

## 1.19. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

**Цель лекции:** *изучение электрофизических методов обработки.*

### 1.19.1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Электрофизические методы обработки относятся к физико-химическим методам размерной обработки материалов, которые обеспечивают съём обрабатываемого материала в результате физико-химических процессов.

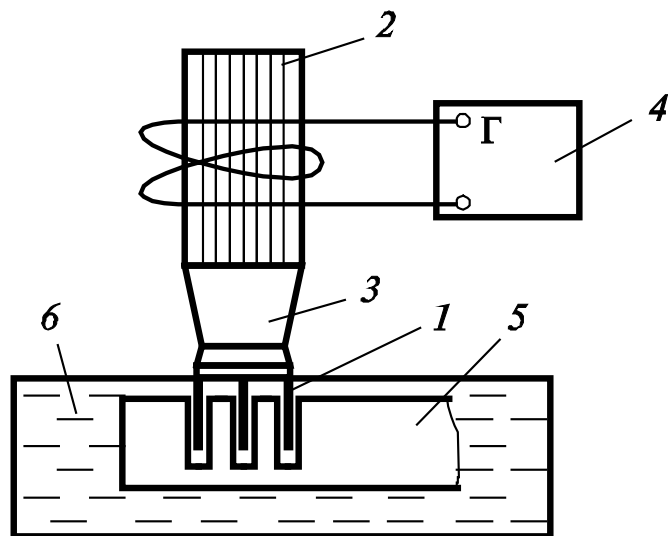
Электрофизические и электрохимические методы обработки применяют для обработки труднообрабатываемых, прочных, хрупких и многих других материалов, обработка которых обычными механическими методами затруднена или невозможна. К таким материалам относятся полупроводниковые материалы, кварц, рубин, ферриты, твердые сплавы и др. В зависимости от используемого физического процесса эти методы обработки материалов условно делят на ультразвуковые, электроэрозионные, лучевые, электрогидравлические, магнитоимпульсные, электрохимические.

С разработкой и внедрением в производство этих методов сделан принципиально новый шаг в технологии обработки материалов — электрическая энергия из вспомогательного средства при механической обработке стала рабочим агентом.

### 1.19.2. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Ультразвуковой метод обработки заключается в механическом воздействии на материал. Он назван ультразвуковым благодаря тому, что частота ударов соответствует диапазону неслышимых звуков, т. е. выше 16 кГц. Ультразвуковым методом можно обрабатывать твердые и хрупкие материалы, частицы которых могут, как бы выкалываться при ударе.

Ультразвуковая размерная обработка Рис. 1.175 основана на ультразвуковых колебаниях инструмента в среде абразивной суспензии 6. Обрабатываемый материал 5 выкалывается ударами зерен абразива, получающих ускорение от торца инструмента, колеблющегося с небольшой амплитудой. Обрабатываемый материал должен быть хрупким, а инструмент - более мягким (среднеуглеродистые стали). На рис. 1.175 приведена схема *ультразвуковой размерной резки* полупроводниковых слитков 5 на пластины.



**Рис. 1.175.** Схема резки полупроводниковых слитков на пластины:  
 1 — инструмент; 2 — магнитоотриктор; 3 — концентратор; 4 — генератор; 5 — заготовка; 6 — суспензия

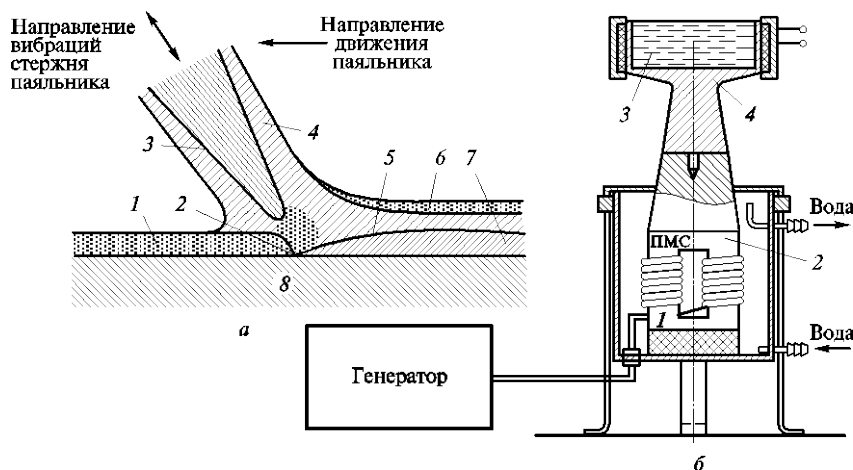
Инструмент 1 получает ультразвуковые колебания от магнитоотриктора 2 через концентратор колебаний 3. Некоторые материалы, называемые магнитоотрикторными, под воздействием электромагнитных колебаний от генератора 4 начинают «сжиматься и разжиматься» с той же частотой. Обработка происходит при условии, если к торцу магнитоотриктора, колеблющегося с ультразвуковой частотой и определенной амплитудой, прикрепить инструмент определенной формы. Для усиления энергии колебаний применяют концентраторы различной конфигурации.

Для повышения производительности процесса суспензию следует прокачивать через зазор между инструментом и обрабатываемым слитком, так как абразивные зерна постепенно разрушаются и их необходимо заменять. В качестве суспензии используют воду с абразивными зернами. Кавитация (схлопывание образовавшихся воздушных пузырьков в жидкой среде) ускоряет процесс обработки.

Ультразвук широко используют для очистки деталей. Ультразвуковые колебания, накладываемые на жидкость для очистки деталей, особенно малогабаритных и имеющих сложную конфигурацию, резко повышают скорость и качество очистки.

При пайке алюминия и его сплавов удаляют окисную пленку, механически разрушая интенсивными ультразвуковыми колебаниями (рис. 1.176, а). При этом осуществляется процесс ультразвукового лужения. Сущность явлений, происходящих при ультразвуковом лужении, заключается в следующем. Излучаемые рабочей частью паяльника знакопеременные упругие колебания ча-

стотой 16...22 кГц вызывают периодические растяжения и сжатия частиц жидкого припоя, в результате чего в расплавленном припое создаются кавитационные процессы. При этом возникают большие ударные импульсы, воздействующие на жидкий припой и поверхность облуживаемых деталей и вызывающие разрушение окисной пленки. Раздробленные частицы окисной пленки, обладающие меньшей плотностью, всплывают на поверхность припоя, и он беспрепятственно облуживает очищенную поверхность металла.



**Рис. 1.176.** Схема ультразвуковой пайки и лужения:

*а* — схема пайки (1 — окисная пленка; 2 — контакт расплавленного припоя с чистым металлом; 3 — жало паяльника; 4 — расплавленный припой; 5 — затвердевший припой; 6 — остатки окислов; 7 — смешанный слой припоя с чистым металлом; 8 — чистый металл); *б* — схема ванны лужения (1 — преобразователь; 2 — концентратор-трансформатор скорости; 3 — расплавленный припой; 4 — ванна)

Процесс ультразвукового лужения позволяет облудить всю обрабатываемую поверхность, с которой сняты окисные пленки, в то время как при механическом удалении окисной пленки облуживаются только отдельные зачищенные места поверхности.

Окисная пленка наиболее эффективно удаляется на частоте 18...23 кГц при интенсивности ультразвуковых колебаний 25...100 Вт/см<sup>2</sup>. Зона такой интенсивности распространяется от излучающей поверхности преобразователя не далее 3 мм из-за относительно высокой вязкости припоя. В этой зоне можно получить эффективное лужение в течение 0,1 с при условии, что поверхность детали была предварительно нагрета до температуры расплавленного припоя.

При уменьшении интенсивности ультразвуковых колебаний продолжительность удаления окисной пленки увеличивается до 1с. Более длительное воздействие кавитации разрушает поверхность обрабатываемого изделия, а в некоторых случаях приводит к растворению изделия в припое. На рис. 1.176, *б* показана схема ванны лужения.

### 1.19.3. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Электрофизические методы обработки позволяют создать технологии изготовления изделий из материалов высокой твердости, обработка которых обычными методами невозможна или крайне затруднительна. К таким материалам относятся ферриты, германий, кремний, алмазы, рубины, кварц, твердые сплавы, керамика и др.

На рис.1.177. Представлена классификация электроэрозионных методов обработки, которые будут рассмотрены ниже.

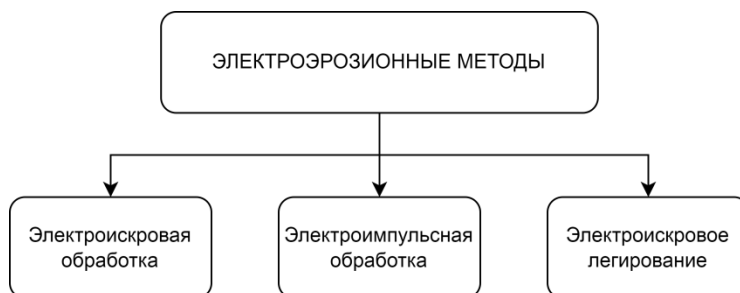
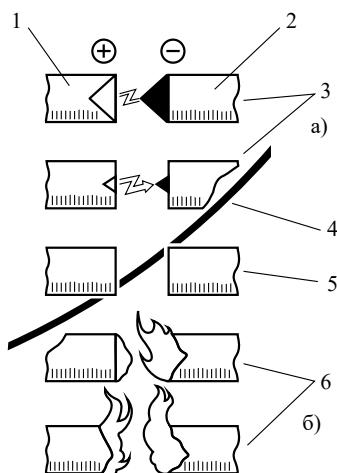


Рис. 1.177. Классификация эрозионных методов обработки

Электроэрозионные методы обработки применимы для всех токопроводящих материалов. Эти методы основаны на явлении электрической эрозии, т. е. разрушении поверхности электродов электрическим разрядом, проходящим между ними. Разрушение материала происходит путем его оплавления с последующим выбросом из рабочей зоны в виде парожидкостной смеси рис.1.178. При определенных условиях, связанных с большой емкостью цепи, электрическая дуга переходит в искру и тогда начинает разрушаться анод рис.1.178 а). При незначительной емкости возникает дуговой разряд и происходит разрушение катода рис.1.178 б).

Искровой разряд представляет собой пучок ярких, быстро исчезающих или сменяющих друг друга нитевидных, часто сильно разветвленных полосок — искровых каналов. Эти каналы заполнены плазмой, в состав которой в мощном искровом разряде входят не только ионы исходного газа, но и ионы вещества электродов, интенсивно испаряющегося под действием разряда. Механизм формирования искровых каналов объясняется стримерной теорией электрического пробоя газов.

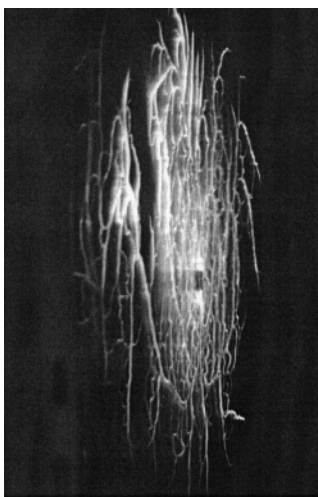
Согласно этой теории, из электронных лавин, возникающих в электрическом поле разрядного промежутка, при определённых условиях образуются стримеры — тускло светящиеся тонкие разветвленные каналы, которые содержат ионизированные атомы газа и отщепленные от них свободные электроны рис.1.179.



**Рис. 1.178.** Схема разрушения материала

1 – анод; 2 – катод; 3 – искровая область; 4 – граница инверсии; 5 – область отсутствия эрзии; 6 – дуговая область

Стримеры, удлиняясь, перекрывают разрядный промежуток и соединяют электроды непрерывными проводящими нитями. Происходящее затем превращение стримеров в искровые каналы сопровождается резким возрастанием силы тока и количества энергии, выделяющегося в них. Каждый канал быстро расширяется, в нём скачкообразно повышается давление, в результате чего на его границах возникает ударная волна. Совокупность ударных волн от расширяющихся искровых каналов порождает звук, воспринимаемый как «треск» искры (в случае молнии — гром). Максимальная сила тока в мощном искровом разряде может достигать значений порядка нескольких сотен кА.



**Рис. 1.179.** Стримеры [52]

Электроэрозионные методы различают в зависимости от формы и параметров импульсов тока и напряжения, а также метода генерирования импульсов. Импульсы тока и напряжения могут иметь униполярную, знакопеременную и другие формы. Основными параметрами импульсов являются их длительность  $t_n$  и скважность  $q$ .

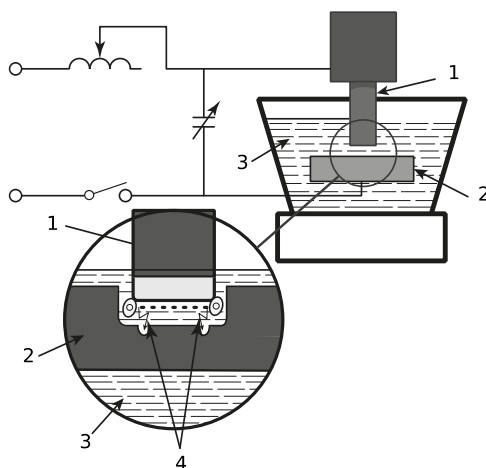
Скважностью импульса  $q$  называют отношение периода импульса  $T$  к его длительности  $t_n$ :

$$q = T/t_n$$

По длительности импульсы делятся на короткие ( $t_n < 10^{-4}$ с), средние ( $t_n = 10^{-4} \dots 10^{-2}$ с) и длинные ( $t_n > 10^{-2}$ с).

#### 1.19.4. МЕТОД ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ

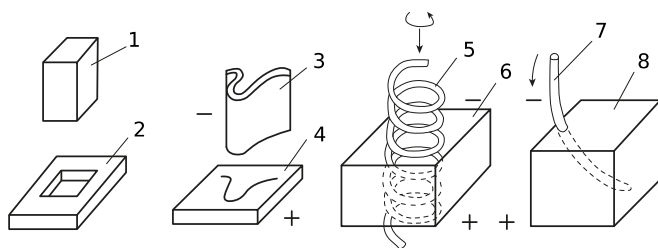
Метод, предложенный Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, основан на использовании импульсных искровых разрядов малой длительности (до нескольких сотен микросекунд) и большой скважности. ( $q > 8$ ) рис.1.180.



**Рис. 1.180.** Схема электроэрозионной обработки

1-инструмент(катод), 2-заготовка (анод), 3-жидкий диэлектрик, 4-электрические разряды

К достоинствам электроэрозионной обработки относится возможность изготовления деталей сложных форм, криволинейных отверстий и отверстий некруглого сечения рис.1.181.



**Рис. 1.181.** Примеры деталей сложных форм

1 – электрод-инструмент прямоугольной формы; 2 – получаемое в заготовке прямоугольное отверстие; 3 – ленточный электрод-инструмент сложной формы; 4 – получаемое в заготовке отверстие от ленточного электрода-инструмента; 5 – электрод-инструмент в виде пружины; 6 – получаемое в заготовке отверстие в виде спирали; 7 – электрод-инструмент в виде дуги; 8 – получаемое в заготовке отверстие в виде дуги.

Обработка может осуществляться методом копирования формы электрода инструмента и непрофилированным электродом.

Обработка методом копирования производится при поступательном движении одного из электродов и неподвижно закрепленном втором электроде, при этом форма электрода-инструмента копируется деталью рис.1.181.

При прохождении искрового разряда в жидкости возникают гидравлические явления и газообразования, создающие взрывной эффект, который способствует удалению из межэлектродного промежутка разрушенного разрядом металла. Источником питания служат обычно генераторы постоянного тока напряжением 30 ... 220 В, создающие силу тока зарядного контура в пределах 1...5 А. Сила тока в разрядном контуре достигает 100 А и выше. Время зарядки лежит в пределах  $10^{-3}$  с, а время разрядки — в пределах  $10^{-5}$  ...  $10^{-8}$  с.

Основная часть энергии, получаемой при разрядке конденсаторов, выделяется в виде теплоты (температура доходит до  $11000^{\circ}\text{C}$ ). При этом теплота расходуется на испарение и плавление металла и лишь небольшая ее часть поглощается электродами.

Последовательное действие разрядов, вызывающих электрическую эрозию, приводит к образованию в изделии выемки, представляющей собой как бы отпечаток электрода инструмента. Во время работы разрядного контура вследствие эрозионного разрушения металла зазор между электродами постоянно увеличивается. В какой-то момент времени зазор возрастает настолько, что разряд не возникает и съем металла прекращается. Для обеспечения непрерывности процесса станки для электроискровой обработки снабжаются регуляторами, автоматически меняющими положение одного из электродов и регулирующими подачу.

В качестве материала электродов используется латунь ЛС59-1, красная медь и медно-угольная композиция. Форма электрода подобна форме прошиваемого отверстия, но размеры его меньше размеров отверстия на 0,075-0,015 мм на сторону. На рис.1.182. представлены некоторые виды электродов.

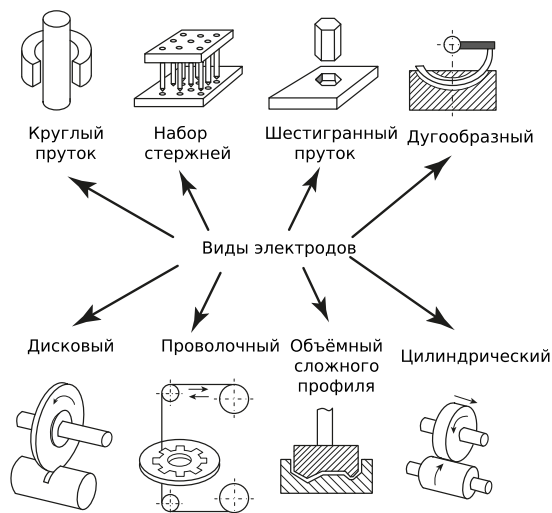


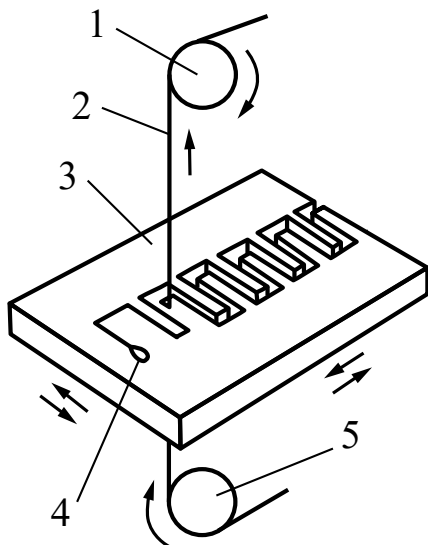
Рис. 1.182. Виды электродов

При обработке непрофилированным электродом (проволокой) обработка ведётся непрофилированным инструментом — так называемым «бесконечным электродом» — проволокой. Применяется латунная, медная, вольфрамовая и молибденовая проволока диаметром 0,02-0,3 мм рис.1.183. Таким образом, например, получают маски-шаблоны при производстве тонкопленочных микросхем.

Метод электроискровой обработки позволяет получить качественную поверхность, но не обладает достаточной производительностью.

При этом методе износ инструмента относительно велик (достигает 100% от объёма снятого материала). У всех станков есть общие детали: устройство для перемещения и крепления инструмента, устройство регулирования пространства между электродами и гидросистема. Генераторы для станков изготавливаются отдельно и могут работать с различными станками, как правило, они универсальны. Устройства для перемещения инструмента или заготовки в электроэрозионных станках отличаются от подобных устройств обычных металлорежущих станков: они не требуют применения значительных силовых нагрузок.





**Рис. 1.183.** Обработка непрофильным инструментом

1 – приемная катушка; 2 – электрод-проволока; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – технологическое отверстие; 5 – подающая катушка; диаметр проволоки 0,02...0,5 мм. Материал: от меди до вольфрама

Еще одно отличие – наличие электроизоляции между электродами. Гидросистема станка состоит из таких частей, как: гидронасос, ванна с рабочей жидкостью, фильтров. В качестве рабочей жидкости может быть использован керосин, вода и прочие жидкости.

Обнаружено, что электрические разряды не только разрушают поверхность электрода-инструмента, но при некоторых условиях способствуют отложению на нем своеобразной защитной пленки. Более детальные исследования показали, что эта пленка состоит из углерода и частиц металла обрабатываемой детали, что на рабочей поверхности инструмента протекают два противоположно направленных, но взаимосвязанных процесса — разрушение и восстановление.

Было предложено изумительной красоты решение для повышения износостойкости электрода-инструмента с помощью специальной формы импульсов.

Импульсы, посылаемые генератором в межэлектродный промежуток, как бы разделены по функциям. Первоначальный импульс высокого напряжения обеспечивает эрозионное разрушение детали с высокой производительностью, а последующие импульсы меньшего напряжения способствуют ускоренному восстановлению электрода-инструмента.

Электроэрозионные инструменты оказываются бессильными перед материалами, не проводящими ток, пусть даже самыми непрочными. Строго говоря, этот недостаток заложен не в инструменте, а в самом электроэрозионном принципе обработки, для осуществления которого необходим электрический

разряд между двумя токопроводящими электродами выход был найден, и весьма оригинальный. Так, для обработки алмаза его покрывают тонкой металлической фольгой. Искра сначала пробивает фольгу, затем проскакивает через нее и отдает большую часть своей энергии не фольге, а алмазу. Остальное просто: импульсное воздействие высокой температуры, испарение микрообъема и образование маленького кратера на поверхности алмаза. Затем снова и снова, до тех пор, пока в кристалле не будет сделано отверстие по форме электрода-инструмента.

### 1.19.5. МЕТОД ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

При электроискровой обработке рабочие импульсы вырабатываются за счет периодического изменения проводимости межэлектродного промежутка, а их параметры в значительной мере определяются свойствами этого промежутка — жидкой среды.

Решили импульсы генерировать не в самом рабочем зазоре, а вне его, с помощью электрической схемы. Иными словами, создать генераторы, вырабатывающие импульсы с требуемой характеристикой без участия свойств межэлектродного промежутка

Электроимпульсная обработка основана на использовании импульсов дугового разряда. Предложена советским специалистом М. М. Писаревским в 1948. Этот метод стал внедряться в промышленность в начале 1950-х гг. В отличие от электроискрового, дуговой разряд имеет температуру плазмы ниже (4000—5000°С), что позволяет увеличивать длительность импульсов.

Электроимпульсная обработка представляет собой разновидность электроэрозионной обработки. Она характеризуется большей скоростью съема металла при относительно высокой шероховатости обработанной поверхности. Соответственно и режимы обработки, форма используемых при обработке импульсов имеют существенные различия. В результате увеличения вводимой в зону импульсной обработки электрической мощности скорость съема металла по сравнению со скоростью съема при электроискровой обработке повышается в 8-10 раз.

Увеличение длительности импульсов при низкой скважности и устранении обратной полярности напряжения приводит к резкому снижению износа электрода-инструмента. В отличие от электроискровой обработки здесь применяется обратная полярность: анод-инструмент, катод-деталь. Благодаря высоким скоростям съема металла при снижении относительного износа инструмента становится возможной обработка фасонных поверхностей большой площади, требующих значительного съема металла. Высокий КПД генератора импульсов, применяющегося при импульсной обработке, обеспечивает проведение обработки при пониженном удельном расходе электрической энергии.

Электроимпульсный станок отличается от электроискрового практически только генератором импульсов. Советская промышленность выпускала гене-

раторы различного назначения. Развитие техники полупроводниковых приборов позволило создать генераторы, обеспечивающие изменение параметров импульсов в широких пределах. Например, у советского генератора ШГИ-125-100 диапазон частот следования импульсов 0,1—100 кГц, длительность импульсов 3—9000 мксек, максимальная мощность 7,5 кВт, номинальная сила тока 125 а. Диапазон рабочих напряжений, вырабатываемых для электроискровой обработки, 60—200В, а для электроимпульсной 20—60 В

### 1.19.6. МЕТОД ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Электрогидравлическая обработка* материалов представляет собой одну из форм механического воздействия на материал. Интенсивный электрический разряд в жидкости приводит к сильному гидравлическому удару, под воздействием которого обрабатываемый материал может деформироваться и при известных условиях разрушаться или изменять первоначальную геометрическую форму. Электрогидравлический эффект используется в промышленности преимущественно для дробления крупных материалов, очистки литья от формовочной земли и штамповки.

### 1.19.7. МАГНИТОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Магнитоимпульсная обработка материалов основана на использовании энергии сильного импульсного магнитного поля. Наиболее широко магнитоимпульсная обработка используется для формообразования малопластичных, труднодеформируемых материалов, вырубки и штамповки и многих сборочных операций.

Существуют две группы технологических схем магнитоимпульсной обработки. К первой группе относятся схемы, при которых осуществляется непосредственное воздействие импульсного магнитного поля на заготовку. Ко второй группе относятся схемы, при которых воздействия импульсных магнитных полей на заготовки осуществляются через промежуточные твердые, эластичные, жидкостные среды.

### ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ

Вопрос 1	Для обработки каких материалов применяют электрофизические и электрохимические методы обработки?
Ответы:	
1	Для обработки труднообрабатываемых, прочных, хрупких материалов
2	Для обработки полимерных материалов
3	Для обработки материалов из стекла и фарфора

Вопрос 2	На чем основан ультразвуковой метод обработки?
Ответы:	
1	На механическом воздействии на материал с частотой более 16 кГц
2	На механическом воздействии на материал с частотой менее 16 кГц
3	На механическом воздействии на материал с частотой от 4 до 16 Гц
Вопрос 3	На чем основан электроэрозионный метод обработки токопроводящих материалов?
Ответы:	
1	Основан на использовании преобразуемой в теплоту энергии импульсных электрических разрядов, возбуждаемых между инструментом и изделием
2	Основан на использовании перемещающегося относительно заготовки твердосплавного режущего инструмента
3	Основан на использовании абразивной суспензии
Вопрос 4	На чем основаны лучевые методы обработки?
Ответы:	
1	Основаны на съеме части материала при воздействии на него сфокусированными лучами с высокой плотностью энергии
2	Основаны на использовании сканирующего лазерного луча с целью построения компьютерной модели будущей детали
3	Основаны на использовании сканирующего электронного луча с целью построения компьютерной модели будущей детали
Вопрос 5	В чем заключается сущность электрогидравлической обработки?
Ответы:	
1	В воздействии интенсивного электрического разряда в жидкости, что приводит к сильному гидравлическому удару, под воздействием которого обрабатываемый материал может деформироваться
2	В воздействии электрогидравлического толкателя на материал заготовки, в результате чего она деформируется
3	В воздействии электрогидравлического домкрата на материал заготовки, в результате чего она деформируется
Вопрос 6	На чем основаны электрохимические методы обработки материалов
Ответы:	
1	Основаны на преобразовании электрической энергии в энергию химических связей
2	Основаны на воздействии кислотных травителей
3	Основаны на воздействии щелочных травителей

Вопрос 7	С какой целью применяют ультразвук при пайке алюминия и его сплавов?
Ответы:	
1	С целью удаления окисной пленки и последующего лужения
2	С целью нагрева места пайки до температуры плавления припоя
3	С целью нагрева флюса до температуры плавления
Вопрос 8	Какую форму поверхности позволяет получить электроэрозионный метод обработки?
Ответы:	
1	Любую
2	Только форму тела вращения
3	Только плоские поверхности