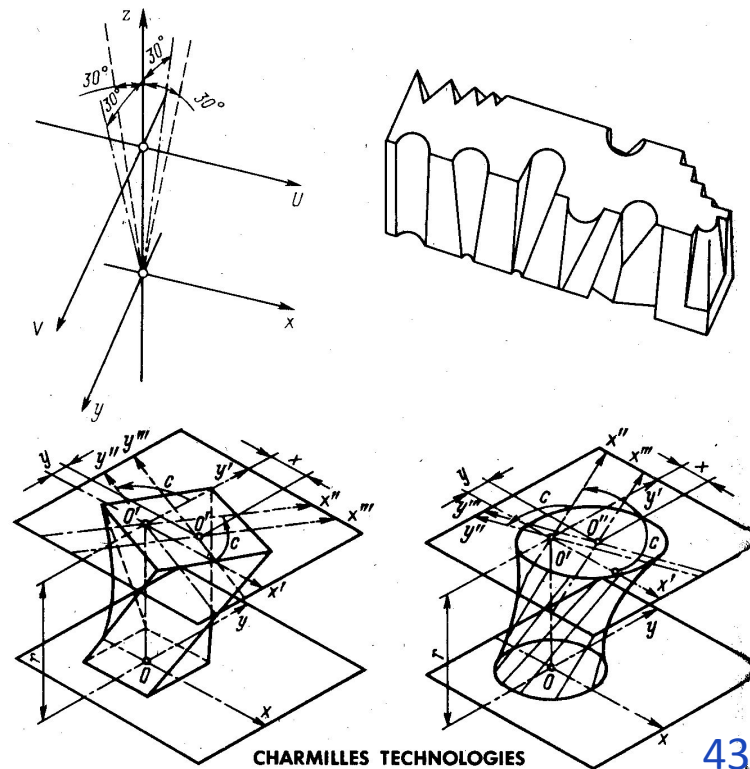
## Схемы видов ЭЭО

Вырезание проволокой по двум координатам с использованием копира или УП



- 1 – заготовка;
- 2 – прокладка;
- 3 – копир;
- 4 – стол;
- 5 – инструмент

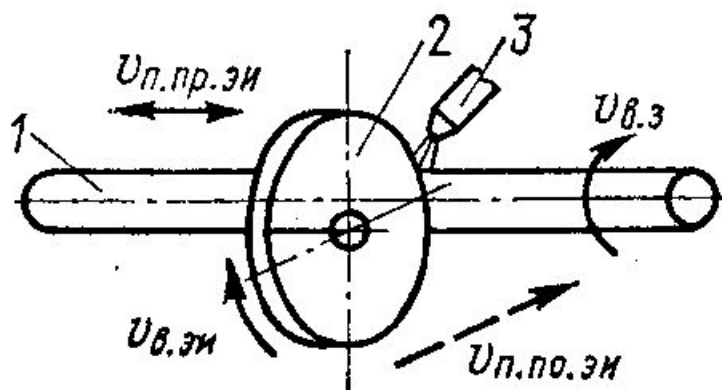
Вырезание на станках с ЧПУ сложных линейчатых поверхностей



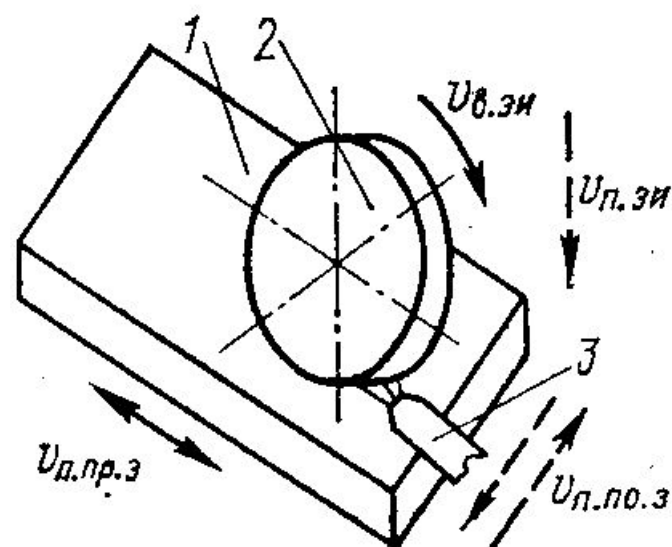
# Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

## Схемы видов ЭЭО

Круглое  
шлифование



Плоское  
шлифование



- 1 – заготовка;
- 2 – инструмент;
- 3 – сопло для подачи технологической среды

# Электроконтактная обработка (ЭКО)

## Технологические процессы ЭКО

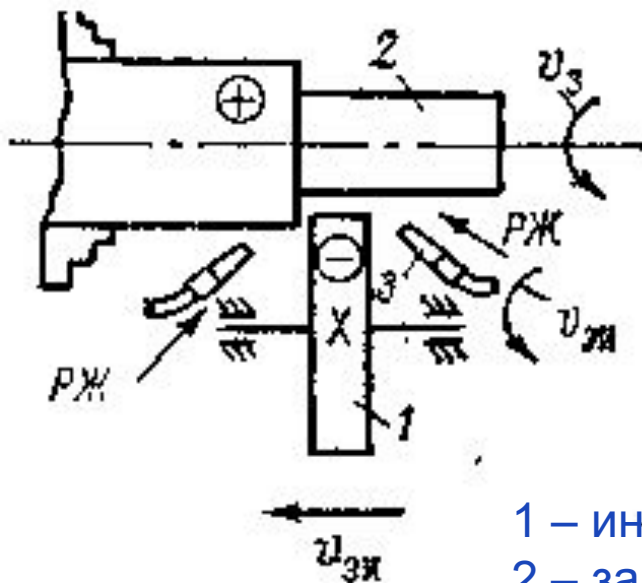
С помощью ЭКО могут реализовываться следующие виды обработки:

- резка (в ванне с РЖ или при подаче РЖ через сопло на инструмент);
- обработка тел вращения (дисковым инструментом);
- формообразование внутренних полостей трубчатым инструментом (он вращается и имеет осевую подачу, возможен вариант обработки в ванне);
- нарезка зубьев (дисковым модульным инструментом);
- обработка плоскостей (цилиндрическим или чашечным инструментом, на воздухе или с подачей

# Электроконтактная обработка (ЭКО)

## Схемы ЭКО тел вращения

Обработка  
цилиндрической  
ступени



1 – инструмент;  
2 – заготовка;  
3 – сопла для подачи  
технологической среды

Обработка  
конической  
поверхности

