

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ

Конспект лекций для студентов
специальностей 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства» и
1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты»

Учебное электронное издание

Минск БНТУ 2009

УДК [621.7/.9.047+621.7/.9.048](075.8)
ББК 34.2я7
Э45

Авторы:

М.Г. Киселев;
А.В. Дроздов

Рецензенты:

Ж.А. Мрочек, профессор кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор;

А.Н. Осипов, первый проректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент

В данном конспекте лекций обобщены и систематизированы современные электрофизические и электрохимические методы обработки: электроэрозионный, электрохимический, электроннолучевой, светолучевой, плазменный, и ультразвуковой. Приведены все современные разновидности этих методов, получившие практическое применение в промышленности. Рассмотрена сущность методов, дана их классификация, приведены сведения об их кинематических и технологических особенностях, средствах технологического оснащения, инструментах. Особое внимание уделено типовым операциям, примерам их практического применения и режимам обработки.

Конспект лекций предназначен для студентов специальностей 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства» и 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» при изучении ими учебной дисциплины «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов». Помимо этого, оно может быть полезно студентам других специальностей машино- и приборостроительного направления при изучении ими технологических курсов, в программах которых предусмотрено рассмотрение электрохимической обработки материалов.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 293-91-01 факс (017) 292-40-81
E-mail: dav7@tut.by
Регистрационный № БНТУ/ПСФ80 - 4.2009

© БНТУ, 2009
© Киселев М.Г., Дроздов
А.В., 2009
© Дроздов А.В.,
компьютерный дизайн, 2009

Содержание

1	ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА.....	7
1.1	Основные сведения о теории процесса электроэрозионной обработки и его закономерностях.....	8
1.1.1	Общее описание процесса и стадий его протекания.....	8
1.2	Тепловые процессы на электродах.....	12
1.3	Основные технологические схемы электроэрозионной обработки.....	14
1.4	Технологические показатели электроэрозионной обработки.....	16
1.4.1	Производительность электроэрозионной обработки.....	16
1.4.2	Точность электроэрозионной обработки.....	18
1.4.3	Качество поверхности при электроэрозионной обработке.....	21
1.5	Электроэрозионное оборудование.....	23
1.5.1	Генераторы импульсов.....	24
1.5.2	Регуляторы подачи электрода-инструмента.....	27
1.5.3	Системы рабочих перемещений электрода-инструмента.....	29
1.5.4	Система очистки и подачи рабочей жидкости в зону обработки.....	30
1.5.5	Механическая часть станков.....	31
1.6	Технологические процессы изготовления типовых поверхностей.....	34
1.6.1	Исходные данные для проектирования технологических процессов электроэрозионной обработки металлов.....	34
1.6.2	Область технологического использования электроэрозионной обработки.....	35
1.6.3	Порядок проектирования технологических процессов электроэрозионной обработки.....	35
1.7	Технологические процессы электроэрозионной обработки типовых поверхностей и деталей.....	37
1.7.1	Прошивание отверстий.....	37
1.7.2	Прошивание наружных поверхностей.....	43
1.7.3	Прошивание полостей.....	44
1.7.4	Электроэрозионное шлифование.....	45
1.7.5	Электроэрозионное разрезание.....	46
1.7.6	Изготовление деталей непрофилированным электродом инструментом.....	46
1.7.7	Технология изготовления цанг.....	48
1.7.8	Электроэрозионное упрочнение.....	50
2	ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА.....	51
2.1	Механизм анодного растворения.....	51
2.2	Съем металла при размерной электрохимической обработке.....	52
2.3	Пассивация поверхности металла.....	54
2.4	Подбор электролита для ЭХО.....	54

2.5	Гидродинамические процессы в межэлектродном промежутке	55
2.6	Напряжение	55
2.7	Технологические схемы электрохимической размерной обработки	56
2.7.1	Обработка с неподвижными электродами	56
2.7.2	Прошивание полостей, углублений, отверстий	56
2.7.3	Точение наружных и внутренних поверхностей	57
2.7.4	Протягивание наружных и внутренних поверхностей	58
2.7.5	Разрезание заготовок	58
2.7.6	Шлифование	59
2.8	Формообразование при размерной электрохимической обработке	59
2.8.1	Копирование электрода-инструмента на заготовке	59
2.8.2	Межэлектродный зазор	60
2.8.3	Припуск на обработку	62
2.8.4	Производительность электрохимической обработки	63
2.8.5	Точность электрохимической обработки	63
2.8.6	Качество поверхностей деталей после электрохимической обработки	64
2.9	Расчет и изготовление электродов-инструментов для электрохимической размерной обработки	66
2.9.1	Особенности проектирования электродов-инструментов	66
2.9.2	Материалы для изготовления электродов-инструментов	66
2.9.3	Расчет и изготовление электродов-инструментов	67
2.10	Технологические возможности электрохимической размерной обработки	74
2.11	Оборудование для электрохимической обработки	77
2.11.1	Типовая структура оборудования	77
2.11.2	Источники питания и их выбор	77
2.11.3	Системы регулирования режима ЭХО	79
2.11.4	Система хранения, подачи и очистки электролита	80
3	ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	82
3.1	Физические основы электроннолучевой обработки	82
3.1.1	Основные стадии формирования электронного луча и применяемое оборудование	82
3.1.2	Получение свободных электронов	83
3.1.3	Ускорение электронов	83
3.1.4	Управление электронным лучом	84
3.1.5	Взаимодействие электронного луча с веществом	85
3.2	Основные технологические процессы электроннолучевой обработки	86
3.2.1	Особенности электронного луча как технологического инструмента	86
3.2.2	Локальный переплав	87
3.2.3	Электроннолучевая плавка	87
3.2.4	Электроннолучевая сварка	88
3.2.5	Электроннолучевое испарение материалов	89
3.2.6	Размерная электроннолучевая обработка	90

4	СВЕТОЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	93
4.1	Физические основы получения светолучевых источников энергии.....	93
4.1.1	Когерентное излучение и условия его получения	93
4.1.2	Основные схемы ОКГ	95
4.1.3	Взаимодействие излучения ОКГ с обрабатываемым веществом.....	98
4.2	Технология светолучевой обработки материалов	99
4.2.1	Особенности ОКГ как технологического инструмента.....	99
4.2.2	Лазерное плавление.....	99
4.2.3	Лазерная резка и размерная обработка.....	100
5	ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	102
5.1	Устройства для получения плазмы	102
5.2	Виды плазменных источников энергии	102
5.3	Характеристики плазменного источника энергии	103
5.4	Технологическое применение плазмы	104
5.4.1	Плазменный нагрев	104
5.4.2	Плазменное плавление	105
5.4.3	Плазменная сварка и наплавка.....	106
5.4.4	Плазменное напыление	106
5.4.5	Плазменная резка.....	107
6	УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	109
6.1	Ультразвуковые колебания.....	109
6.2	Форма ультразвуковых волн	109
6.3	Основные характеристики ультразвукового поля	110
6.4	Поглощение и отражение ультразвука. Стоячие волны.....	111
6.4.1	Стоячие волны	112
6.5	Основные сведения об акустических колебательных системах технологического назначения.....	113
6.5.1	Характеристики колебательных систем.....	114
6.5.2	Электроакустические преобразователи.....	115
6.5.3	Ультразвуковые концентраторы и волноводы.....	120
6.6	Ультразвуковая очистка	125
6.6.1	Акустическая кавитация	125
6.6.2	Звукокапиллярный эффект	126
6.6.3	Акустические течения.....	127
6.6.4	Виды загрязнений	127
6.6.5	Влияние физико-химических свойств моющей жидкости.....	128
6.6.6	Влияние параметров ультразвукового поля	129
6.6.7	Технология ультразвуковой очистки.....	129

6.7	Размерная ультразвуковая обработка свободным абразивом	130
6.7.1	Сущность процесса	130
6.7.2	Влияние технологических и акустических параметров на показатели размерной обработки	131
6.7.3	Точность размерной обработки	132
6.7.4	Качество поверхности	133
6.7.5	Производительность размерной ультразвуковой обработки.....	134
6.7.6	Основы технологии ультразвуковой размерной обработки	135
6.8	Оборудование для ультразвуковой размерной обработки материалов	139
6.8.1	Механизм подачи.....	139
6.8.2	Универсальные ультразвуковые станки	141
6.8.3	Акустические головки.....	142
6.9	Ультразвуковая сварка (УЗС) металлов	144
6.9.1	Основные сведения о механизме процесса ультразвуковой сварки металлов	144
6.9.2	Акустические колебательные системы для сварки металлов	145
	ЛИТЕРАТУРА.....	148

1 ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

Явление электрической эрозии, т.е. разрушение контактов под действием электрических разрядов, было известно давно. При этом электрическая эрозия представляет собой вредное явление, вызывающее сокращение срока службы и снижение надежности электрических устройств. Поэтому усилия многих исследователей были направлены на уменьшение такого разрушения контактов.

Однако в 40^х годах ученые попробовали применить электрические разряды для равномерного удаления металла. С этой целью они поместили электроды (инструмент и заготовку) в жидкий диэлектрик, который охлаждал расплавленные частицы металла и не позволял им оседать на противоположный электрод (рисунок 1.1). В качестве генератора импульсов использовалась батарея конденсаторов 2, заряжаемых от источника постоянного тока. При этом время зарядки конденсатора регулировали реостатом 1. Электрод-инструмент 3 перемещали к заготовке 4. По мере их сближения возрастала напряженность поля в пространстве между электродом-инструментом и заготовкой (*межэлектродным промежутком* (МЭП)).

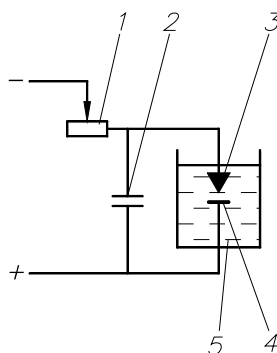


Рисунок 1.1 – Схема первой лабораторной установки для электроэрозионной обработки:
1 – реостат; 2 – батарея конденсаторов; 3 – электрод-инструмент; 4 – заготовка; 5 – диэлектрическая жидкость

При достижении определенной напряженности электрического поля на участке с минимальным расстоянием между поверхностями электродов, измеренным по нормали к обрабатываемой поверхности и называемым *минимальным межэлектродным зазором*, возникал электрический разряд, под действием которого происходило разрушение заготовки. Продукты обработки попадали в диэлектрическую жидкость 5, где охлаждались и, не достигая электрода-инструмента, осаждались на дно ванны. Через некоторое время электрод-инструмент прошел пластину 4, при этом контур отверстия соответствовал профилю инструмента.

Первоначально для осуществления ЭЭО применялись только искровые разряды, создаваемые конденсатором в *RC*-генераторе (рисунок 1.1). Процесс называли *электроискровой обработкой*. В 50-х годах разработали специальные генераторы импульсов для обработки не только на коротких искровых разрядах, но и на более продолжительных - искро-дуговых разрядах. Чтобы отличить новые условия протекания процесса, его стали называть *электроимпульсной обработкой*. Сейчас эти процессы считают разновидностями ЭЭО и определяют как *электроискровой режим* и *электроимпульсный режим*.

1.1 Основные сведения о теории процесса электроэрозионной обработки и его закономерностях

1.1.1 Общее описание процесса и стадий его протекания

Электрическая эрозия - направленное разрушения электропроводящих материалов в результате кратковременного теплового действия импульсных электрических разрядов между инструментом и заготовкой в жидкой диэлектрической среде.

По мере сближения электрода-инструмента с заготовкой напряженность E электрического поля возрастает обратно пропорционально расстоянию между электродами:

$$E = \frac{U}{S}, \quad (1.1)$$

где U - разность потенциалов электрода-инструмента и заготовки;
 S - зазор между электродами.

При этом наибольшая напряженность E возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Расположение этого участка зависит от местных выступов и неровностей на инструменте и заготовке, а также от наличия и размеров электропроводных частиц (продуктов разрушения), находящихся в межэлектродном промежутке. На рисунке 1.2 показано формирование расчетного зазора S между электродом-инструментом 3 и заготовкой 4. Видно, что зазор зависит от высоты h_6 местного микро- или макровыступа на заготовке. В районе этого выступа напряженность поля будет наибольшей, что повышает вероятность пробоя межэлектродного промежутка в этой точке. Напряженность будет также зависеть от наличия и размеров электропроводных частиц 1 в диэлектрике 2. Частица 1 с размером h_1 уменьшает расчетный зазор до размера $S_1 + S_2$.

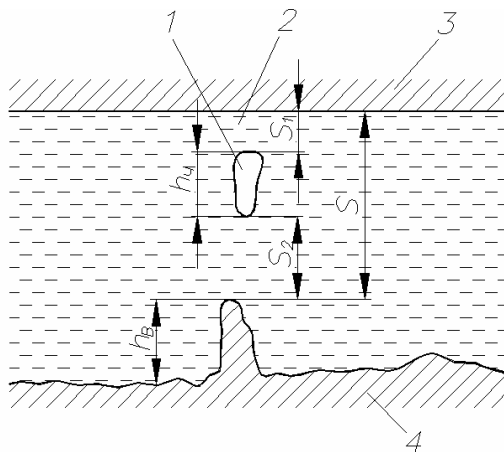


Рисунок 1.2 – Схема формирования расчётного межэлектродного зазора:

1 – электропроводная частица; 2 – диэлектрическая жидкость; 3 – электрод-инструмент; 4 – заготовка

Если электроды сблизить до расстояния нескольких десятков микрометров, то в отдельных местах напряженность электрического поля может достигнуть значения, при котором в месте минимального зазора возникнет электрический разряд. В направлении, обратном движению электронов, происходит перемещение более тяжелых частиц - ионов. Электроны, имеющие меньшую массу, быстро достигают положительно заряженной поверхности заготовки и нагревают металл, вызывая его расплавление и испарение. В результате на поверхности заготовки образуется углубление в форме сферической лунки

(рисунок 1.3) радиусом R . Вылетевшие из лунки частицы металла охлаждаются окружающей жидкостью, и застывают в виде миниатюрных шариков. При воздействии серии разрядов поверхность приобретает кратерообразную форму с явно выраженными углублениями в виде множества перекрывающихся друг друга лунок (рисунок 1.3б), которые формируют шероховатость поверхности.



Рисунок 1.3 – Характер разрушения поверхности заготовки при электроэрозионной обработке: а – при воздействии единичного импульса; б – при воздействии серии импульсов

В электроискровом режиме большинство ионов, не успевает достичь отрицательно заряженного электрода и вызвать удаление металла с его поверхности. Поэтому съем металла преимущественно происходит с анода, который выбирают в качестве заготовки. Интенсивность износа электрода-инструмента определяется количеством ионов, достигающих его поверхности. При этом, чем меньше износ инструмента, тем точнее можно получить деталь. Поэтому стремятся сформировать импульс с меньшей длительностью. Но это приводит к возрастанию времени обработки и снижению ее производительности. Полярность, при которой заготовка является анодом, называют **прямой** и она используется на **электроискровом режиме**.

По мере увеличения длительности импульсов, возрастает интенсивность съема металла с катода (инструмента) за счет воздействия на него потока ионов. Можно подобрать такое время протекания тока, при котором доля съема металла электронами составит незначительную часть от общего объема удаленного с электродов материала. В этом случае катодом следует принимать заготовку. Такая полярность, называются **обратной**, и она используется на электроэрозионной обработке при **электроимпульсном режиме**.

Одной из разновидностей электроэрозионной обработки является **электроконтактная** (рисунок 1.4). Процесс протекает в диэлектрике 2. Так как поверхности электрода-инструмента 1 и заготовки 3 имеют неровности, то при вращении электрода-инструмента выступы приближаются к заготовке вплоть до механического контакта. На определенном расстоянии S между электродами происходит разряд, переходящий в дуговой и вызывающий расплавление металла. При вращении электрода-инструмента выступ на его поверхности удаляется от заготовки и разряд в среде диэлектрика быстро затухает. В этом случае длительность и частота следования импульсов тока зависит от формы и числа выступов на наружной поверхности инструмента и от скорости его вращения. Вращающийся электрод-инструмент сам регулирует параметры импульсов, поэтому не требуется специального генератора, а используется постоянный или переменный ток низкого напряжения. Электроконтактную обработку проводят при прямой полярности. По мере удаления металла с заготовки в зависимости от схемы обработки электрод-инструмент перемещают со скоростью V_{II} либо вдоль обрабатываемой поверхности (шлифование), либо по нормали к ней (резание).

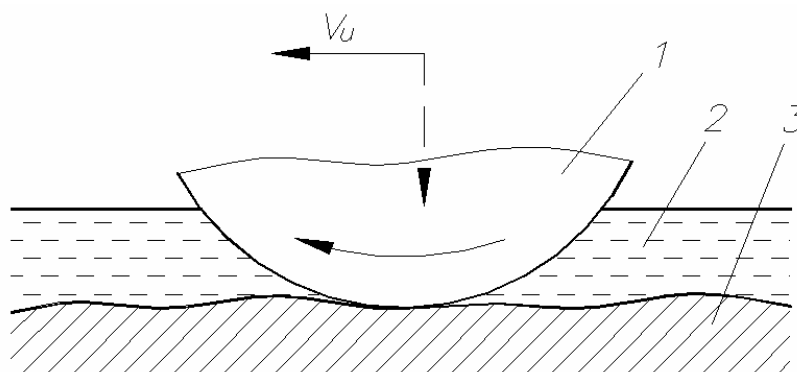


Рисунок 1.4 – Схема электроконтактной обработки:
1 – вращающийся электрод-инструмент; 2 – диэлектрическая жидкость; 3 – обрабатываемая заготовка

Если процесс протекает в воздухе (без диэлектрической жидкости), то возникают более длительные дуговые разряды, так как после контакта между инструментом и заготовкой дуга может гореть длительное время. При этом расплавленный металл может достигать противоположной поверхности и там застывать, т.е. одновременно протекают два процесса - размерный съем и наращивание металла (электроэрозионное легирование).

В общем случае однократный акт удаления металла при ЭЭО состоит из трех основных стадий.

Первая стадия - пробой межэлектродного промежутка в результате образования локальной зоны с высокой напряженностью поля. Под действием разряда происходит ионизация промежутка между электродами 1 и 2 (рисунок 1.5), через который между ними начинает протекать электрический ток, и образуется **канал проводимости** 3 - узкая цилиндрическая зона, содержащая электроны и ионы. Скорость нарастания силы тока в канале проводимости достигает сотен килоампер в секунду. В результате на границах канала происходит плавление металла и образуются лунки, по форме близкие к сферической.

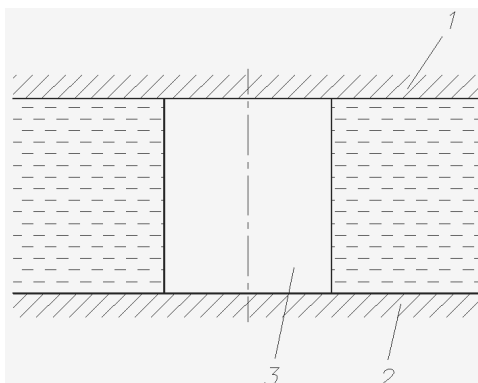


Рисунок 1.5 – Стадия пробоя межэлектродного промежутка:
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – образовавшийся канал проводимости

Вторая стадия - образование около канала проводимости газового пузыря из паров жидкости и металлов. В результате их высокого давления (до $2 \cdot 10^7$ Па) канал проводимости стремится расширяться, сжимая окружающую его газовую фазу. По инерции газовый пузырь и окружающая его жидкость вначале остаются неподвижны, а затем начинается их расширение в радиальном направлении со скоростью 150-200 м/с (рисунок 1.6). На наружной границе образуется фронт уплотнения, где давление резко изменяется от исходного в жидкости до высокого его значения P_ϕ на границе.

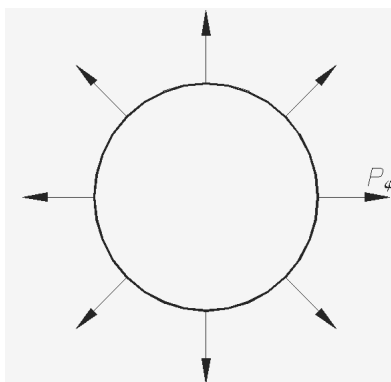


Рисунок 1.6 – Стадия образования около канала проводимости газового пузыря

Третья стадия - прекращение протекания тока, отрыв ударной волны от газового пузыря и продолжение его расширения по инерции. Ударная волна постепенно гасится окружающей жидкостью.

В межэлектродном промежутке (рисунок 1.7) в начале этой стадии находятся жидкий металл 2 в углублениях электродов 1 и 6; газовый пузырь 3, внутри которого есть пары 4 металлов заготовки и инструмента; жидкий диэлектрик 5. Когда газовый пузырь достигнет наибольшего размера, давление внутри него резко падает. При этом в лунках расплавленный металл вскипает и выбрасывается в межэлектродный промежуток.

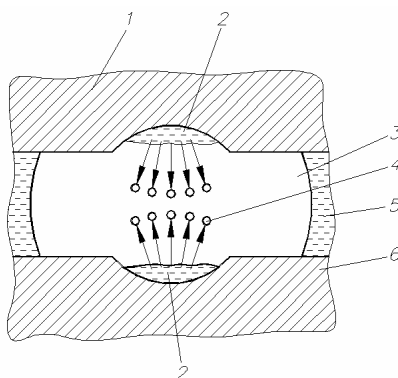


Рисунок 1.7 – Завершающая стадия единичного разряда:

1 – электрод-инструмент; 2 – жидкий металл; 3 – газовый пузырь; 4 – пары металла заготовки и инструмента; 5 – жидкий диэлектрик; 6 – обрабатываемая заготовка

Основные технологические показатели процесса электроэрозионной обработки (производительность, точность и качество поверхности) зависят от количества металла, выплавленного из лунки за один импульс. Это количество определяется энергией импульса $A_{И}$, которую для технологических целей можно рассчитывать по средним значениям силы тока и напряжения

$$A_{И} = I_{CP} \cdot U_{CP} \cdot \tau_{И}, \quad (1.2)$$

где $\tau_{И}$ - время протекания импульса.

При этом среднее значение напряжения пробоя $U_{CP} = (0.5 - 0.75)U_0$, где U_0 - напряжение холостого хода при разомкнутых контактах.

Для электроискрового режима $U_0 = 40 - 180B$, электроимпульсного - $U_0 = 18 - 36B$.

Среднюю силу тока определяют через значение тока I_K при коротком замыкании электродов: $I_{CP} = (0.5 - 0.75)I_K$. При черновой обработке стали $I_K = 20 - 120A$, при

чистойой - $I_K = 0.5 - 5A$. При обработке твердых сплавов значение I_K принимается $0.05 - 0.2A$.

Длительность импульсов $\tau_{и}$ обратно пропорциональна частоте f их следования. Т.к. между импульсами имеются паузы, то учитывается скважность q , (отношением периода T следования импульсов к их длительности)

$$q = \frac{T}{\tau_{и}} (q > 1). \quad (1.3)$$

Длительность импульса определяется

$$\tau_{и} = \frac{1}{q \cdot f}. \quad (1.4)$$

При электроэрозионной обработке используются импульсы различной формы (рисунок 1.8), но одной полярности (униполярные). Форма импульсов подбирается такой, чтобы получить наибольшее углубление на заготовке.

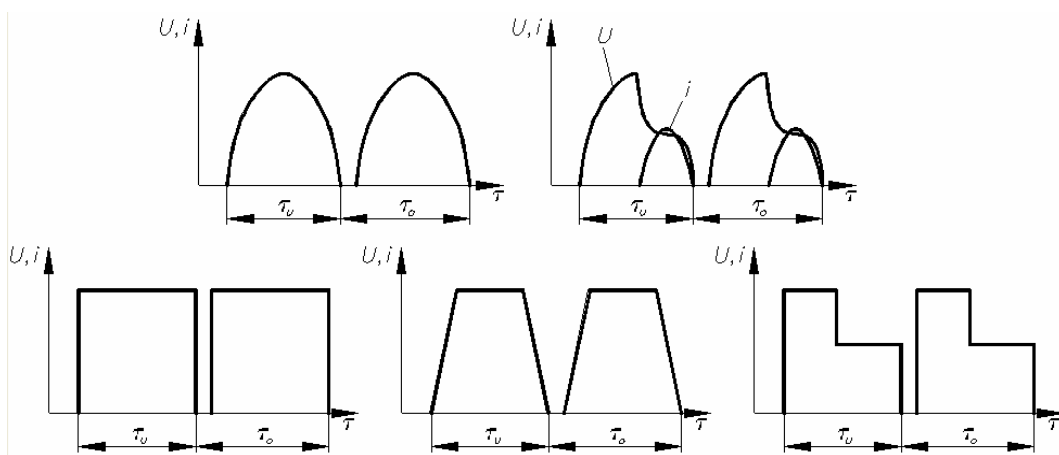


Рисунок 1.8 – Формы импульсов, применяемых при электроэрозионной обработке

1.2 Тепловые процессы на электродах

Расчет температуры в окрестностях области разряда носит приближенный характер со следующими допущениями: разряд принимается стационарным точечным источником теплоты, теплофизические параметры постоянны в течении всего времени обработки; тепловые потоки усредняются по времени.

На рисунке 1.9 дана расчетная схема температуры в процессе электроэрозионной обработки. Методика расчета температуры для обоих электродов одинакова. Точечный источник 1 передает теплоту равномерно во все стороны. Из-за малых размеров зазора большая ее часть попадает на электрод 2. В этих условиях граница плавления металла будет перемещаться по сфере, принимая положения а, б, в, г, до окончания действия импульса напряжения. При этом допускается, что потерь теплоты в межэлектродном пространстве не происходит.

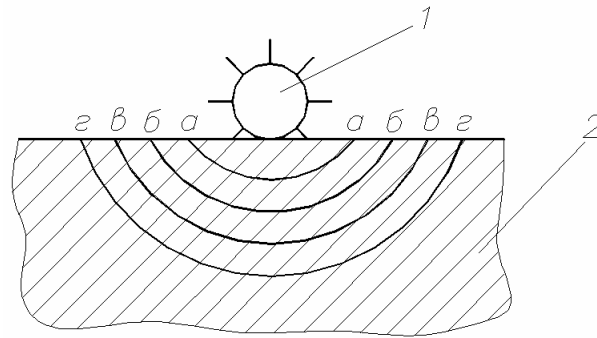


Рисунок 1.9 – Расчётная схема для определения температуры в процессе электроэрозионной обработки:
1 – точечный источник тепла; 2 – электрод

Согласно теории теплопередачи, приращение температуры твердого тела зависит от энергии импульса $A_{и}$, расстояния r до источника теплоты, удельной теплоемкости C , плотности с материала электрода и потерь энергии

$$T = T_0 + \frac{\Theta \eta_{и} \cdot A_{и}}{C \cdot \rho \cdot r^3}, \quad (1.5)$$

где T - температура в точке, находящейся в зоне действия импульса;

T_0 - начальная температура электрода;

$\eta_{и}$ - коэффициент полезного действия энергии импульса;

Θ - безразмерный параметр температуры, учитывающий температуропроводность b электрода и время $\tau_{и}$ действия источника тепла.

Коэффициент $\eta_{и}$, характеризует долю энергии импульса, используемую на расплавление металла. Он учитывает следующие потери теплоты:

- на нагрев и испарение жидкости, образование ударной волны и газового пузыря. - коэффициент K_1 , (электроискровой режиме $K_1 \approx 0.5$; электроимпульсный $K_1 = 0.47$);
- на нагрев второго электрода - коэффициент K_2 ;
- потери, зависящие от свойств среды, в которой происходит ЭЭО - коэффициент $K_3 = 0.2...6$ (для керосина $K_3 = 0.2$; для масел $K_3 = 6$);
- потери, зависящие от изменения напряжения - коэффициент $K_4 = \pm 0.1$. Если напряжение ниже номинала, то будет знак “-”, если выше знак “+”.

Значение коэффициента полезного действия энергии импульса определяется

$$\eta_{и} = (1 - K_1)(1 - K_2)(1 - K_3)(1 - K_4). \quad (1.6)$$

Расчет температуры позволяет определить границу жидкого металла, а также зоны фазовых превращений в лунке и прилегающей к ней области (рисунок 1.10). Расстояние между соседними изотермами составляет 5 мкм, а соответствующие им значения температуры приведены на выносках. Температура плавления металла с учетом его перегрева на 80 К принята 1800 К. Перегрев предусматривают для обеспечения жидкотекучести металла при выбрасывании его из лунки. Тогда глубина лунки, обозначенная радиальной штриховкой, составит порядка 20 мкм. Зная распределение температуры, можно найти толщину слоя металла с изменившимися в результате термического цикла свойствами.

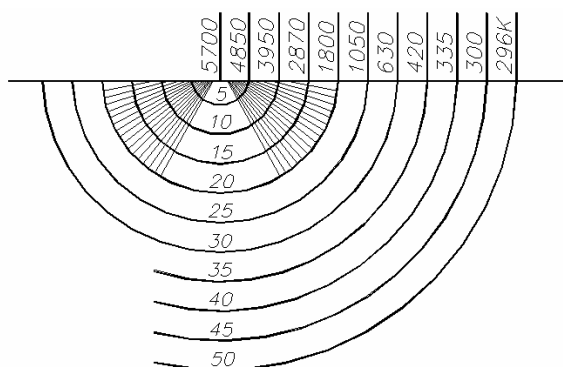


Рисунок 1.10 – Распределение температур в виде изотерм по глубине металла в конусе действия импульса энергией 0.54 Дж и длительностью 0.008 с

1.3 Основные технологические схемы электроэрозионной обработки

Прошивание - удаление металла из полостей, углублений, отверстий, пазов с наружных поверхностей. На рисунке 1.11 приведены схемы изготовления углубления (рисунок 1.11а) и фасонного стержня (рисунок 1.11б). Электрод-инструмент 1 поступательно перемещается к заготовке 2 со скоростью V_H . Оба электрода помещены в ванну 3 с диэлектриком 4. Продукты обработки 5 выбрасываются в межэлектродный промежуток и оседают на дно ванны. С помощью прошивания можно получать поверхности как с прямой, так и с криволинейной осью.

Два варианта прошивания:

- 1) прямое копирование: электрод-инструмент над заготовкой (рисунок 1.11а);
- 2) обратное копирование: заготовка над электродом-инструментом (рисунок 1.11б).

В этом случае движение подачи может осуществлять заготовка. При обратном копировании облегчается удаление продуктов обработки и за счет сокращения числа боковых разрядов через частицы расплавленного металла в межэлектродном промежутке повышается точность обработки.

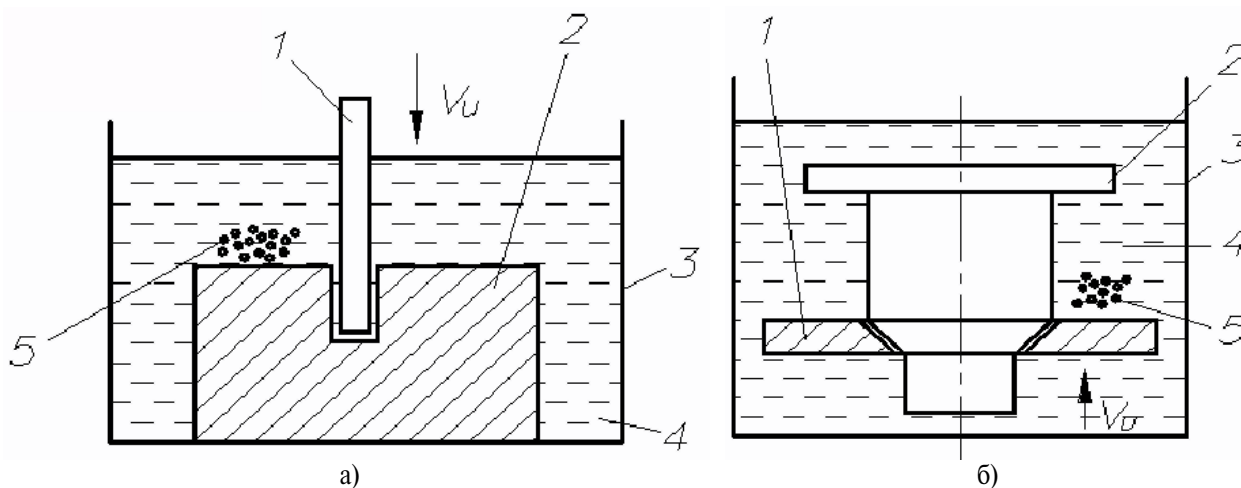


Рисунок 1.11 – Схема электроэрозионного прошивания:

- а – прямое копирование; б - обратное копирование; 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – ванна; 4 – диэлектрическая жидкость; 5 – продукты обработки

Электроэрозионное шлифование (рисунок 1.12.) аналогично схеме традиционного круглого наружного шлифования однако вместо шлифовального круга применяется металлический электрод-инструмент 1. Он совершает вращательное и поступательное движение к заготовке 2 со скоростью V_H . Диэлектрическая жидкость 3 подается в МЭП

поливом из насадки 4. При обработке заготовок небольших размеров процесс осуществляется в ванне с диэлектриком. Может быть как встречным, так и попутным.

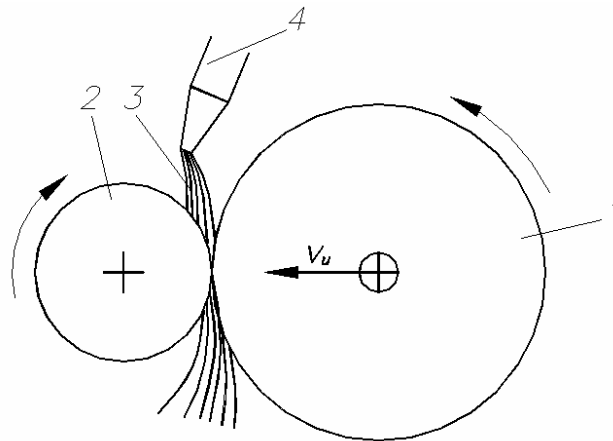


Рисунок 1.12 – Схема электроэрозионного шлифования:
1 – вращающийся электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – диэлектрическая жидкость;
4 – насадка

Разрезание профильным и непрофильным инструментом включает разделение заготовок на части - **отрезание** - и получение непрямолинейного контура - **вырезание**, которое выполняется только непрофильным электродом-инструментом. При разрезании (рисунок 1.13а) профильный электрод-инструмент может быть выполнен в виде диска или пластины. Вращающийся металлический диск-электрод 1 перемещается к заготовке 2 со скоростью $V_{ш}$ и в плоскости вращения вдоль детали. Обработка осуществляется в ванне 3 с диэлектриком 4.

При применении непрофильного электрода (рисунок 1.13б) инструмент 1 выполняют в форме круглой проволоки или тонкого стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью $V_{ш}$ в любой части заготовки 2. Для устранения влияния износа электрода инструмента на точность прорезаемых пазов проволоку постоянно перематывают вдоль ее оси со скоростью V . Разрезание осуществляют в ванне с диэлектриком.

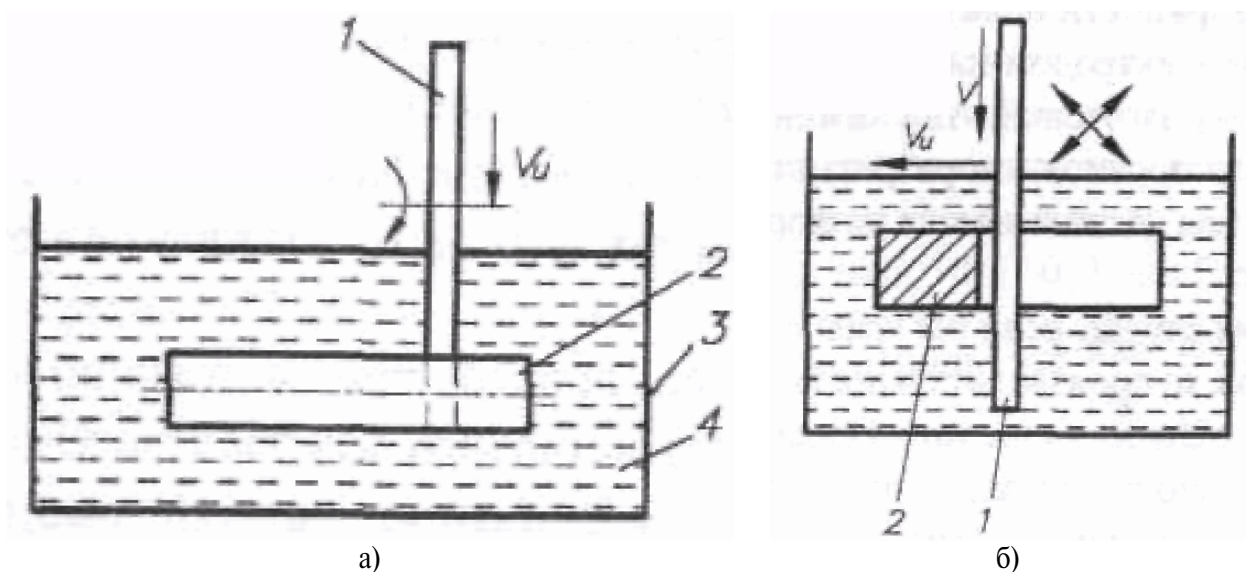


Рисунок 1.13 – Схема электроэрозионного разрезания:
а – отрезание; б – вырезание непрофильным инструментом; 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – ванна; 4 – диэлектрическая жидкость

Электроэрозионное упрочнение включает в себя легирование и наращивание поверхности и осуществляется, как правило, на воздухе. Частицы расплавленного металла инструмента не успевают остыть и оседают на поверхности заготовки, образуя на ней слой сплава, насыщенного легирующими элементами электрода-инструмента, или легирующим компонентом из состава рабочей среды. Помимо этого, нанесенный на заготовку слой оказывается закаленным до высокой твердости, что обеспечивает его повышенную износостойкость.

1.4 Технологические показатели электроэрозионной обработки

1.4.1 Производительность электроэрозионной обработки

Производительность Q электроэрозионной обработки - отношение объема или массы удаленного с заготовки металла ко времени обработки или отношение площади боковой поверхности паза ко времени обработки непрофилированным электродом. Площадь боковой поверхности определяется произведением длины пути, пройденного проволочным электродом-инструментом в направлении подачи за время обработки, на толщину заготовки. Также оценивается производительность при электроэрозионном разрезании диском или лентой.

При постоянной энергии импульсов, производительность равняется произведению энергии импульсов на их частоту. Однако реальные условия протекания каждого импульса существенно отличаются из-за различий в состоянии МЭП и текущего размера зазора, несоответствия между числом импульсов, выработанных генератором и реализуемых в зазоре и других причин. Поэтому при расчете производительности пользуются формулой

$$Q = \psi \cdot a \cdot A_{II} \cdot f, \quad (1.7)$$

где A_{II} - энергия импульса;

ψ - коэффициент, учитывающий количество холостых импульсов, который определяется отношением частоты импульсов f , вызывающих эрозию, к частоте импульсов $f_{z.u}$, вырабатываемых генератором $\psi = \frac{f}{f_{z.u}}$.

Для обеспечения высокопроизводительного режима необходимо, чтобы ψ был ближе к единице, т.е. чтобы как можно больше импульсов участвовало бы в процессе эрозии. На практике $\psi \approx 0.75...0.85$.

В формуле (1.7) через a обозначен объем металла, удаляемый импульсами с суммарной энергией 1 Дж.

Введя коэффициент $k = \psi \cdot a$ и выразив частоту следования импульсов через длительность импульса $f = \frac{1}{q \cdot \tau_{II}}$, расчет производительности электроэрозионной обработки ведут по зависимости

$$Q = \frac{k \cdot A_{II}}{q \cdot \tau_{II}}, \quad (1.8)$$

где q - скважность;

k - экспериментальный коэффициент зависящий от вида и состояния рабочей среды; ее прокачки, материалов и размеров электродов, характеристики импульсов.

На производительность электроэрозионной обработки оказывает влияние площадь обрабатываемой поверхности. При малом ее значении число участков, на которых возможен разряд, значительно меньше, чем число импульсов, поступающих от генератора, так как часть площади оказывается перекрыта газовыми пузырями от предшествующих разрядов, время существования которых в 5-10 раз больше, чем длительность импульса. По этой причине часть импульсов генератора не вызывают эрозии.

Количество продуктов обработки зависит также от энергии импульсов, их числа и времени действия, т.е. от мощности реализуемой в МЭП. При этом увеличивается количество продуктов обработки в МЭП, которые тормозят процесс съема металла. Поэтому для обеспечения высокой производительности необходимо правильное сочетание площади обрабатываемой поверхности и подводимой мощности. Такой выбор выполняют на основе построения пространственных диаграмм в координатах **сила тока – площадь обработки – производительность**.

При разрезании заготовок непрофилированным электродом-инструментом влияние площади обработки учитывают через произведение толщины заготовки на ширину паза, зависящую от диаметра электрода-инструмента. В наибольшей степени толщина заготовки влияет на производительность обработки при использовании проволоки диаметром менее 0,15 мм, когда реализуются наиболее неблагоприятные условия для удаления продуктов обработки из МЭП.

При прошивании отверстий по мере заглубления электрода-инструмента в заготовку усложняется удаление продуктов обработки из МЭП и поступление в него свежей жидкости. Поэтому применяют принудительную прокачку жидкости через МЭП, а также прокачку в сочетании с периодическим прекращением процесса и выведением электрода-инструмента из заготовки. Цикл такой замены составляет 15-30 с при скорости перемещения электрода-инструмента 5-6 мм/мин. Для ускорения удаления продуктов обработки из МЭП используют вибрацию электродов, их вращение и др.

На производительность электроэрозионной обработки оказывает влияние диэлектрическая жидкость. В зависимости от ее свойств изменяется доля полезного использования энергии импульса. В процессе с малой энергией импульса высокую производительность обеспечивает дистиллированная вода и керосин. При черновых режимах применяют тяжелые фракции нефти (масла, дизельное топливо и др.).

Загрязнение рабочей жидкости продуктами разрушения приводит к снижению производительности. Загрязненность оценивают процентным отношением массы продуктов обработки к массе жидкости. Загрязненность не должна превышать 4-5 % для черновых и 2-3 % для чистовых режимов. Кроме этого, необходимо периодически заменять рабочую жидкость из-за изменения ее свойств.

Глубина лунки, получаемой на заготовке после каждого импульса, зависит от свойств обрабатываемого материала (температуры плавления, теплопроводности). Различные металлы имеют различную *обрабатываемость* (отношение массы снятого исследуемого металла к массе металла, снятого с заготовки из стали 45 при одинаковых условиях обработки). Вольфрам при прямой полярности имеет коэффициент обрабатываемости 0.7; молибден - 0.8; алюминий - 1.5; магний - 2.5.

При электроконтактной обработке в воздухе применяются большие токи. Поэтому производительность процесса можно оценивать через силу тока

$$Q = k_2 \cdot I, \quad (1.9)$$

где k_2 - коэффициент, учитывающий режим обработки и материал электродов.

При разрезании заготовок

$$Q = k_3 \cdot I, \quad (1.10)$$

где $k_3 = \frac{k_2}{b}$; b - толщина заготовки.

При электроэрозионном легировании производительность оценивается отношением площади нанесенного слоя ко времени обработки.

Для повышения производительности электроэрозионной обработки параллельно располагают несколько электродов-инструментов. Если они подключены к одному генератору импульсов, обработка называется многоэлектродной. Если каждый электрод имеет свой источник питания обработку называют многоконтурной.

На рисунке 1.14 показана схема прошивания отверстий при многоэлектродной обработке. Тогда расчет производительности можно выполнять по формуле (1.11) с учетом числа n электродов-инструментов

$$Q = k_1 \cdot A_H f \cdot n, \quad (1.11)$$

где $k_1 = k \cdot k_M$, здесь k_M - коэффициент, учитывающий взаимное влияние контуров или электродов на скорость эрозии. Для обеспечения высокой производительности без усложнения оборудования число контуров не превышает 9-10, при этом число электродов в одной оправке может достигать сотен.

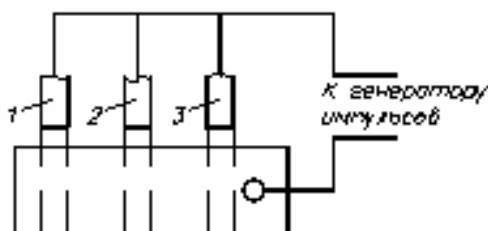


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема многоэлектродной обработки:
1, 2, 3 – электроды- инструменты; 4 – обрабатываемая заготовка

1.4.2 Точность электроэрозионной обработки

На точность электроэрозионной обработки влияют:

- 1 точность изготовления электрода-инструмента;
- 2 износ электрода-инструмента из-за эрозии;
- 3 погрешность формы и размеров углубления на заготовке относительно электрода-инструмента.

При электроэрозионной обработке износ электрода-инструмента на различных его участках оказывается разным. На рисунке 1.15 показано изменение числа разрядов по сечению при прошивании в заготовке 1 отверстия сложной формы электродом-инструментом 2. При этом возможное число импульсов, реализуемых в МЭП показано стрелками. Как видно, возможное число импульсов в местах сопряжения поверхностей отличается от прямолинейных участков. На участках электрода-инструмента, имеющих вогнутость число разрядов меньше, и износ на них будет меньше.

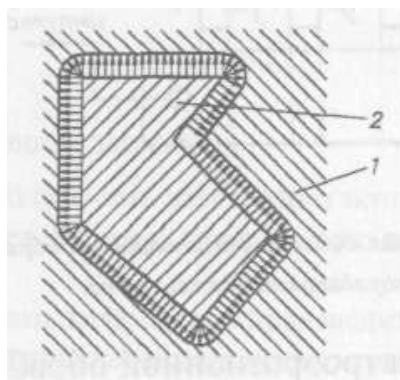


Рисунок 1.15 – Характер изменения числа разрядов по сечению при прошивании отверстия сложной формы электродом-инструментом

Таким образом, в процессе обработки форма и размеры электрода-инструмента в результате износа нарушаются. Учитывая, что окончательный профиль углубления формируется неизношенным участком электрода-инструмента, то его необходимо выполнять на 1-2 квалитета точнее, чем обрабатываемые детали.

Характер износа электрода-инструмента 1 при прошивании отверстия в заготовке 2 показан на рисунке 1.16. Из-за износа концевой участок 3 электрода-инструмента потерял свою первоначальную форму, показанную пунктирной линией. Поэтому, если прекратить прошивание сразу после образования в заготовке сквозного отверстия, то оно будет коническим. Для придания ему требуемой цилиндрической формы электрод-инструмент перемещают до тех пор, пока не прекратятся боковые разряды и не сформируется отверстие с диаметром d_o , большим, чем диаметр d_{II} электрода-инструмента, на удвоенный размер бокового зазора S_o .

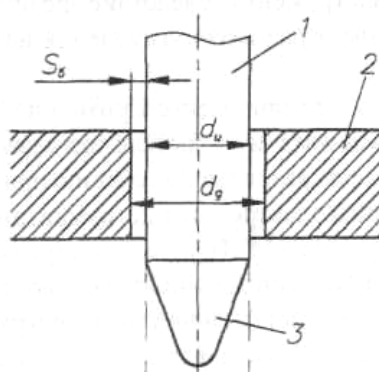


Рисунок 1.16 – Характер износа электрода-инструмента при прошивании отверстия в заготовке

Когда необходимо обработать глухое отверстие, то на завершающей стадии заменяют изношенный электрод-инструмент на новый.

В процессе вырезания заготовок по контуру непрофилированным электродом-инструментом (проволокой) постоянный по времени его износ не влияет на время. Но за счет уменьшения диаметра проволоки из-за износа уменьшается ее прочность, соответственно, усилие натяжения, что снижает способность электрода-инструмента сохранять прямолинейность в процессе обработки, т.е. снижает точность формы и размеров детали.

Когда непрофилированным электродом-инструментом обрабатывают узкие пазы, то износ проволоки будет существенно влиять на точность размеров (рисунок 1.17). Если бы электрод-инструмент 1 не изнашивался, то ширина получаемого на заготовке паза превышала бы диаметр проволоки d_{np} на удвоенный размер зазора S . Однако из-за износа электрода-инструмента фактическая ширина паза 2 определяется

$$b = a + 2 \cdot S, \quad (1.12)$$

где a - размер изношенного электрода-инструмента;
 S - боковой зазор.

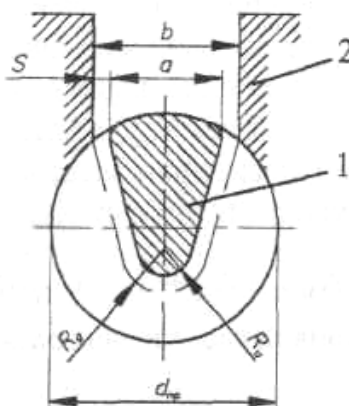


Рисунок 1.17 – Схема, поясняющая влияние износа проволочного электрода-инструмента на точность обрабатываемого паза в заготовке

Износ проволоки приводит к формированию паза с уклоном порядка $1-2^\circ$.

Износ инструмента составляет:

1. для схемы прошивания сталей на электроискровом режиме медным и латунным электродами 30-95 % от объема снятого с заготовки металла;
2. на электроимпульсном режиме медно-графитовыми и графитовыми электродами-инструментами 0.1-0.4%;
3. для электроконтактной обработки в жидкости 10-40 %;
4. при электроконтактном разрезании на воздухе до 30 %.

Для снижения влияния износа электродов-инструментов на точность электроэрозионной обработки предпринимают следующее:

1. изготавливают инструмент из материала стойкого к эрозии (из вольфрама, меднографита, коксографитовых композиций);
2. применяют безыносные схемы, (часть материала с заготовки или из рабочей среды осаждают на электроде-инструменте, компенсируя его износ);
3. заменяют изношенные участки электрода-инструмента путем продольного перемещения или заменяют весь инструмент;
4. производят правку и калибровку рабочей части электрода-инструмента.

Для оценки суммарной погрешности Δ_Σ электроэрозионной обработки складывают погрешности изготовления электрода-инструмента Δ_H , его износ Δ_Δ и систематические погрешности, свойственные электроэрозионной и механической обработке $\Delta_{M.O.}$, а также учитывают случайные погрешности формы и размеров углублений на заготовке относительно электрода-инструмента Δ_Φ и случайные погрешности Δ_1 , присущие для любого вида обработки

$$\Delta_\Sigma = \Delta_{M.O.} + \Delta_H + \Delta_\Delta + k \cdot \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_\Phi^2}, \quad (1.13)$$

где k - коэффициент кривой рассеивания размеров (для закона нормального распределения $k = \frac{1}{9}$).

Точность изготовления деталей: при работе профильным электродом-инструментом на электроискровом режиме - 6-7-го качества, непрофилированным - 5-6-го качества. При электроимпульсном режиме - 9-11-му качеству. При электроконтактном шлифовании - 7-8-й качества, а при разрезании в воздухе - 16-17 качества. Погрешность электроэрозионного легирования оценивают неравномерностью наносимого слоя, которая может достигать 20 % его толщины.

1.4.3 Качество поверхности при электроэрозионной обработке

В процессе электроэрозионной обработки удаление металла с заготовки происходит за счет серии импульсов, воздействующих на смежные участки поверхности. При этом форма и размеры лунки будут отличаться от параметров углубления после единичного разряда. На рисунке 1.18 показано изменение диаметра $d_{л}$ и глубины $h_{л}$ лунки по сравнению с теми же параметрами (d_1, h_1) после единичного разряда. Эта разница будет зависеть от расстояния l между центрами соседних лунок. Для оценки взаимного влияния импульсов пользуются коэффициентом перекрытия $\beta = \frac{l}{d_{л}}$.

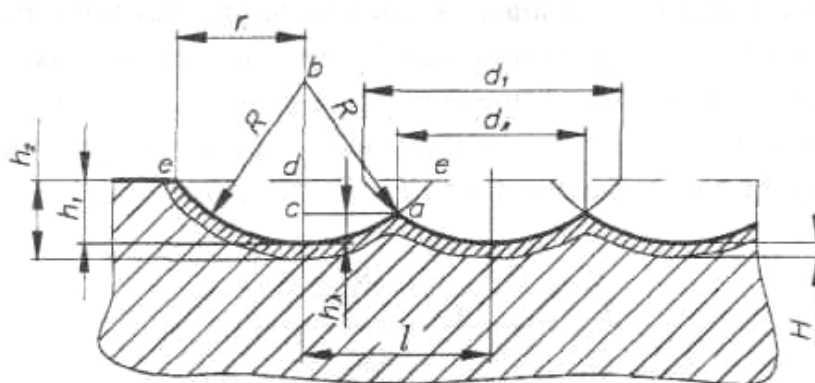


Рисунок 1.18 – Схема формирования шероховатости поверхности при электроэрозионной обработке

Размеры полученных на обрабатываемой поверхности лунок возрастают с повышением энергии импульсов и уменьшением частоты их следования.

Из рисунка 1.18 видно, что высота неровностей $h_{л}$ зависит от степени перекрытия лунок. В этом случае высота неровностей профиля определится

$$R_z = \frac{h_{л1} + h_{л2} + h_{л3} + h_{л4} + h_{л5}}{5}, \quad (1.14)$$

где $h_{лi}$ - глубина одной из пяти лунок в пределах базовой длины.

Если допустить, что размеры всех лунок на участке поверхности, где измеряют шероховатость одинаковы, то можно считать, что $R_z \approx h_{л}$. Так как размер лунки зависит от энергии импульса, то высоту неровностей на обрабатываемой поверхности можно определить как

$$R_z = k_H \cdot A_H^P, \quad (1.15)$$

где k_H - коэффициент, зависящий от режима обработки, материала электродов, их размеров, вида и состояния рабочей среды. Так на чистовых режимах при обработке твердых сплавов $k_H = 1 - 5$; при обработке сталей $k_H = 2 - 12$; на черновых режимах $k_H = 10 - 50$. P - показатель степени, характеризующий форму лунки, и в расчетах принимают $P = \frac{1}{3}$.

Электроэрозионная обработка обеспечивает следующую шероховатость поверхности: после обработки твердых сплавов на электроискровом режиме $R_a = 0.2 - 0.3 \text{ мкм}$, после обработки сталей $R_a = 0.3 - 0.6 \text{ мкм}$, при шлифовании в жидкости $R_a = 0.5 - 0.8 \text{ мкм}$, при разрезании $R_z = 80 - 200 \text{ мкм}$; при электроконтактном обдирочном шлифовании и разрезании на воздухе $R_z = 150 - 400 \text{ мкм}$.

При электроэрозионной обработке нарушенный поверхностный слой формируется за счет части расплавленного металла, оставшегося на поверхности лунки, и прилегающего к ней слоя металла со структурными изменениями из-за быстрого нагрева и охлаждения материала.

На рисунке 1.19 показана схема строения поверхностного слоя после электроэрозионной обработки. Измененная зона, образуемая слоем 1, содержит продукты диэлектрической среды, а также, углерод и элементы, входящие в состав электрода-инструмента. У заготовок из стали в этой зоне образуются карбиды железа, способствующие упрочнению поверхности.

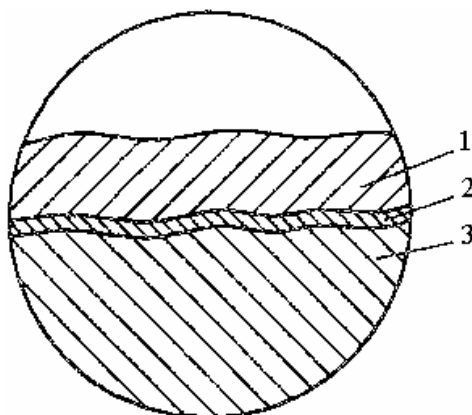


Рисунок 1.19 – Схема строения поверхности слоя после электроэрозионной обработки:
 1 – белый слой, в котором имеют место химико-термические превращения; 2 – переходный слой, в котором происходят только термические превращения; 3 – неизменённый металл заготовки

Когда обработка ведется импульсами высокой энергии, то в начале разряда нагревается и плавится металл на поверхности, после чего теплота распространяется вглубь. Поэтому для нагрева внутренних слоев требуется некоторое время. Так как время разряда мало, а мощность его значительна, то возникает большая разница температур по глубине. Наружные слои, как более нагретые, расширяются больше. Однако в начале разряда металл в зоне лунки не обладает достаточной пластичностью, поэтому в нем возникают значительные внутренние напряжения, вызывающие разрыв. В конце импульса в результате резкого охлаждения нагретого металла жидкой рабочей средой вновь возникает большой перепад температур под лункой и появляются внутренние напряжения, которые также приводят к образованию трещин. Особенно это проявляется при обработке твердых сплавов.

Толщина измененного слоя значительно превышает высоту неровностей.

Толщину H измененного слоя можно определить расчетным путем с учетом граничной температуры. Она находится через глубину h_1 единичной лунки и расстояние h_2 от поверхности до границы, где имеют место изменения обрабатываемого металла, т.е. где наблюдается температура начала фазовых превращений материала заготовки. Как видно на рисунке 1.18 $H = h_2 - h_1$. При этом толщину измененного слоя рассчитывают для донной части лунки, что позволяет определить истинное значение слоя без учета воздействия соседних импульсов.

Для расчета глубины измененного слоя используют зависимость

$$H = k_T \cdot A_H^P, \quad (1.16)$$

где k_T - коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и принимается $k_T = (1.8 - 4)k_M$.

При обработке в воздухе длительность импульсов больше, чем при работе в жидкости, а поэтому глубина измененного слоя также больше (таблица 1.1). После электроконтактного разрезания на воздухе на заготовке формируется литая структура.

Таблица 1.1 – Глубина измененного слоя в зависимости от режима обработки

Режим обработки	Глубина измененного слоя H, мм
Черновая обработка (на электроимпульсном режиме)	0.1-0.4
Чистовая обработка (на электроискровом режиме)	0.004-0.1
Шлифование в жидкости	0.005-0.08
Разрезание в жидкости	0.05-0.1
Электроконтактная обработка на воздухе	≤ 5

У всех сплавов при $H \geq 0,1$ мм наблюдаются микротрещины. Одним из способов снижения толщины измененного слоя является предварительный подогрев заготовки. Однако это усложняет конструкцию станков и их эксплуатацию.

Состояние поверхностного слоя определяет эксплуатационные показатели деталей (износостойкость, циклическую прочность, коррозионную стойкость). При электроэрозионной обработке положительным являются повышение твердости поверхности при сохранении вязкой сердцевины, что повышает износостойкость поверхности. Наличие на поверхности большого количества лунок и их плавное сопряжение благоприятно сказывается на условиях удержания смазки, т.к. эти лунки выполняют роль микрокарманов.

1.5 Электроэрозионное оборудование

Станки для электроэрозионной обработки кроме механической части имеют в своем составе генератор импульсов, систему очистки и подачи рабочей среды в зону обработки, а также средства регулирования и управления процессом.

Для уменьшения потерь энергии в соединительных проводах все элементы необходимо размещать как можно ближе к механической части станка. Электроэрозионное оборудование может быть универсальным, специализированным и специальным. Для их комплектации используются унифицированные узлы-генераторы, приводы и регуляторы.

1.5.1 Генераторы импульсов

В электроэрозионных станках применяются релаксационные, магнитонасыщенные, ламповые и полупроводниковые генераторы. При расчете и выборе генератора исходят из условия получения требуемой формы и мощности импульса. Черновую и чистовую обработку выполняют от одного генератора.

1.5.1.1 Релаксационные генераторы

Это генераторы, у которых параметры импульса определяются состоянием межэлектродного промежутка: RC -генераторы (рисунок 1.20а), RLC -генераторы (рисунок 1.20б) и RCL -генераторы (рисунок 1.20в); CL и LC -генераторы, (рисунок 1.20г), CC -генератор (рисунок 1.20д).

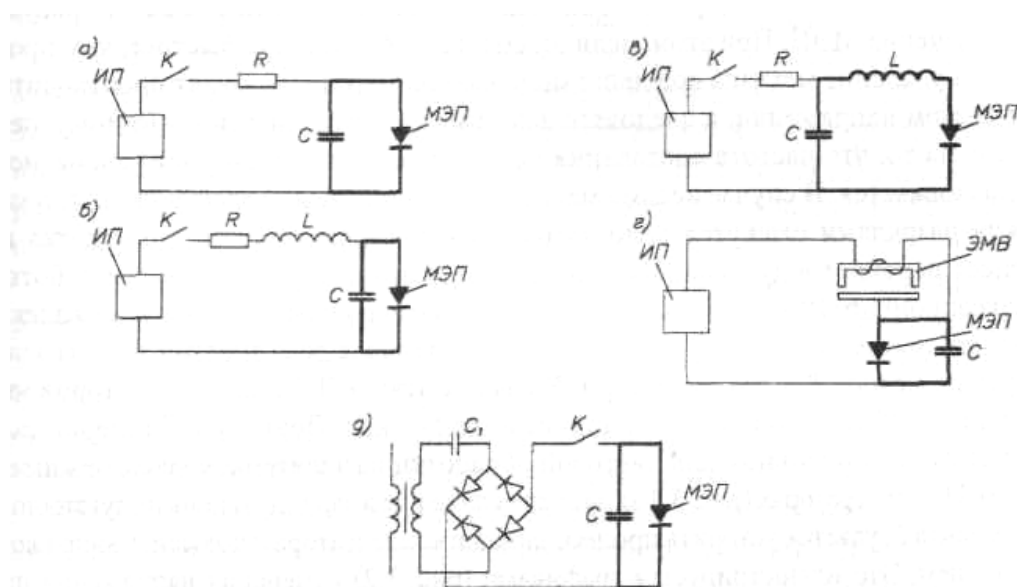


Рисунок 1.20 – Принципиальные схемы релаксационных генераторов импульсов:
а – RC -генератор; б – RLC -генератор; в – RCL -генератор; г – CL и LC -генераторы; д – CC -генератор

Все релаксационные генераторы содержат *зарядную* и *разрядную* (на рисунке 1.20 последняя выделена жирной линией) цепи. В зарядной цепи установлены источник питания ИП и выключатель К. В RC -, RLC - и RCL -схемах, кроме того, предусмотрен токоограничивающий резистор R . Разрядная цепь содержит конденсатор C и межэлектродный промежуток МЭП, а в RCL -схеме (рисунок 1.20в) помимо этого в разрядную цепь включен индуктивный элемент L .

Принцип работы RC -генератора (рисунок 1.20а). При замыкании выключателя К конденсатор C через резистор R заряжается от источника питания ИП. В результате напряжение на конденсаторе C , а следовательно, и на межэлектродном промежутке МЭП повышается. Когда оно достигает пробивного для данного размера межэлектродного промежутка, происходит его пробой, и энергия, запасенная в конденсаторе C за время заряда, выделяется в МЭП. После этого напряжение на конденсаторе падает, и разряд через межэлектродный промежуток прекращается. С этого момента начинается период *деионизации* межэлектродного промежутка, т.е. восстановление его диэлектрической прочности, и возобновляется зарядка конденсатора C . Время зарядки конденсатора определяется постоянной времени $\tau = RC$. Для нормального протекания процесса необходимо, чтобы время зарядки было больше периода деионизации МЭП, иначе возможен переход импульсного разряда в дуговой. Необходимое соотношение этих периодов осуществляется подбором сопротивления резистора R и емкости конденсатора C . Чем их значения больше, тем медленнее происходит зарядка конденсатора.

По мере удаления металла с поверхности заготовки расстояние между электродами возрастает до такой величины, при которой напряжение оказывается недостаточным для разряда. Поэтому для поддержания процесса необходимо сближать электроды до требуемого значения МЭП. В случае малых расстояний между электродами паузы между разрядами окажутся недостаточными для деионизации промежутка и процесс перейдет в дуговой. Таким образом, режим работы *RC*-генератора определяется физическим состоянием межэлектродного промежутка. Их КПД не превышает 25 %, а мощность ограничивается 5-7 кВт.

Релаксационные генераторы не обеспечивают высокую производительность процесса, так как с ростом энергии импульса возрастает время накопления заряда и падает частота следования импульсов.

1.5.1.2 Ламповые генераторы

В этом случае (рисунок 1.21) параметры генератора не зависят от физического состояния межэлектродного промежутка, а поэтому искровой разряд не может перерасти в дуговой. Это дает возможность реализовывать импульсы с высокой частотой следования (до 20 кГц).

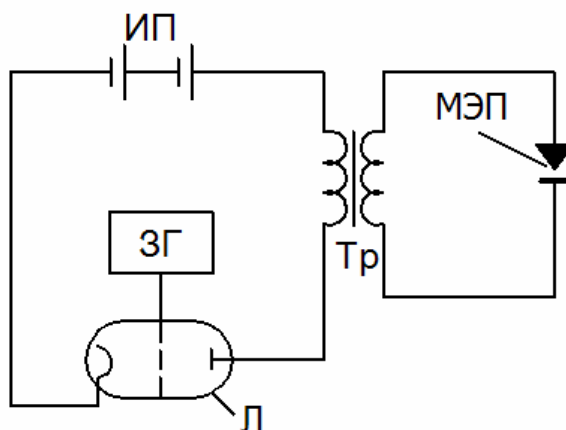


Рисунок 1.21 – Схема лампового генератора импульсов

Недостатками ламповых генераторов являются низкий КПД, высокое напряжение питания.

1.5.1.3 Магнитонасыщенные генераторы

В сравнении с ламповыми обеспечивают более высокую энергию импульса. Наибольшее распространение получили генераторы с магнитными усилителями (рисунок 1.22).

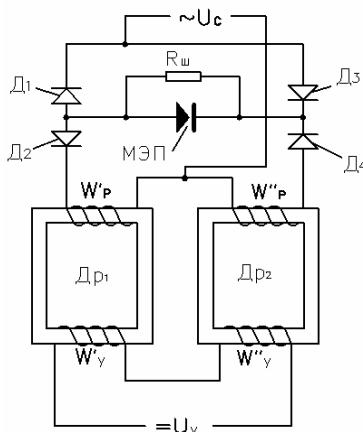


Рисунок 1.22 – Схема магнитонасыщенного генератора с магнитными усилителями

Магнитонасыщенные генераторы просты, надежны в работе. Однако частота следования импульсов зависит от частоты питающего сетевого напряжения и не может превышать 150 Гц, что применимо только для черновой обработки на грубых режимах.

1.5.1.4 Генераторы на управляемых полупроводниковых приборах

Это генераторы с широким диапазоном режимов обработки, у которых частота следования импульсов не зависит от свойств межэлектродного промежутка. Применяются два вида генераторов этого типа: на основе **инверторов** (рисунок 1.23) и **широкодиапазонные генераторы импульсов**.

Недостаток схемы на основе **инверторов** - непостоянство напряжения пробоя, что приводит к изменению режима обработки.

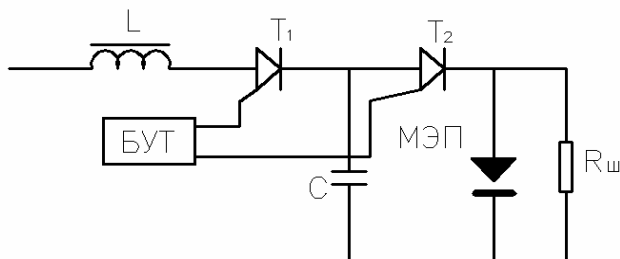


Рисунок 1.23 – Схема генераторов импульсов на управляемых тиристорах

Для стабилизации напряжения пробоя применяются схемы генераторов со стабилитроном Ст (рисунок 1.24).

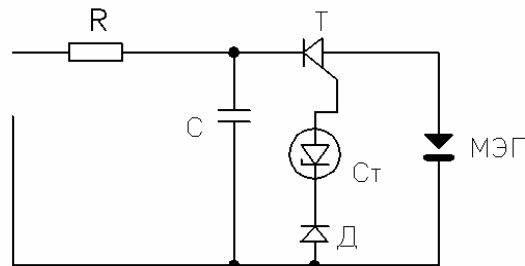


Рисунок 1.24 – Схема генераторов импульсов со стабилизацией напряжения пробоя

С помощью широкодиапазонных генераторов можно работать на всех режимах электроэрозионной обработки. Помимо этого, они вырабатывают импульсы такой формы, при которой обеспечивается минимальный износ электрода-инструмента.

На рисунке 1.25 приведена схема широкодиапазонного генератора.

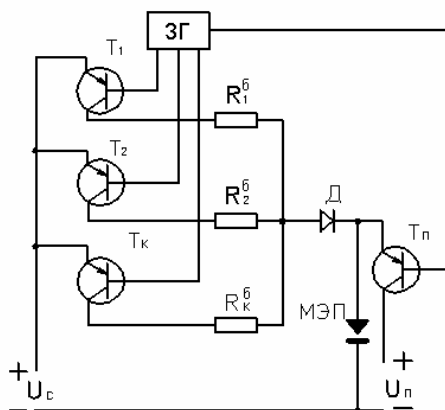


Рисунок 1.25 – Схема широкодиапазонного генератора импульсов

1.5.2 Регуляторы подачи электрода-инструмента

Служат для поддержания размера межэлектродного промежутка в течение времени обработки.

Исполнительный механизм 1 (рисунок 1.26) перемещает электрод-инструмент к заготовке или от нее в зависимости от сигнала из межэлектродного промежутка 5. Сигнал о положении электрода-инструмента относительно обрабатываемой поверхности снимают с помощью измерительного преобразователя 4 и подают его в блок сравнения 3. В нем заранее устанавливают опорный сигнал, который служит базой для сравнения. Если поступающий сигнал отличается от опорного, то их разность передается через усилитель 2 и далее, с учетом знака, на исполнительный механизм 1, который перемещает электрод-инструмент. Величина перемещения зависит от значения поступившего сигнала. Зажимы 6 и 7 служат для подключения генератора импульсов.

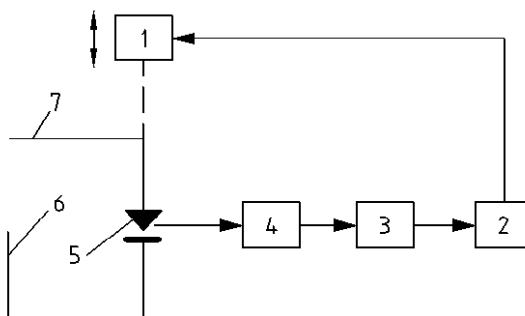


Рисунок 1.26 – Структурная схема регулятора зазора:
1 – исполнительный механизм; 2 – усилитель; 3 – блок сравнения; 4 – измерительный преобразователь;
5 – МЭП; 6 и 7 – зажимы для подключения генераторов импульсов

В рассмотренной схеме величина опорного сигнала задается жестко и не зависит от изменяющихся условий обработки, что не обеспечивает оптимального режима. Поэтому используют экстремальные схемы регуляторов. В этой схеме (рисунок 1.27) сигнал подается не только на исполнительный механизм 1, но и через измерительный преобразователь 6 на блок оптимизации 7. С помощью него учитывается реальное состояние межэлектродного промежутка 2 и осуществляется корректировка управляющего сигнала для обеспечения наибольшего технологического показателя. Далее сигнал поступает на усилитель 8 и на изменение опорного сигнала в блоке сравнения 4.

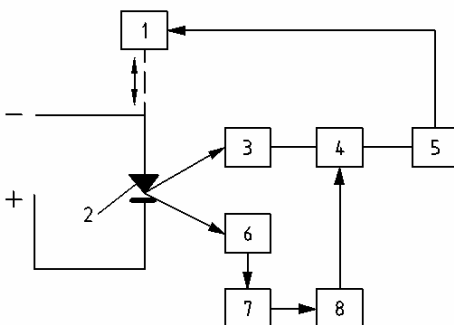


Рисунок 1.27 – Структурная схема экстремального регулятора зазора:
1 – исполнительный механизм; 2 – МЭП; 3 – преобразователь; 4 – блок сравнения; 5 – усилитель;
6 – измерительный преобразователь; 7 – блок оптимизации; 8 – усилитель

В качестве сигнала, который несет информацию о размере зазора могут использоваться мгновенное значение напряжения на электродах, его среднее значение на электродах, средняя сила тока в цепи электродов, сопротивление среды.

Блок сравнения опорного и входного сигналов имеет источник опорного сигнала и схему сравнения, которые можно разделить на **резистивные** и **стабилитронные**. В первом случае сравнение сигналов происходит на резисторе, который включен между входным сигналом и сигналом с эталонного источника. Во втором - сравнение напряжения происходит на накопительном конденсаторе с заданным напряжением, которое зафиксировано стабилитроном.

Усилители бывают двух типов - электрические и гидравлические. Электрические усилители (релейные, магнитные, ламповые, транзисторные) используются в небольших станках. Безинерционные гидравлические усилители применяют в тяжелых станках с массой электрода-инструмента свыше 30 кг, а также в многоконтурных станках с несколькими рабочими головками.

В качестве **исполнительных элементов** в регуляторах зазора применяются гидроцилиндры и электромеханические устройства. Поэтому различают следующие типы регуляторов зазора: *электрогидравлические*, *электромеханические* и *экстремальные*.

Принцип действия электрогидравлического регулятора (рисунок 1.28). Импульсный ток от генератора через зажимы 3 поступает на электроды 2 и 4, напряжение с которых снимается через делитель напряжения 5. Полученный сигнал сравнивается с сигналом на резисторе 6, подключенном к опорному источнику 7. Полученный таким образом управляющий сигнал поступает на обмотку соленоида 9, перемещающего золотник 8. В результате масло под давлением поступает в верхнюю или нижнюю часть гидроцилиндра, перемещая поршень 1, со штоком которого связан электрод-инструмент 2. Для снижения сил трения и повышения чувствительности и быстродействия золотнику 8 может придаваться вращательное движение. Основное преимущество электрогидравлических регуляторов перед электромеханическими это то, что шток поршня жестко связан с электродом-инструментом, а поэтому отсутствуют люфты. Недостатки - высокая стоимость изготовления и сложности наладки.

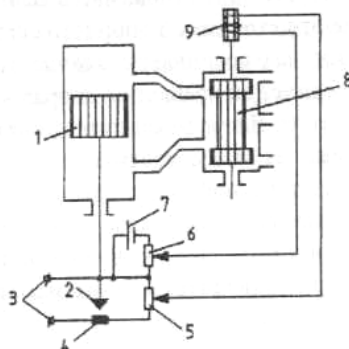


Рисунок 1.28 – Принципиальная схема электрогидравлического регулятора зазора:

1 – поршень гидроцилиндра; 2 и 4 – электроды; 3 – зажимы для подключения генераторов импульсов; 5 – делитель напряжения; 6 – резистор; 7 – источник опорного сигнала; 8 – золотник; 9 – соленоид

Электромеханический регулятор зазора (рисунок 1.29). От генератора 1 импульсы напряжения поступают на электроды 2 и 3, параллельно которым подключена часть делителя напряжения 5. Сюда же поступает напряжение от источника 6 опорного сигнала. Если между сигналами с электродов и источника 6 возникает различие, то через обмотку двигателя 4 потечет ток и якорь придет во вращение, направление которого зависит от знака разностного напряжения. Якорь механически связан с микровинтом, который поступательно перемещает гайку, жестко связанную с электродом-инструментом.

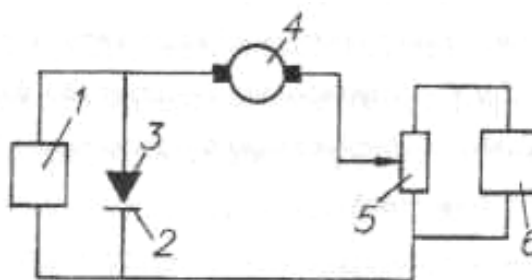


Рисунок 1.29 – Принципиальная схема механического регулятора зазора:
 1 – генератор импульсов; 2 и 3 – электроды; 4 – реверсивный электродвигатель; 5 – делитель напряжения;
 6 – источник опорного сигнала

В экстремальных регуляторах поддерживается режим максимальной производительности, как функции межэлектродного зазора. Более распространены регуляторы, у которых процесс оптимизируют по косвенным параметрам, к примеру, по отношению чисел рабочих и холостых импульсов. Регулятор поддерживает такой размер зазора, при котором это отношение максимально. Регуляторы зазора с такими системами называют **адаптивными**.

1.5.3 Системы рабочих перемещений электрода-инструмента

Три способа задания рабочих перемещений электроду-инструменту: обеспечение различных перемещений в пространстве жесткого электрода-инструмента; изменение формы гибкого электрода-инструмента; вибрация электрода-инструмента в направлении обработки.

В первом случае в станках применяются универсальные электроэрозионные головки (рисунок 1.30). Корпус 13 головки закреплен на плите 3 вертикального суппорта, которая перемещается по направляющим с помощью передачи 1 и пары 2 винт-гайка. За счет этого головке сообщается вертикальное рабочее перемещение.

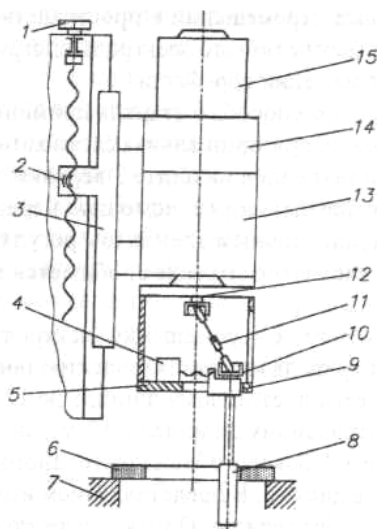


Рисунок 1.30 – Принципиальная схема универсальной электроэрозионной головки:
 1 – передача; 2 – пара винт-гайка; 3 – плита вертикального суппорта; 4 – регулятор бокового межэлектродного зазора; 5 – диск с радиальным пазом; 6 – обрабатываемая заготовка; 7 – рабочий стол; 8 – электрод-инструмент;
 9 – ползун; 10 – центральный шпиндель; 11 – вал; 12 – пустотелый шпиндель; 13 – корпус головки;
 14 – редуктор; 15 – электродвигатель

Сложное пространственное перемещение электрода-инструмента 8 обеспечивается механизмом привода головки. От электродвигателя 15 через редуктор 14 вращение передается пустотелому шпинделю 12, который через вал 11 сообщает движение

центральному шпинделю 10, установленному в ползуне 9. Последний от регулятора 4 бокового межэлектродного зазора перемещается вдоль радиального паза в диске 5. Деталь 6 со столом 7 закреплены неподвижно. Рассмотренная схема позволяет получить до одиннадцати различных движений электрода-инструмента, включая обработку зубчатых и резьбовых поверхностей.

С помощью второго способа можно изготавливать детали, имеющие отверстия с криволинейной осью. На рисунке 1.31 показана схема обработки таких отверстий и устройство для его реализации. Обработка в детали 1 отверстия 2 выполняется нежестким электродом-инструментом, рабочая часть 3 которого связана с гибкими поводками 5 и 6. На эти поводки действуют усилия, соотношение которых задается из условия обеспечения заданной кривизны отверстия на определенном его участке. При равенстве усилий на поводки 5 и 6 электрод-инструмент получает прямолинейное движение в следящем режиме подачи, и таким образом обрабатывается прямолинейный участок А отверстия. При приложении различных усилий рабочая часть 3 электрода-инструмента поворачивается, формируя криволинейный участок Б или В отверстия. Для соответствующего изменения усилий на поводки 5 и 6 применяются программные механизмы 7 и 8 с электрогидравлическим или электромеханическим приводом.

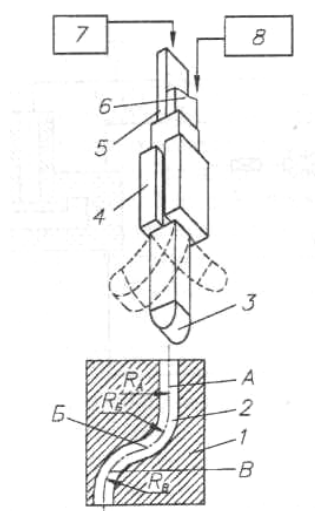


Рисунок 1.31 – Схема устройства для электроэрозионной обработки отверстий с криволинейной осью: 1 – заготовка; 2 – обрабатываемое отверстие; 3 – рабочая часть электрода-инструмента; 4 – электрод-инструмент; 5 и 6 – гибкие поводки; 7 и 8 – механизмы изменения усилий на поводки

Для реализации третьего способа перемещения используется электромагнитный вибратор, который крепится к ползуну рабочей головки станка. Электромагнит с электродом-инструментом как одно целое перемещаются в следящем режиме. Вибрация электрода-инструмента способствует лучшему удалению продуктов обработки из межэлектродного промежутка и повышает чувствительность регулятора подачи.

Для обеспечения необходимых рабочих перемещений соответствующие движения можно сообщать обрабатываемой заготовке. В этом случае используют вращающиеся и вибрационные столы, с неподвижно закрепленной заготовкой.

1.5.4 Система очистки и подачи рабочей жидкости в зону обработки

Для высокой производительности, точности и качества обработанной поверхности размерную электроэрозионную обработку осуществляют при прокачке рабочей жидкости через межэлектродный промежуток. Для этого станки оснащаются специальной гидравлической системой (рисунок 1.32).

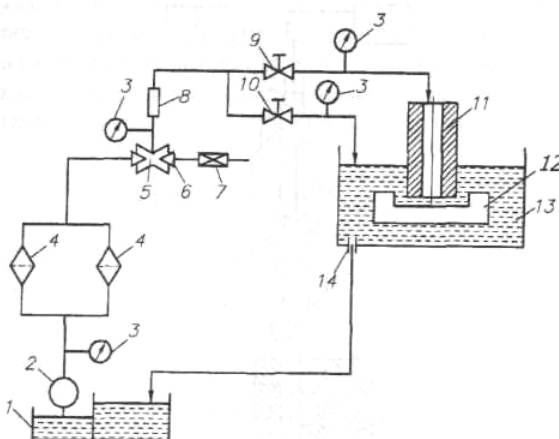


Рисунок 1.32 – Принципиальная схема гидравлической системы для прокачки рабочей жидкости:
 1 – бак; 2 – насос; 3 – манометры; 4 – фильтры; 5 – устройство регулирования расходной жидкости;
 6 – заслонка; 7 – преобразователь положения заслонки; 8 – ротаметр; 9 и 10 – краны; 11 – полый электрод-инструмент; 12 – обрабатываемая деталь; 13 – рабочая ванна; 14 – сливное отверстие

Из бака 1 рабочая жидкость подается насосом 2 через фильтры 4 и устройство 5 регулирования расхода в рабочую зону. В зависимости от условий обработки возможны два варианта подачи рабочей жидкости: либо при открытом кране 9 через полый электрод-инструмент 11 в межэлектродный промежуток с заготовкой 12; либо через кран 10 непосредственно в рабочую ванну 13. Для измерения давления рабочей жидкости служат манометры 3, а для измерения ее расхода - ротаметр 8.

Бак 1 представляет собой емкость из нескольких секций. Секции разделены перегородками, через которые жидкость попадает методом перелива.

В мелких станках ванна неподвижно закрепляется на столе, а рабочая жидкость периодически сливается в бак. При этом установка и снятие заготовки производится без жидкости. В крупных станках ванна постоянно заполнена рабочей жидкостью и может подниматься и опускаться, что облегчает установку детали.

Насос 2, как правило, центробежного типа с расходом 2-18 л/мин.

Когда необходимо высокое давление рабочей жидкости (0.5-2.5 МПа), используют шестеренчатые насосы.

Фильтры предназначены для очистки рабочей жидкости от продуктов обработки. Обычно последовательно устанавливают фильтры грубой и тонкой очистки.

Устройство для регулирования расхода 5 рабочей жидкости предназначены для изменения гидравлического режима обработки по командам от адаптивного устройства управления. На рисунке 1.32 такое устройство выполнено в виде эжектора. Используя в одной магистрали подачи рабочей жидкости несколько регуляторов расхода можно задавать различные комбинации режимов их работы, обеспечивая различные направления потока и расхода рабочей жидкости.

1.5.5 Механическая часть станков

Все станки для электроэрозионной обработки разделяются на прошивочные, шлифовальные, станки для разрезания профильным и непрофильным инструментом. Отдельную группу представляют станки для электроконтактной обработки на воздухе и установки для упрочнения и легирования.

Прошивочные станки предназначены для получения в заготовках отверстий, полостей и углублений. Станки, в которых для изготовления полостей пользуются профильным электродом-инструментом называют **копировально-прошивочными**. При этом

они позволяют обрабатывать не только полости, но и получать отверстия любого сечения и наносить различные надписи (наиболее распространенны).

Принципиальная схема копировально-прошивочного станка приведена на рисунке 1.33. На станине 1 смонтирован рабочий стол 2, на котором закрепляется заготовка. Обработка осуществляется в ванне 3 с рабочей жидкостью. Электрод-инструмент 18 закрепляется в электродержателе 8 и с помощью кареток 5 и 9 перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости. Электрод-инструмент 18 колеблется и поступательно перемещается к заготовке по сигналам регулятора, который приводит в действие двигатель 6 и вибратор 7, закрепленный на площадке 4. Стол и электрод-инструмент изолированы от станины станка диэлектрическими прокладками 17. Электрическая часть станка включает в себя генератор импульсов 10, блок управления 11 с приборами контроля режимов обработки. Рабочая жидкость подается в межэлектродный промежуток из бака 14 через магистраль 12. Насос 15 может подавать жидкость непосредственно в ванну 3 по магистрали 13. Для слива жидкости в бак 14 используется магистраль 16.

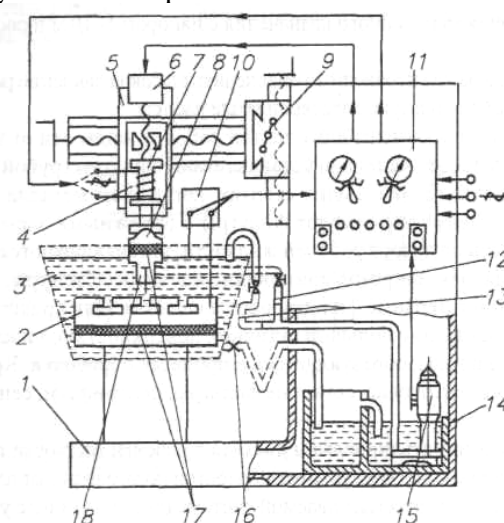


Рисунок 1.33 – Схема электроэрозионного копировально-прошивочного станка:

- 1 – станина; 2 – рабочий стол; 3 – ванна; 4 – площадка; 5 и 9 – каретки; 6 – двигатель регулятора зазора; 7 – вибратор; 8 – электродвигатель; 10 – генератор импульсов; 11 – блок управления; 12, 13 и 16 – магистрали для прохода рабочей жидкости; 14 – бак для рабочей жидкости; 15 – насос; 17 – диэлектрическая прокладка; 18 – электрод-инструмент

На рисунке 1.34 показан общий вид универсального прошивочного станка, предназначенного для прошивания углублений в заготовках массой до 100 кг.

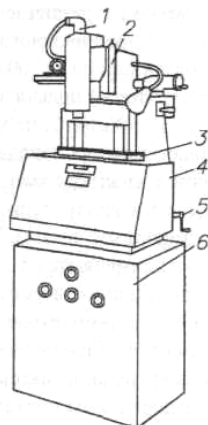


Рисунок 1.34 – Общий вид универсального прошивочного станка для обработки заготовок массой до 10 кг: 1 – регулятор подачи электрода-инструмента; 2 – электродержатель; 3 – рабочий стол; 4 – рабочая ванна; 5 – ручной механизм подъема ванны

Для обработки заготовок массой свыше 100 кг применяются прошивочные станки со станиной портального типа для их большей жесткости.

Значительную группу прошивочных станков составляют **специальные** станки, выпускаемые по индивидуальным заказам. Среди них наиболее распространены автоматы и полуавтоматы для электроэрозионного прошивания отверстий диаметром 0,15-0,5 мм.

Электроэрозионные шлифовальные станки комплектуются источником питания с постоянным напряжением. В качестве инструмента используется металлический диск, закрепленный на шпинделе, электрически изолированный от корпуса станка. Как правило, процесс ведут в масле.

Для обдирки крупных отливок и штамповок применяют черновое шлифование, при этом в качестве рабочей среды используют воду или воздух. Обдирочные электроэрозионные станки выполняются на базе обычных шлифовальных станков, у которых шлифовальный круг заменен на электрод-инструмент и дополнительно установлен источник постоянного напряжения.

Распространены **вырезные** электроэрозионные станки, предназначенные для разрезания заготовок непрофилированным проволочным электродом (рисунок 1.35). Обрабатываемая заготовка 21 устанавливается на вращающемся рабочем столе. Электрод-проволока 1 постоянно перематывается по направляющим роликам 2 и 13 с катушки 3 на катушку 12 и обратно. Относительно заготовки электрод-проволока перемещается с помощью кареток 4 и 11 от электродвигателей 6 и 8 через передачи 5 и 10. Режимы работы двигателей задаются регуляторами зазора 7 и 9. В качестве задающих элементов используются копиры 20 и 22, с которыми электрод-проволока находится в постоянном контакте. С помощью втулки 19 из диэлектрика, копиры изолируются от обрабатываемой заготовки, которая устанавливается на оси 18 и с помощью электродвигателя 15 через редуктор 17 приводится во вращение. Режим работы электродвигателя 15 устанавливается регулятором межэлектродного зазора 16. Обрабатываемая заготовка 21 и электрод-проволока подключены к генератору импульсов 14. Когда используется один копир, то его крепят сверху заготовки, получая после вырезания практически параллельные образующие.

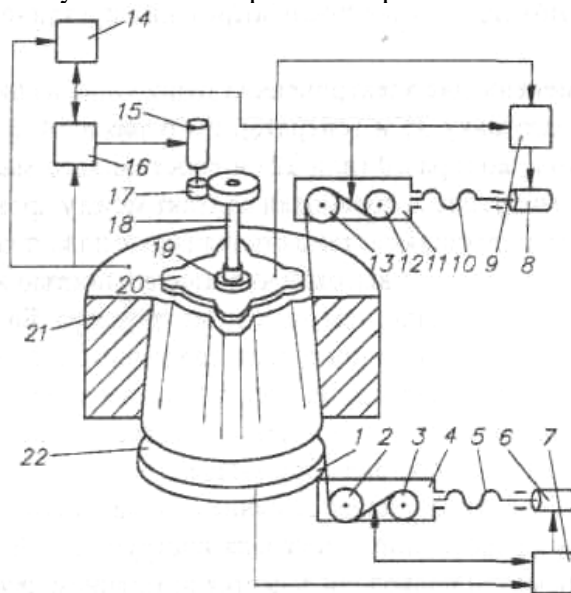


Рисунок 1.35 – Принципиальная схема вырезного электроэрозионного станка с проволочным электродом-инструментом:

- 1 – проволочный электрод-инструмент; 2 и 13 – нагревающие ролики; 3 и 12 – катушки; 4 и 11 – каретки; 5 и 10 – передачи винт-гайка; 6 и 8 – электродвигатели перемещения кареток; 7 и 9 – регуляторы зазора; 14 – генератор импульсов; 15 – электродвигатель привода заготовки; 16 – регулятор межэлектродного зазора; 17 – редуктор; 18 – ось вращения заготовки; 19 – втулки из диэлектрического материала; 20 и 22 – копиры; 21 – обрабатываемая заготовка

В станке применены две электрических цепи. Одна из них включает электрод-проволоку 1, заготовку 21 и генератор импульсов 14, а вторая состоит из электрода-проволоки, копира 20 (или 22) и собственного источника питания. Если в процессе обработки, контакт между проволокой и копиром прерывается, то регулирующая система станка подает команду на их сближение. Поэтому, контур обработанной детали повторяет профиль копира со сдвигом на размер межэлектродного промежутка. За счет сочетания движений кареток 4 и 11, управляемых регуляторами 7, 9, и вращения заготовки, можно получить любой контур с различным углом наклона образующей.

Отдельную группу составляют станки с фотокопировальными системами, которые производят вырезку контура в заготовке непосредственно по чертежу (рисунок 1.36).

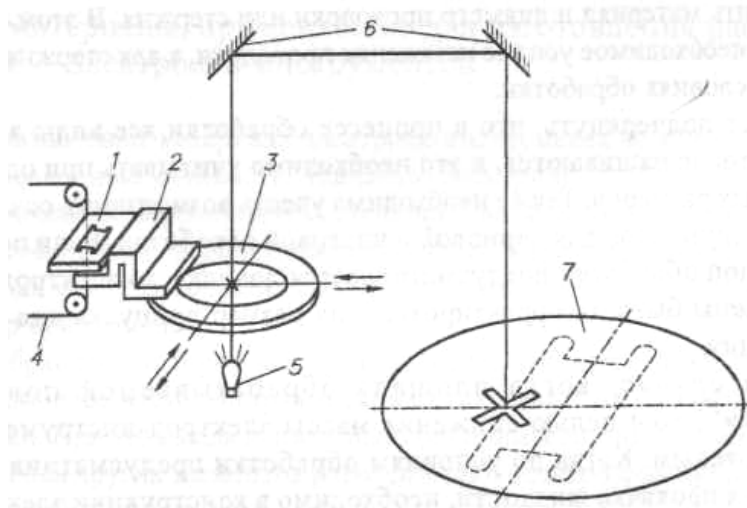


Рисунок 1.36 – Схема фотокопировального устройства электроэрозионного вырезания:
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – кронштейн станка; 3 – координатный стол проектора; 4 – проволочный электрод-инструмент; 5 – осветитель; 6 – оптическая система; 7 – экран с чертежом детали

Обрабатываемая заготовка 1 закрепляется на станке с помощью кронштейна 2, который связан с координатным столом 3 проектора. Свет от источника 5 освещает точку пересечения линий креста на столе, которая с помощью оптической системы 6 проецируется на экран 7. Если на экране поместить чертеж детали, выполненный в масштабе, и затем перемещать рабочий стол так, чтобы точка пересечений линий креста обегала контур чертежа детали, то такой же профиль можно перенести на заготовку 1, в которой проволокой 4 будет вырезано отверстие, соответствующее чертежу. Стол с чертежом и рабочий стол станка связаны пантографным устройством.

Если в качестве непрофилированного инструмента использовать стержень, то перемещая его конец по заданной траектории, можно на заготовке получить рисунок в виде обработанных углублений. Такие устройства называют **электрографами**. Процесс электроэрозионного маркирования осуществляется на воздухе.

1.6 Технологические процессы изготовления типовых поверхностей

1.6.1 Исходные данные для проектирования технологических процессов электроэрозионной обработки металлов

Исходные данные для проектирования:

1. Рабочий чертёж детали с техническими условиями.
2. Чертёж заготовки после операции, предшествующей электроэрозионной обработке.
3. Годовая программа выпуска изделий.

4. Техничко-экономические показатели процесса, по которому выполнялась операция до замены её электроэрозионной обработкой.
5. Каталог имеющегося электроэрозионного оборудования.
6. Каталог и альбомы чертежей имеющегося инструмента и приспособлений для электроэрозионной обработки.

1.6.2 Область технологического использования электроэрозионной обработки

При электроэрозионной обработке на электроискровом режиме получают поверхности с высокой точностью и малой шероховатостью при невысокой производительности. Кроме того, процесс на таком режиме энергоёмок. Значителен износ профильного инструмента. Поэтому обработка на электроискровом режиме эффективна при изготовлении точных деталей небольших габаритов. Эффективность повышается, если материал детали трудно поддаётся механической обработке или обрабатываемая поверхность имеет сложную форму.

Электроэрозионная обработка на электроимпульсном режиме характеризуется большой энергией разряда, поэтому высота неровностей в этом случае больше, но и больше производительность процесса.

Такую обработку используют для замены фрезерования крупных полостей сложной формы, углублений, каналов, где механической обработкой не удаётся достичь высокой производительности или когда затруднён доступ инструментов в зону резания.

Электроконтактное резание в жидкости позволяет получить большую производительность процесса, чем при механическом резании заготовок. Качество поверхности и точность обработки невысоки. Недостатки - интенсивный износ электрода-инструмента, разбрызгивание рабочей жидкости в процессе обработки. Способ применяется в качестве заготовительной операции при получении штучных заготовок из труднообрабатываемых токопроводящих материалов.

Шлифование в жидкой среде обеспечивает малую шероховатость и высокую точность, но по производительности уступает абразивному шлифованию. Способ используют для заточки и доводки инструмента, обработки нежёстких конструкций, а также заготовок, где недопустимы заусенцы.

Электроконтактный метод в воздухе обеспечивает значительную производительность и низкую энергоёмкость. Шероховатость и точность уступают другим способам электроэрозионной обработки. Используется для высокопроизводительной черновой обработки заготовок больших габаритов.

Электроэрозионное упрочнение и легирование по производительности уступает другим методам упрочнения, но не повреждает исходный материал, обеспечивает равномерный слой и более технологичен.

1.6.3 Порядок проектирования технологических процессов электроэрозионной обработки

Последовательность обработки:

1. Исходя из формы обрабатываемой поверхности, ее размеров и требований к шероховатости, намечают один или несколько способов обработки. Выбирают рациональную схему обработки и рассматривают возможность многоконтурной или многоэлектродной обработки.
2. Намечают маршрут технологического процесса.
3. Рассчитывают технологические показатели процесса для каждой операции: производительность, точность, качество поверхности и режимы обработки.

Режимы электроэрозионной обработки рассчитывают так:

1. выбирают технологический критерий, который должен быть обеспечен в конце операции (производительность, точность, шероховатость обработанной поверхности);
2. для выбранного критерия находят энергию импульса A_{II} ;
3. по характеру операции (черновая или чистовая) находят напряжение холостого хода, среднее напряжение, а также требуемую рабочую жидкость;
4. определяют длительность импульса;
5. находят средний ток и ток короткого замыкания;
6. для известной энергии импульса и его длительности находят остальные технологические показатели процесса.

Рассчитанные таким образом показатели точности, шероховатости и состояния поверхностного слоя сравнивают с требованиями чертежа и технических условий. Если при этом хотя бы один из показателей оказывается ниже требуемого уровня, намечают последующие операции с другими методами обработки (механическим, электрохимическим и т.д.).

7. На основе расчета производительности находят скорость подачи электрода-инструмента.
8. Находят основное время обработки детали на станке

$$T_0 = \frac{Z}{V_{II.CP}}, \quad (1.17)$$

где Z - величина припуска, принимаемая равной углублению электрода-инструмента в направлении подачи.

9. По соответствующим нормативам находят остальные составляющие штучно-калькуляционного времени $T_{ш.к}$.
10. Если предусматриваются дополнительные операции для доведения параметров детали до требований чертежа, необходимо рассчитать их трудоемкость и найти общие затраты времени $T_{общ}$ на выполнение электроэрозионной и последующих операций.
11. Сравнивают общие затраты времени на электроэрозионную и ранее применявшуюся на этой операции обработку. Из исходных данных берут программу выпуска деталей, подбирают серийный станок и проводят предварительное технико-экономическое обоснование целесообразности использования электроэрозионной обработки.
12. При положительных результатах расчета по п.8 разрабатывают маршрутные и операционные карты.
13. Намечают схему базирования, установки и закрепления заготовки, обосновывают целесообразность проектирования специальных приспособлений для установки заготовки и инструмента.
14. Выбирают из числа имеющегося или проектируют и изготавливают необходимый инструмент. При обработке непрофилированным электродом-инструментом выбирают материал, диаметр, скорость перемещения проволоки или стержня, натяжение проволоки и рассчитывают траекторию движения электрода-инструмента.
15. Разрабатывают техническое задание на проектирование специальных приспособлений.
16. После изготовления всей необходимой оснастки и инструмента производят настройку станка и изготовление первой детали.
17. Уточняют режимы обработки в операционных картах, конструкцию приспособлений и инструмента.

1.7 Технологические процессы электроэрозионной обработки типовых поверхностей и деталей

1.7.1 Прошивание отверстий

Эти операции электроэрозионной обработки применяются:

1. для удаления из деталей обломков метчиков, сверл и других инструментов;
2. для прошивания отверстий диаметром $d \geq 1$ мм и глубиной до $12d$;
3. для прошивания отверстий диаметром $d \geq 1$ мм и глубиной более $12d$, которые выполняют с применением направляющих втулок и прокачки рабочей жидкости;
4. для прошивания отверстий малого диаметра ($d < 1$ мм). Тогда применяют кондуктор с прокачкой рабочей жидкости;
5. для прошивания некруглых отверстий, пазов;
6. для прошивания отверстий и пазов с криволинейной осью.

При удалении обломков инструмента необходимо знать габариты и массу детали, так как на основании этого подбирают требуемый станок.

Обычно применяют схему прямого копирования одним электродом-инструментом из меди, латуни, алюминия или его сплавов. Режимы обработки не рассчитываются, а берутся значения, указанные для станков. Рассчитывают площадь сечения электрода при условии, что его диаметр d_1 (рисунок 1.37) был не меньше диаметра окружности, касательной к профилю метчика, сверла или другого инструмента. Длину электрода-инструмента берут как сумму длин участка для его закрепления в электродержателе и рабочей части, равной длине обрабатываемого участка и участка, разрушающегося в результате эрозии.

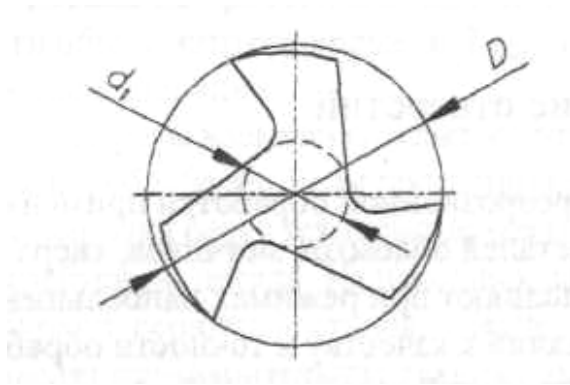


Рисунок 1.37 – Схема для определения диаметра электрода-инструмента при удалении обломка метчика

Когда необходимо удалить обломившуюся часть шпильки или болта из резьбового отверстия, то в ней прошивают квадратное или шестиугольное углубление, причем за счет износа электрода-инструмента оно будет иметь угол уклона боковых стенок в пределах $2-6^\circ$. Затем в полученное углубление вставляют специальный ключ с рабочей частью, обратной форме углубления и вывертывают обломок, восстанавливая деталь.

Прошивание отверстий небольшой глубины используется при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов (твердых, магнитных, жаропрочных сплавов, а также закаленных сталей, термический отпуск которых нецелесообразен).

По чертежу определяют возможность получения отверстия без последующей калибрующей операции. Производят расчеты режимов обработки, исходя из условия получения требуемой шероховатости.

При необходимости последующей операции намечают припуск и проводят расчет режима электроэрозионной обработки, исходя из условия получения наибольшей производительности. Обработку выполняют одним инструментом без его вращения и без прокачки жидкости.

Для получения окончательного размера отверстия, электрод-инструмент 1 подают через кондукторную втулку 2 (рисунок 1.38). Саму втулку выполняют из диэлектрика, а для снижения трения в нее запрессовывают кольца 3. Втулка должна точно базироваться относительно заготовки 4. Для снижения погрешностей по сечениям обрабатываемого отверстия электроду-инструменту сообщают вращательное движение вокруг его оси.

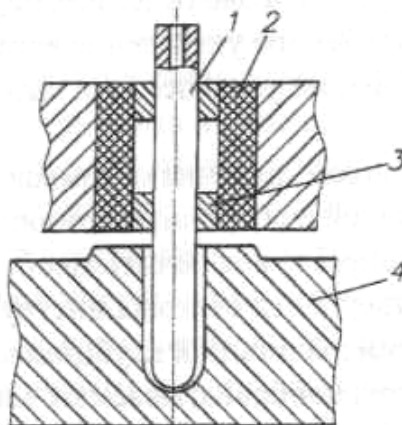


Рисунок 1.38 – Схема окончательной обработки прецизионных отверстий:
1 - электрод-инструмент; 2 – кондукторная втулка из диэлектрического материала; 3 – направляющие кольца;
4 – обрабатываемая заготовка

Для повышения точности размеров обрабатываемого отверстия проводят прокачку или отсос рабочей жидкости из зоны обработки.

При прошивании глубоких цилиндрических отверстий основная задача заключается в поддержании процесса при значительном внедрении электрода-инструмента в заготовку, когда удаление продуктов обработки затруднено. Кроме того, скорость внедрения электрода-инструмента резко снижается из-за его вибрации, что вызывает пропуски разрядов и приводит к нестабильности процесса.

Поэтому вначале по данным чертежа оценивают возможность получения требуемой точности и качества поверхности отверстия. Для этого проводят сравнительные анализы времени обработки при различных вариантах изготовления отверстия с применением электроэрозионной и последующей механической обработки.

При большой глубине отверстия $L/d > 25$ его приходится выполнять за несколько ходов, увеличивая при этом диаметр электрода-инструмента.

Конструкция электрода-инструмента зависит от размера обрабатываемого отверстия, его точности и качества поверхности.

При прошивании отверстий, имеющих $L/d > 20$ применяют электроды-инструменты в виде трубки из меди, латуни, графитовых материалов. Хотя эта конструкция имеет меньшую жесткость, внутри трубки образуется kern, что нарушает стабильность процесса. Зато наличие отверстия позволяет проще прокачивать рабочую жидкость, и сократить время обработки, исключив периодическое выведение инструмента из углубления.

При получении отверстий с $L/d > 40$ необходимо в процессе обработки удалить kern. Для этого используют трубки 1, внутри которых вставлены детали 2 с нарезанным спиральным каналом (рисунок 1.39а), по которому в зону обработки подводится рабочая жидкость. Вращение электрода-инструмента в этом случае не обязательно. Помимо нарезной детали в трубку 1 можно вставлять пластинку 3 (рисунок 1.39б) или квадратный стержень 4 (рисунок 1.39в). При этом в процессе обработки электрод-инструмент вращают.

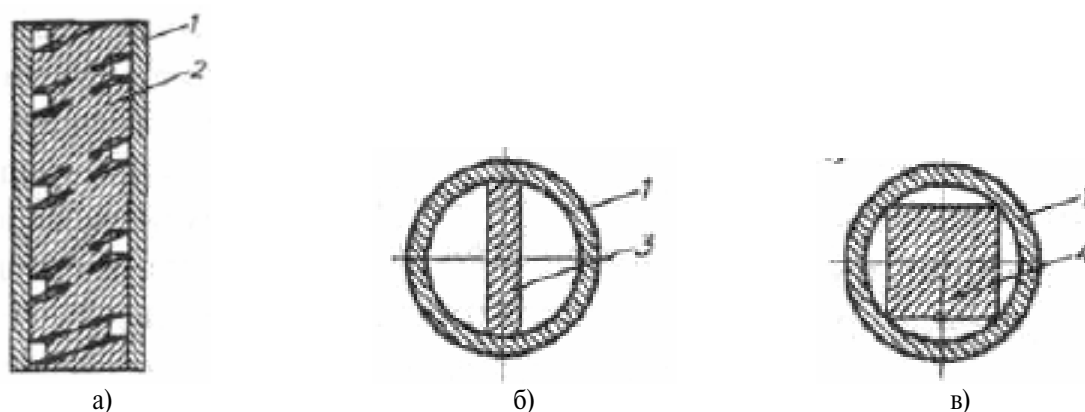


Рисунок 1.39 – Конструкции трубчатых электродов-инструментов при прошивании особо глубоких отверстий: а – с нарезанным спиральным каналом; б – с пластиной; в – со стержнем квадратного сечения; 1 – трубка; 2 – деталь со спиральными канавками; 3 – пластина; 4 – квадратный стержень

Расчет режимов обработки выполняют аналогично предшествующему случаю, но при периодическом выведении электрода-инструмента основное время увеличивают

$$T_o = \frac{L \left(1 + \frac{\tau_y}{\tau_o} \right)}{V_{II}}, \quad (1.18)$$

где τ_y - время, необходимое для выведения электрода-инструмента из отверстия и его возврата в рабочее положение;

τ_o - время между выводами электрода-инструмента;

L - глубина отверстия;

V_{II} - скорость подачи инструмента.

Отверстия диаметром менее 1 мм выполняют в форсунках, распылителях, сетках. При диаметре отверстия $d < 0.6 - 0.7$ мм используют цельные электроды из латунной или вольфрамовой проволоки 1 (рисунок 1.40). Электрод подают в зону обработки через кондукторные втулки 4 из рубина или других твердых диэлектриков. К заготовке 5 проволока перемещается с помощью подающих роликов 3, а система роликов 2 служит для правки электрода-инструмента. Перед обработкой проволоку правят, растягивая ее на специальном приспособлении. В процессе обработки проволоке сообщают вибрацию вдоль оси, что позволяет прошивать отверстия на глубину до $L/d = 10 - 15$.

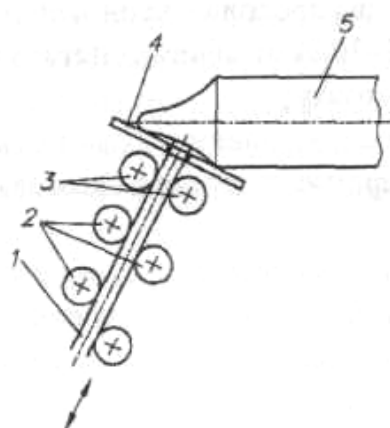


Рисунок 1.40 – Схема обработки отверстий диаметром менее 0,6 мм: 1 – проволочный электрод-инструмент, 2 – система роликов для правки проволоки, 3 – подающие ролики, 4 – кондукторная втулка, 5 – обрабатываемая заготовка

Для обработки отверстий диаметром $d < 0,1$ мм в качестве электрода-инструмента применяют вольфрамовую проволоку, покрытую слоем меди. Такое покрытие повышает жесткость электрода-инструмента и облегчает токоподвод к нему. Перед обработкой слой меди на заходной части электрода-инструмента стравливают на конус. Для этого его помещают в ванну с травящим раствором и вынимают с постоянной скоростью. За счет большего времени пребывания в ванне конца проволоки на нем образуется конус, длина которого не должна превышать 5-6 диаметров.

Обработка отверстий малого диаметра осуществляется по следующей схеме:

- 1) электрод-инструмент устанавливают в электродержателе так, чтобы его заходная часть была направлена в сторону заготовки и контролируют выход проволоки;
- 2) выверяют точность установки электрода-инструмента;
- 3) устанавливают на станок приспособление с кондукторной втулкой;
- 4) выставляют на станке режимы обработки. Энергия импульса в этом случае не должна превышать 12 мкДж. Если толщина заготовки меньше 1 мм, то операцию выполняют за один ход на чистовых режимах. При большей толщине используют два прохода - черновой и чистовой. Износ электрода-инструмента достигает 60-70 % от объема снятого металла;
- 5) устанавливают заготовку;
- 6) включают вибрацию проволоки вдоль ее оси;
- 7) обрабатывают отверстие, получая в заготовке заходной конус (рисунок 1.41а);
- 8) стравливают электрохимическим способом конец электрода до проволоки на длину $h = (2 - 2,5)h_1$, где h_1 - длина не прошитого участка заготовки (рисунок 1.41б);
- 9) прошивают отверстие на полную глубину и калибруют его участком проволоки, не имеющим покрытия.

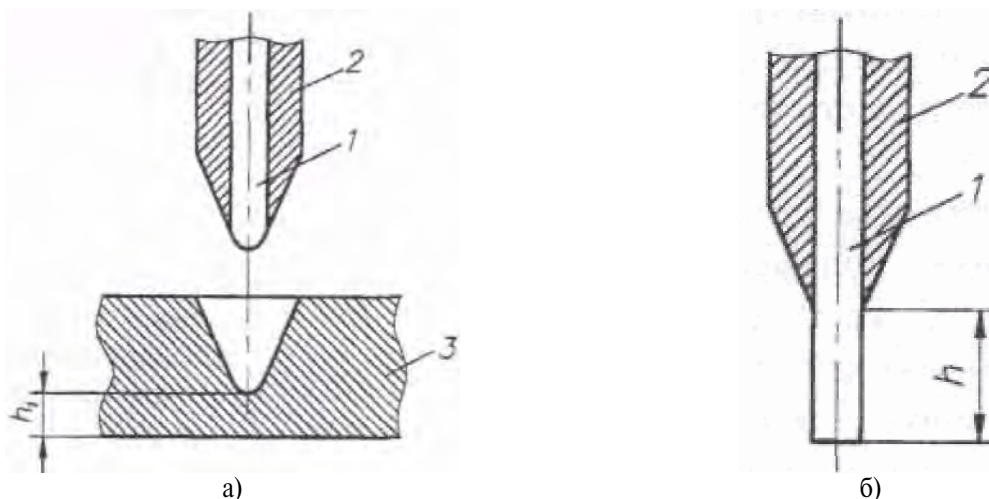


Рисунок 1.41 – Конструкция электрода-инструмента для прошивания отверстия диаметром менее 0,1 мм:
а – для получения заходной фаски; б – для окончательной обработки отверстия; 1 – вольфрамовая проволока;
2 – слой меди; 3 – обрабатываемая заготовка

Участок на входе полученного таким образом отверстия имеет фаску или конус. Высоту и угол раскрытия конуса регулируют изменением угла конуса на электроде-инструменте и глубиной прошивания заходного участка.

Операции прошивания мелких отверстий выполняют на автоматических станках несколькими электродами-инструментами. Шероховатость поверхностей для отверстий диаметром до 0,1 мм соответствует $R_a = 0,16 - 0,32$ мкм, при больших диаметрах - $R_z = 10 - 30$ мкм.

Прошивание некруглых отверстий, пазов

Электрод-инструмент изготавливают прокаткой через профильные ролики. Электроды-инструменты с продольным отверстием для прокатки рабочей жидкости выполняют из медной трубки, которую профилируют по наружной поверхности.

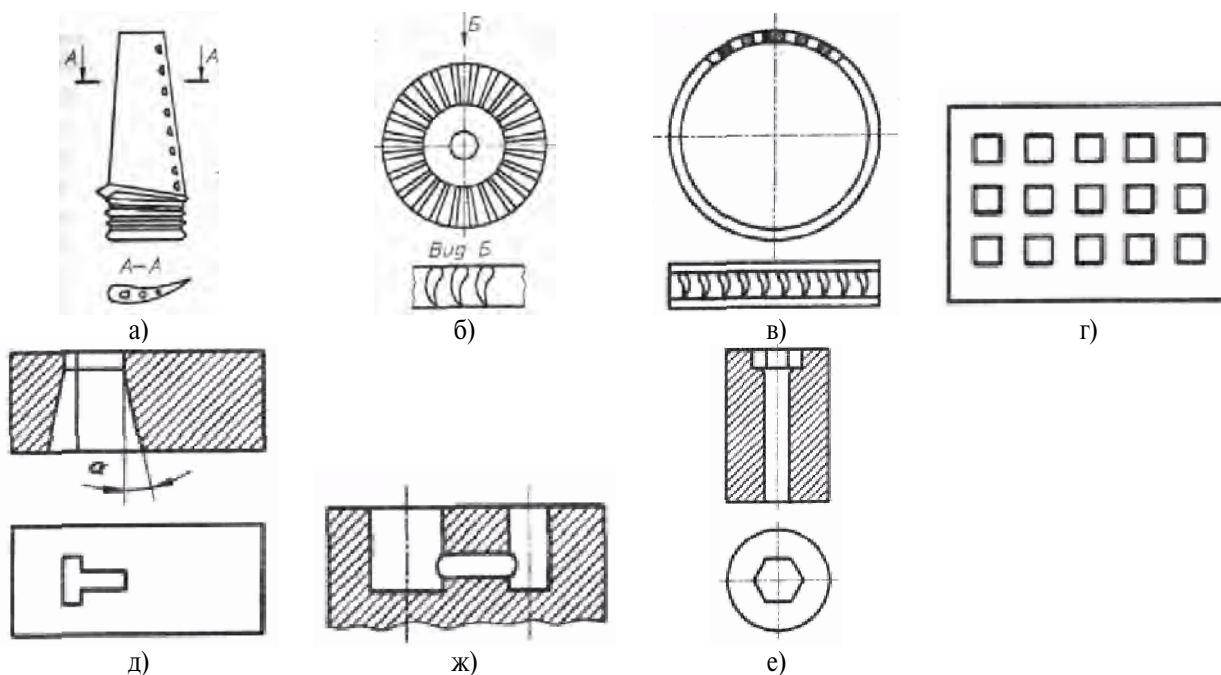


Рисунок 1.42 – Примеры прошивания некруглых отверстий и пазов:

а – для изготовления лопаток турбин авиационный двигателей; б – при изготовлении межлопаточных каналов и пазов в насосах, турбинах, компрессорах; в – при изготовлении концевых деталей; г – при изготовлении сеток; д – при изготовлении рабочих окон в матрицах вырубных штампов; е – при изготовлении матриц высадочных штампов; ж – при изготовлении соединительных каналов в корпусах гидроаппаратуры

Для получения межлопаточных пазов (рисунок 1.42б) используется несколько схем электроэрозионного прошивания:

1. с поступательной подачей электрода-инструмента 1 (рисунок 1.43а) без поворота его вокруг оси;
2. с поворотом электрода-инструмента вокруг оси;
3. с подачей электрода-инструмента по окружности (рисунок 1.43б).

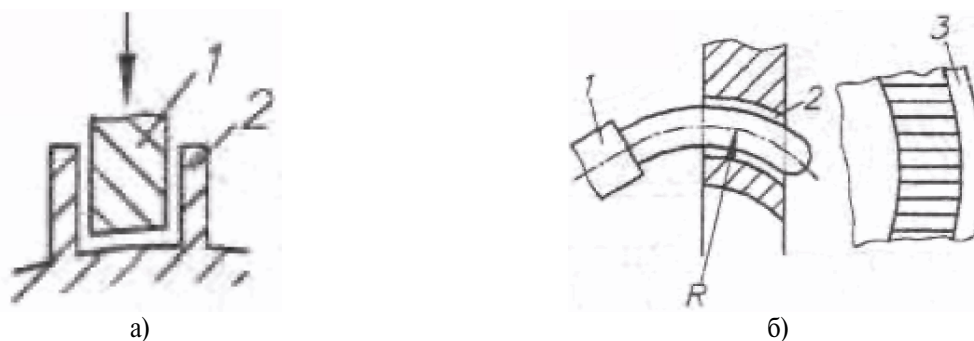


Рисунок 1.43 – Схемы прошивания межлопаточных пазов:

а – с поступательной подачей электрода-инструмента без поворота его вокруг оси; б – с подачей электрода-инструмента по окружности; 1 – электрод-инструмент; 2 – лопатки турбины; 3 – бандажное кольцо

Схема с поворотом электрода-инструмента и его поступательной подачей используется для получения резьбы в отверстиях. В этом случае электрод-инструмент подается вращением через гайку, имеющую профиль нарезаемой резьбы.

Электроэрозионную обработку эффективно использовать для изготовления сеток (рисунок 1.42г), фильтров, решеток, тонкостенных деталей сотовой конструкции. Обработка таких деталей выполняется несколькими электродами-инструментами. Прошивание осуществляется за один ход с калибровкой отверстия неизношенной частью электрода-инструмента. Одновременно прошиваются сотни и тысячи отверстий. Однако чем больше отверстий, тем сложнее условия эвакуации продуктов. Поэтому при прошивании мелких сеток используют вибрацию электродов-инструментов, также принудительную прокачку рабочей жидкости.

При прошивании отверстий глубже 0,5 мм их предварительно вырубает, оставляя припуск под электроэрозионную обработку. Полученные так сетки имеют высокую точность, малую шероховатость поверхности при высокой производительности процесса.

Технологический процесс изготовления матриц включает следующие операции.

Сначала прошивают отверстие с нижней стороны матрицы. Стальные заготовки должны быть предварительно закалены, так как их термическая обработка после прошивания отверстия вызывает коробление металла. Обработку выполняют электродами-инструментами, ранее использованными для калибровки и имеющими поэтому меньшие размеры. Расчет режима выполняют исходя из условия получения поверхности без микротрещин. Прошивание проводят с прокачкой рабочей жидкости, с вибрацией электродов-инструментов. Наибольшее влияние на неравномерность зазоров и на стабильность размеров оказывает скорость прокачки рабочей жидкости и расположение отверстий для ее подачи в зону обработки.

Затем вскрытое отверстие калибруют новым электродом-инструментом с противоположной стороны без применения вибраций. Обработка осуществляется из условия обеспечения требуемой шероховатости.

На заключительной стадии полируют поверхность полученного отверстия до шероховатости верхнего участка $R_a = 0,5 - 1,0$ мкм и нижнего - $R_a = 2,0 - 3,0$ мкм.

При обработке твердосплавных матриц на грубых режимах возможно трещинообразование, поэтому их прошивают с использованием мягких режимов. Окончательную доводку таких матриц не проводят, так как сами вырубленные детали быстро удаляют неровности стенок отверстия, не нарушая точность профиля.

Особенности электроэрозионного прошивания матриц (рисунок 1.42е), применяемых для изготовления винтов, заклепок:

1. при изготовлении стальных матриц до электроэрозионной обработки предусматривают закалку;
2. в стальных заготовках предварительное вскрытие отверстий производят механически;
3. окончательную обработку цилиндрических участков выполняют с вращением электрода-инструмента.

Для прошивания различных соединительных каналов в корпусах гидроаппаратуры (рисунок 1.42ж) необходимо, чтобы размер L_y одного из углублений (рисунок 1.44) и длина L_p рабочей части электрода-инструмента были больше толщины стенки L_c , в которой необходимо получить канал. Общую длину L_{II} электрода-инструмента рассчитывают по зависимости

$$L_{II} = L_{\text{Э}} + L_p, \quad (1.19)$$

где $L_{\text{Э}}$ - размер электродержателя, и его определяют из условия обеспечения необходимой жесткости консольной части электродержателя.

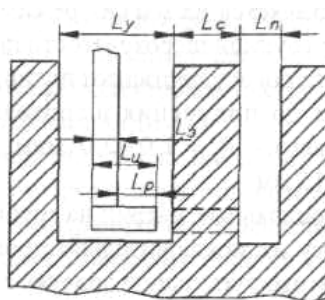


Рисунок 1.44 – Схема для определения размеров электрода-инструмента при прошивании соединительных каналов

Длину L_p рабочей части электрода-инструмента находят по формуле

$$L_p = k \cdot L_c, \quad (1.20)$$

где k - коэффициент, учитывающий длину электрода-инструмента, необходимую для калибровки канала $k = 1,2-2,5$.

1.7.2 Прошивание наружных поверхностей

Для получения наружных поверхностей сложного профиля используют способ обратного копирования. При этом электрод-инструмент 2 (рисунок 1.45) выполняют из отдельных элементов 3, соединенных с помощью штифтов или вкладышей 1. Если обрабатывают пуансон 4, то в качестве электрода-инструмента можно использовать отходы, полученные после вырубki деталей. Они повторяют фактический профиль матрицы и позволяют получить на рабочем пуансоне его точную копию. Толщина электрода-инструмента выбирается в зависимости от размеров обрабатываемого участка и не превышает 60-70 % его длины. При большей толщине усложняются условия удаления продуктов обработки.

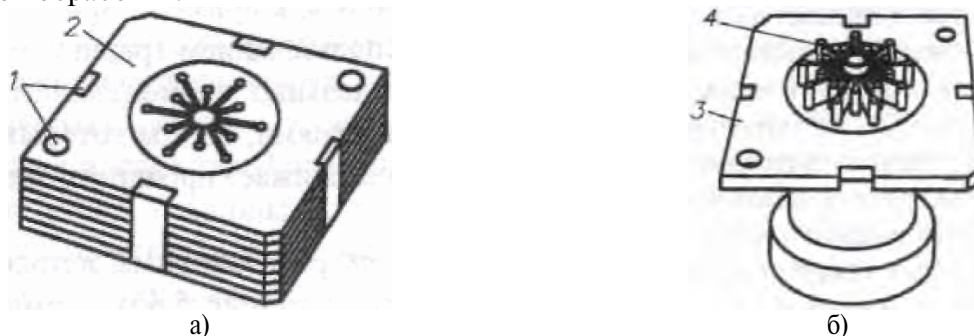


Рисунок 1.45 – Конструкция сборного электрода-инструмента для обработки наружных поверхностей сложного профиля методом обратного копирования:

1 – направляющие штифты или вкладыши; 2 – сборный электрод-инструмент; 3 – отдельный элемент электрода-инструмента; 4 – обрабатываемый пуансон

При расчете режимов энергию импульса принимают в пределах $10^{-4} - 10^{-5}$ Дж. Технологическая операция включает в себя следующие переходы:

1. установку электрода-инструмента и заготовки на станке и закрепление их в требуемом положении;
2. выставление расчетного режима обработки;
3. предварительное прошивание поверхности на расчетную длину;
4. замену изношенных элементов электрода-инструмента на новые. При этом необходимо сохранить установочные базы, а также желательно уменьшить общую толщину блока;

5. установку калибрующего электрода-инструмента на станке;
6. корректировку режимов обработки;
7. чистовую обработку.

1.7.3 Прошивание полостей

Маркирование деталей - процесс нанесения цифр, букв, обозначений и другой информации. Глубина наносимого знака не превышает 1 мм, чаще всего 0,1-0,3 мм.

Особенности электроэрозионного маркирования:

1. операцию выполняют за один ход инструмента;
2. возвратно-поступательное перемещение электрода-инструмента или прокачку рабочей жидкости не применяют;
3. маркирование проводят как до закалки заготовки, так и после нее;
4. операцию нанесения информации выполняют по многоэлектродной схеме сразу для всей надписи.

На рисунке 1.46 показаны электроды 1, 2, 3 из меди и латуни, которые получают протягиванием через фильеры. Они закреплены в кассете 4, что позволяет одновременно наносить всю информацию. При маркировании криволинейных поверхностей электроды-инструменты должны быть обработаны с рабочей стороны по соответствующему радиусу кривизны, что чаще всего осуществляют за счет износа электродов-инструментов при маркировании макетных или пробных деталей.

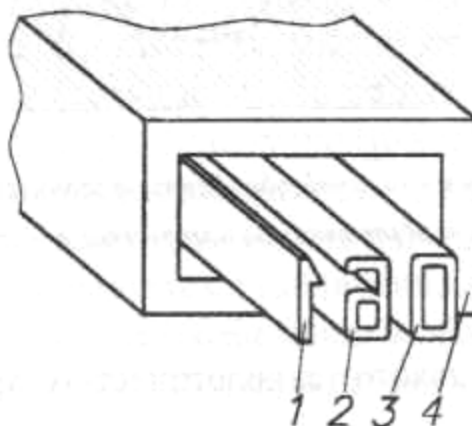


Рисунок 1.46 – Конструкция электрода-инструмента для электроэрозионного маркирования:
1, 2, 3 – электроды для маркирования цифр; 4 – кассета

Для глубокого маркирования используют электроды-инструменты из графитовых материалов, на которых легче получить рисунок, обратный наносимому на заготовку.

Нанесение фасонных углублений на валцы и другие детали осуществляют на серийных станках электродами-инструментами из графитовых материалов. Технология близка к технологии маркирования однако для получения требуемого профиля на всей наружной поверхности заготовке сообщается вращательное движение.

Электроэрозионная обработка осуществляется при поступательном перемещении со скоростью V_H электрода-инструмента к детали (рисунок 1.47). Форма углубления в заготовке 2 с некоторым приближением повторяет наружную (рабочую) поверхность электрода-инструмента 1. Операция выполняется с прокачкой рабочей жидкости через систему отверстий 3 в инструменте.

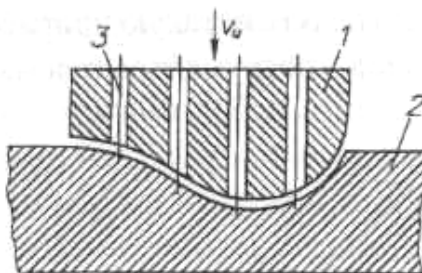


Рисунок 1.47 – Схема электроэрозионной обработки фасонных углублений:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – отверстия для прокачки рабочей жидкости

При проектировании такого технологического процесса учитывают следующее:

- формообразование полости выполняют после закалки заготовки;
- перед закалкой удаляют основную часть припуска механическим методом. Это позволяет выполнять прошивание чистовым электродом-инструментом;
- при обработке крупных штампов и других деталей используют многоконтурные схемы обработки.

В процессе прошивания полостей скорость углубления электрода-инструмента $V_{II} = 0,2 - 1$ мм/мин; шероховатость поверхности на финишных операциях: для сталей - $R_a = 1 - 5$ мкм; для твердых сплавов - $R_a = 0,5 - 3$ мкм.

1.7.4 Электроэрозионное шлифование

Применяют для плоского и круглого шлифования деталей из магнитных сплавов, электротехнических изделий, собранных из тонких пластин. Так как при электроэрозионном удалении металла нет больших нагрузок, то не происходит скалывания твердосплавных и магнитных материалов, а также исключается возможность замыкания пластин. В качестве рабочих сред применяют нефтепродукты. Электроды-инструменты изготавливают из медно-графитовых композиций. Производительность до $15-20$ мм³/с, погрешность профиля 0,02-0,1 мм и шероховатость $R_a = 1 - 5$ мкм. Окружная скорость электрода-инструмента 0,3-0,5 м/с.

Для шлифования мелких отверстий может применяться не профилированный проволочный электрод. Его вводят в предварительно вскрытое отверстие заготовки 2 (рисунок 1.48) и начинают вращать, как показано стрелкой А. Электрод 1 и заготовку 2 подключают к генератору импульсов. Перемещая проволоку перпендикулярно ее оси (по стрелке В), регулируют диаметр обрабатываемого отверстия, а за счет непрерывной перемотки проволоки (по стрелке Б) исключают влияние ее износа на точность отверстия. Так обрабатывают отверстия с точностью в несколько микрометров при шероховатости $R_a = 0,2 - 0,3$ мкм.

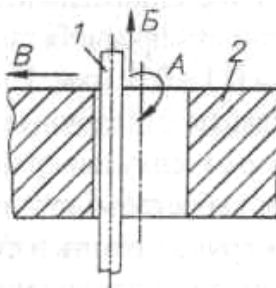


Рисунок 1.48 – Схема электроэрозионного шлифования отверстий малого диаметра проволочным инструментом:
1 – проволочный электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

1.7.5 Электроэрозионное разрезание

Разрезание диском круглых заготовок осуществляют при их вращении. Это позволяет увеличить производительность разрезания прутков диаметром свыше 100 мм в 3-4 раза. Когда вращение заготовки невозможно, ее разрезают до половины, переустанавливают и дальнейшую обработку выполняют с противоположной стороны.

В качестве электрода-инструмента применяются диски из листовой стали толщиной до 1 мм и наружным диаметром до 1000 мм. Чтобы диск не коробился от механических нагрузок, в станке имеются специальные направляющие из керамики или других износостойчивых материалов, что снижает погрешность до 0,2-0,3 мм. Разрезание выполняют при токе 600-800 А.

Расчет режимов выполняют из условия получения наибольшей производительности процесса.

Электроэрозионное разрезание используют для разделения нежестких заготовок, получения узких пазов в вязких или высокопрочных материалах.

1.7.6 Изготовление деталей непрофилированным электродом инструментом

1. Прошивание трубчатым электродом. На рисунке 1.49а показана цилиндрическая заготовка 1, из которой необходимо получить ступенчатую деталь, форма которой показана пунктиром. Обеспечить требуемый профиль можно с помощью пустотелого электрода-инструмента 2. Для снижения конусности обрабатываемой ступени на внутреннюю поверхность электрода-инструмента предварительно наносят диэлектрическое покрытие 3. После электроэрозионного прошивания полученную поверхность шлифуют.

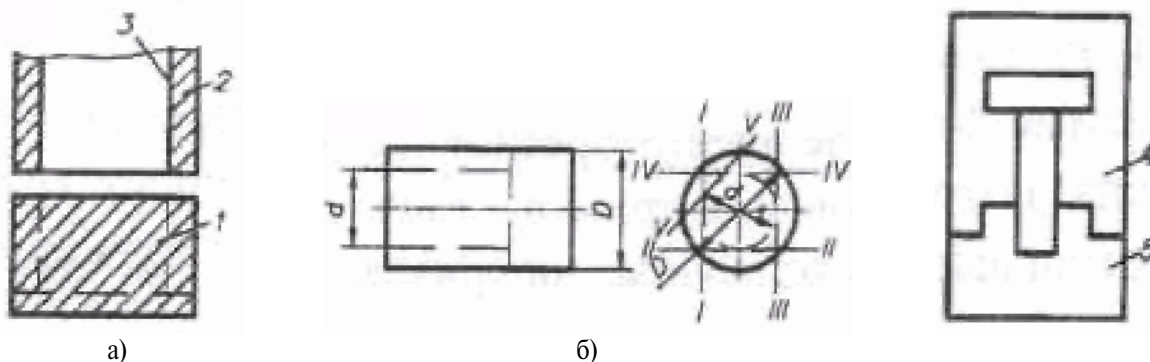


Рисунок 1.49 – Примеры электроэрозионного вырезания твердосплавных заготовок: а – прошивание трубчатым электродом; б – путем последовательного прорезания пазов; в – путем вырезания отдельных элементов составных матриц; 1 – цилиндрическая заготовка; 2 – трубчатый электрод-инструмент; 3 – диэлектрическое покрытие; 4 и 5 – отдельные элементы составной матрицы

2. Разрезание проволочным электродом. На рисунке 1.49б изображена цилиндрическая заготовка диаметром D , с которой необходимо удалить часть материала и получить ступень диаметром d . Для этого на расстоянии $d/2$ от центра прорезают паз I-I, затем заготовку поворачивают и выполняют паз II-II. Последовательно прорезая пазы III-III, IV-IV, V-V и далее, удаляют основной припуск материала, после чего заготовку шлифуют до получения требуемого диаметра d .

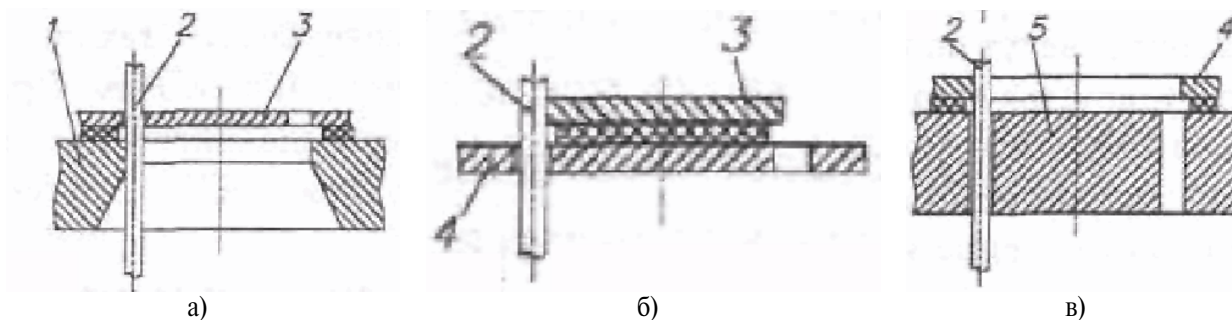


Рисунок 1.50 – Стадии изготовления рабочего копира с использованием контркопира, имеющего форму, обратную рабочему контуру матрицы:

а – вырезание контркопира; б – вырезание рабочего копира; в – вырезание пуансона по рабочему копиру;
1 – матрица; 2 – проволочный электрод; 3 – контркопир; 4 – рабочий копир; 5 – пуансон

Расчет режима электроэрозионной обработки выполняют в последовательности:

- выбирают напряжение холостого хода. При этом для черновых операций $U_0 = 100 - 200$ В, для чистовых $U_0 = 80 - 110$ В и устанавливают среднее напряжение на электродах;
- находят энергию импульса, обеспечивающую получение заданной шероховатости;
- определяют силу тока короткого замыкания и среднюю силу тока;
- находят производительность процесса. При обработке непрофилированным электродом-инструментом производительность оценивают произведением скорости разрезания на толщину заготовки;
- выставляют полученные режимы и осуществляют обработку заготовки.

Перед изготовлением рабочего контура матрицы намечают места прошивания отверстия для ввода проволочного электрода. Их располагают вблизи обрабатываемого контура на той части заготовки, которая идет в отход. Через отверстие пропускают проволоку и включают подачу к копиру (если обработку ведут по копиру). После касания проволокой копира ее перемещение регулируется следящей системой станка.

Затем изготавливают пуансон. При этом необходимо обеспечить равномерный зазор между частями штампа, так как тогда штампы имеют высокую стойкость и не дают заусенцев на вырубленных деталях. Поэтому в качестве задающего элемента используют контур готовой матрицы.

Применение электроэрозионного вырезания непрофилированным электродом-инструментом позволяет получить качественное сопряжение при минимуме слесарных операций.

Варианты получения такого сопряжения.

- Если толщина вырубаемой детали составляет несколько миллиметров, то можно из одной заготовки одновременно получить рабочий контур пуансона и матрицы, зазор между ними будет равен ширине паза при обработке. Однако тогда возникают трудности с прошиванием отверстия для ввода проволоки и сохранением точности сопряжения после доводки профиля.

- Использование обратного копира с профилем обратным рабочему контуру матрицы. Для этого матрицу 1 используют в качестве копира (рисунок 1.50а). По ней непрофилированным проволочным электродом 2 из листовой заготовки вырезают контркопир 3. Разница размеров матрицы и контркопира по периметру постоянна и равна сумме диаметра проволоки и межэлектродного зазора. После этого на том же станке проволокой 2 большего диаметра (рисунок 1.50б) по контркопиру 3 вырезают рабочий копир 4. Далее по нему выполняют пуансон 5 (рисунок 1.50в).

- Нанесение на контркопир 3 (рисунок 1.51) слоя никеля 2, который для равномерности накладывают химическим методом. Затем по копиру 3 проволокой 1 вырезают пуансон 4. Толщину слоя никеля наносят с учетом диаметра проволоки,

использованной при вырезании контркопира, межэлектродного зазора, припуска на доводку пуансона, и зазора между сопрягаемыми поверхностями.

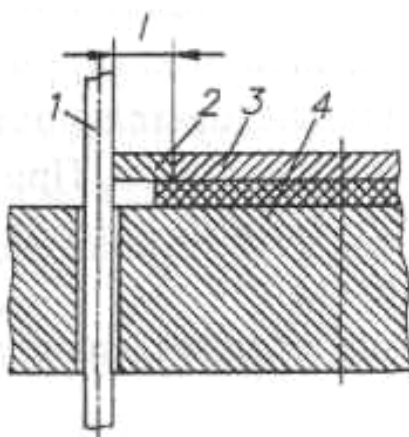


Рисунок 1.51 – Способ вырезания пуансона с нанесением на контркопир слоя никеля:
1 – проволочный электрод; 2 – слой никеля; 3 – контркопир; 4 – пуансон

– По готовой матрице вырубают деталь, используемую в качестве копира. Для этого слесарно-механическим способом из незакаленной стали выполняют технологический пуансон (рисунок 1.52а) с размерами, превышающими размеры матрицы 3. Затем под прессом вдавливают пуансон в матрицу, получая короткий участок 2, повторяющий фактический профиль матрицы. Этой частью пуансона из листового материала 4 (рисунок 1.52б) вырубают деталь, которую используют в качестве копира.

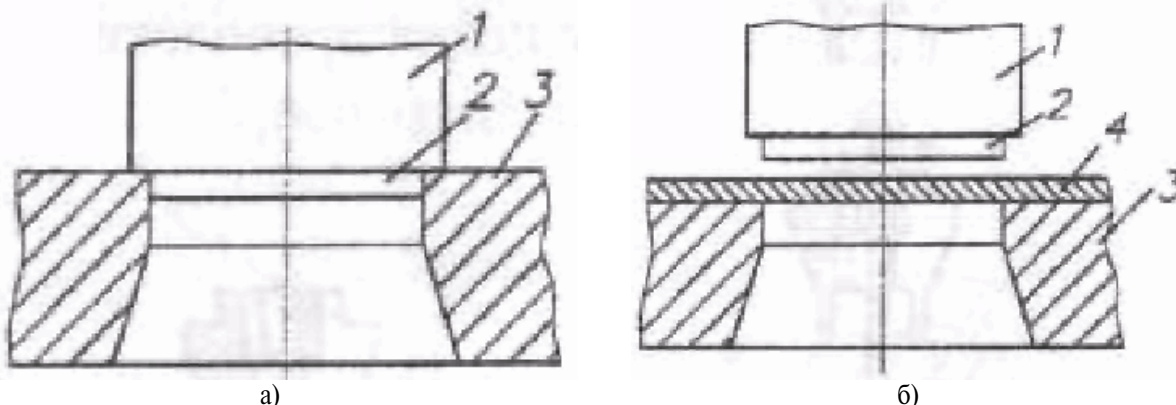


Рисунок 1.52 – Способ получения копира путём его вырубки по готовой матрице:

а – получение рабочего участка на пуансоне; б – вырубка детали, используемой в качестве копира;
1 – технологический пуансон; 2 – участок на технологическом пуансоне; 3 – матрица; 4 – листовый материал для копира

– Сопряжение выполняют по копиру из легкоплавкого сплава, полученного заливкой в матрицу.

1.7.7 Технология изготовления цанг

Расчет режимов обработки ведут с расчетом отсутствия микротрещин.

Обработку цанг с диаметром рабочего отверстия более 1 мм выполняют так:

1) прошивают центральное отверстие 1 (рисунок 1.53а);

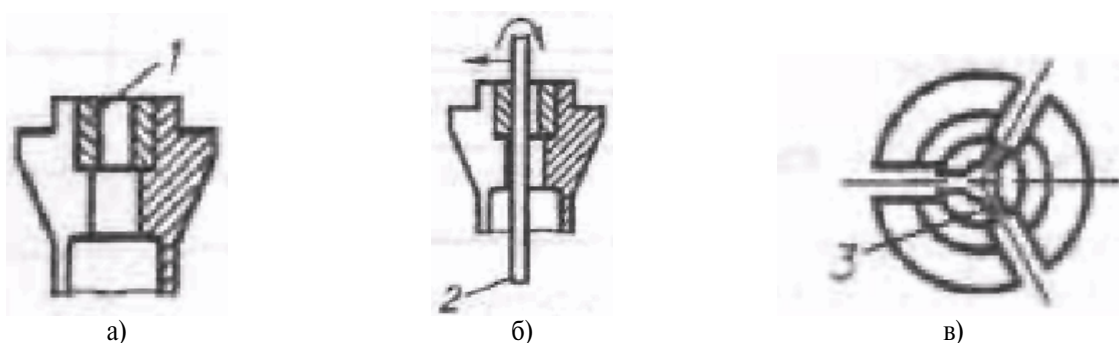


Рисунок 1.53 – Основные стадии изготовления цанг с диаметром рабочего отверстия более 1 мм:
а – прошивание центрального технологического отверстия; б – электроэрозионное шлифование отверстий;
в – прорезание пазов; 1 – центральное отверстие; 2 – проволочный электрод; 3 – радиальные пазы в цанге

2) через полученное отверстие пропускают проволоку 2 (рисунок 1.53б) и перемещают ее в радиальном направлении до касания с образующей отверстия. Затем с помощью специального приспособления цангу вращают, а проволоку подают по радиусу отверстия, выполняя электроэрозионное шлифование до нужного размера;

3) прекращают вращение цанги и включают движение подачи детали вдоль оси паза 3 (рисунок 1.53в). Затем при отключенном напряжении проволоку возвращают в центр отверстия, поворачивают цангу на 120° и прорезают следующий паз. Аналогично получают третий паз.

Так обеспечивается высокая соосность рабочего отверстия и посадочного диаметра, по которому цанга устанавливается на станке, что обеспечивает точность обработки деталей по 6-8 качеству.

Изготовление цанг с диаметром рабочего отверстия менее 1 мм производят так:

1) проволоку 1 вводят через прорезанный в корпусе цанги паз 2 (рисунок 1.54) до касания с твердосплавной вставкой 3;

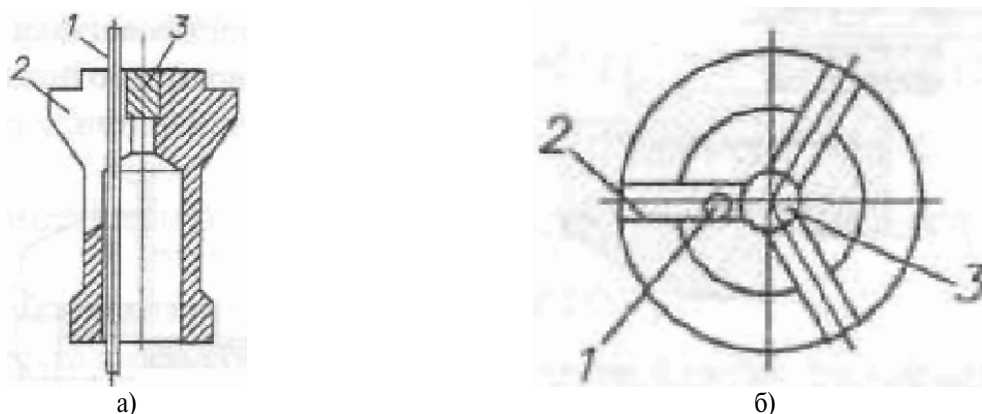


Рисунок 1.54 – Схема изготовления цанг с диаметром рабочего отверстия менее 1 мм:
1 – проволочный электрод-инструмент; 2 – паз в корпусе цанги; 3 – твердосплавная вставка

2) затем проволоке придают поступательное движение в радиальном направлении к центру твердосплавной вставки 3 и выполняют прорезание;

3) когда оси проволоки и вставки 3 совпадут, цангу начинают вращать вокруг оси, одновременно перемещая проволоку 1 от центра вставки 3 до получения отверстия требуемого диаметра;

4) возвращают проволоку 1 в центр вставки 3 и прорезают следующий паз; при выключенном напряжении возвращают проволоку в центральное отверстие, поворачивают цангу на 120° и прорезают третий паз.

С помощью электроэрозионной обработки проволочным электродом получают пазы с винтовым профилем. Для этого необходимо иметь вставку 4 с изготовленным центральным отверстием (рисунок 1.55), которое получают при спекании или

предварительно прошивают электроэрозионным методом. Проволока 3 пропускается через трубку 1 с наружной изоляцией 2. Выходное отверстие трубки имеет плавное скругление, что снижает возможность обрыва проволоки. Наружный диаметр изоляции 2 должен быть меньше, чем отверстие во вставке 4. Проволочным электродом прорезают паз во вставке 4. При этом трубка 1 входит внутрь отверстия вставки. Поступательно перемещая проволоку вдоль оси вставки и одновременно поворачивая цангу вокруг оси, получают паз, прорезанный по винтовой линии.

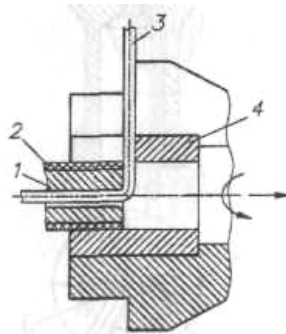


Рисунок 1.55 – Схема электроэрозионной обработки пазов с винтовым профилем с помощью проволочного инструмента:

1 – трубка; 2 – изоляционный слой; 3 – проволочный электрод-инструмент; 4 – вставка с предварительно полученным в ней отверстием

1.7.8 Электроэрозионное упрочнение

Виды упрочнения:

- с одновременным наращиванием значительного слоя металла для восстановления изношенных участков детали;
- с нанесением тонких покрытий из благородных металлов;
- без изменения размеров детали, когда добиваются упрочнения поверхности за счет изменения физико-химических свойств материала поверхностного слоя, а весь нанесенный слой снимают на последующей операции.

Расчет режимов упрочнения выполняют из условия получения требуемой шероховатости поверхности.

Для избегания микротрещин и ухудшения шероховатости ограничивают скорость перемещения электрода-инструмента по упрочняемой поверхности и число ходов по одному участку, которое должно быть не более 5.

2 ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

2.1 Механизм анодного растворения

Удаление металла при размерной электрохимической обработке (ЭХО) происходит под действием электрического тока в среде электролита без контакта между инструментом и заготовкой. В основе ЭХО лежит явление анодного растворения металлов, которое протекает в различных электролитах (водных растворах хлорида натрия, нитрата натрия и др).

Под действием тока в электролите материал анода растворяется и в виде продуктов обработки выносится из МЭП потоком электролита. В результате реакций образуются также и газообразные продукты, которые удаляются в атмосферу. Катод, который служит инструментом, не изнашивается, что является одной из положительных особенностей процесса ЭХО.

При растворении в воде многие соли распадаются на катионы (положительно заряженные ионы) и анионы (отрицательно заряженные ионы). Молекулы воды также поляризуются и располагаются в виде сферы вокруг какого-то центрального положительно или отрицательно заряженного иона (схема на рисунке 2.1).

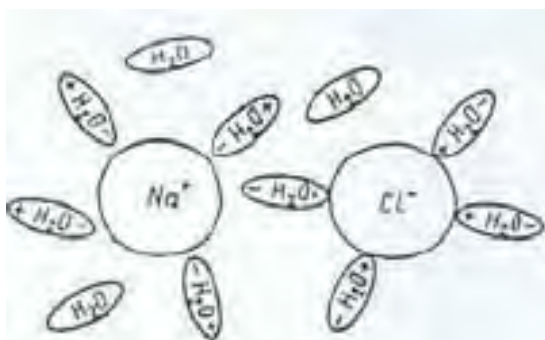


Рисунок 2.1 – Схема поляризации молекул воды при растворении в ней соли NaCl

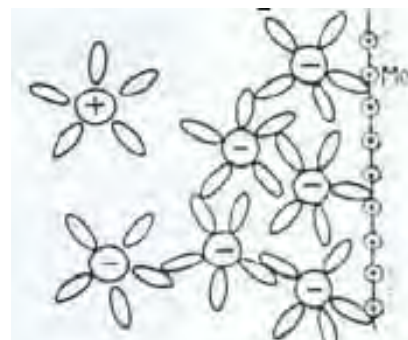


Рисунок 2.2 – Схема образования двойного электрического слоя на границе электролита с металлом

Если электроды погружены в электролит, то на их поверхности протекает обратимая реакция



где n - валентность металла;

Me^{n+} - ион в растворе,

e - электрон.

На поверхности металла возникает положительный заряд и к нему притягиваются отрицательно заряженные ионы из раствора. На границе электролита с металлом образуется так называемый двойной электрический слой (рисунок 2.2), свойства которого подобны свойствам конденсатора. Одна обкладка такого конденсатора (+), представляет собой поверхностные заряды в металле (слой положительно заряженных ионов), другая обкладка (-) - отрицательно заряженные ионы в растворе. За счет этого на межфазной границе возникают скачки электрического потенциала. Протекание ЭХО становится возможным, если приложить внешнее напряжение, превышающее разность $\varphi_a - \varphi_k$, где φ_a - скачок потенциала на аноде, а φ_k - скачок потенциал на катоде. При подключении электродов к источнику напряжения ионы начинают двигаться в электрическом поле через межэлектродный промежуток от электрода к электроду.

В результате реакции **на катоде** выделяется газ (водород), **на аноде** - осадок (гидроксид металла) и газ (кислород). При большой силе тока возможны также и другие реакции, в ходе которых на поверхности анода могут образовываться оксиды. Они снижают скорость растворения металла с заготовки и ухудшают ее обрабатываемость.

2.2 Съем металла при размерной электрохимической обработке

Если на электроде протекает только электрохимический процесс, например растворение металла, то он описывается законами Фарадея.

Согласно первому закону Фарадея, масса металла m , растворенного с анода, определяется

$$m = \varepsilon Q, \quad (2.1)$$

где Q - количество электричества, пропущенное через электролит;
 ε - коэффициент пропорциональности.

При постоянном токе

$$Q = I\tau, \quad (2.2)$$

где I - сила тока; τ - время его прохождения.

Тогда зависимость (2.1) примет вид

$$m = \varepsilon I\tau. \quad (2.3)$$

Коэффициент ε называется электрохимическим эквивалентом и определяется

$$\varepsilon = \frac{A \cdot n}{F}, \quad (2.4)$$

где A - атомная масса;
 n - валентность,
 $F = 96500$ Кл - число Фарадея.

Численные значения ε для различных элементов приводятся в справочных материалах. Электрохимический эквивалент ε_c любого сплава можно найти через эквиваленты входящих в него элементов и через массовое содержание в процентах k_i элемента в сплаве

$$\varepsilon_c = 100 \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i}{k_i}. \quad (2.5)$$

Каждый компонент сплава имеет свой электрохимический эквивалент, т. е. свою скорость анодного растворения. За счет этого в процессе обработки возникают углубления и выступы, формирующие макроскопический профиль и шероховатость поверхности.

Для практических целей необходимо знать скорость линейного растворения материала заготовки для определения скорости подачи электрода-инструмента. Если массу растворенного материала представить через площадь обрабатываемого участка F и перемещение l электрода-инструмента к заготовке, то можно записать

$$m = Fk\rho, \quad (2.6)$$

где ρ - плотность обрабатываемого материала.

Силу тока можно выразить через площадь участка F и плотность тока i

$$I = Fi. \quad (2.7)$$

С учетом (2.6) и (2.7) формула (2.3) примет вид

$$Fl\rho = \varepsilon Fi \tau. \quad (2.8)$$

Если левую и правую части последнего выражения разделить на время τ то отношение $l / \tau = V$ будет представлять скорость линейного растворения материала анода и определяться

$$V = \frac{i\varepsilon}{\rho}. \quad (2.9)$$

Плотность тока по закону Ома может быть выражена через напряжение U , удельную проводимость ψ и величину зазора S между электродами

$$i = \frac{U\psi}{S}. \quad (2.10)$$

С учетом (2.9) и (2.10) закон анодного растворения можно записать в виде

$$V = \frac{\varepsilon U\psi}{\rho S}. \quad (2.11)$$

Если зазор S между электродами не изменяется в процессе анодного растворения, то режим ЭХО **стационарный**, при переменном зазоре - **нестационарный**.

Если измерить массу металла, растворенного с анода, то она окажется меньше, чем по формулам. Так как часть количества электричества тратится на побочные реакции на электродах: образование газов, вторичные реакции, то эти потери учитываются коэффициентом, который называют **выходом по току** η . Он представляет отношение действительно и теоретически растворенного вещества и характеризует долю полезного использования тока. Тогда **закон анодного растворения (2.11)** может быть записан в виде

$$V = \frac{\varepsilon\eta U\psi}{\rho S}. \quad (2.12)$$

Для различных электролитов и разных материалов $\eta = 0,6 - 0,95$.

Для нормального протекания электрохимических реакций необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка, поэтому электролит должен протекать со скоростью, достаточной для захвата и удаления твердых и газообразных частиц, образующихся в ходе реакций. При расчете скорости учитывают вязкость, состав, стабильность характеристик электролита.

Электролит может иметь ламинарный или турбулентный характер течения. При ламинарном потоке жидкость не перемешивается и вынос продуктов обработки из

межэлектродного промежутка происходит медленнее, чем при турбулентном течении. Однако расчет закономерностей, описывающих ламинарный поток, значительно проще.

Если скорость потока электролита мала, то часть продуктов обработки не успеет покинуть межэлектродный промежуток и будет в нем накапливаться вблизи рабочей поверхности анода и катода, и сила тока, проходящего через электролит, начнет уменьшаться даже при увеличении разности потенциалов между электродом-инструментом и заготовкой.

2.3 Пассивация поверхности металла

На рисунке 2.3 схематически показана зависимость силы тока от напряжения при постоянной площади обрабатываемой поверхности. На участке АБ с возрастанием напряжения ток увеличивается. Это **активная область**. Участок АБ характеризует анодное растворение элементов сплава заготовки с низкой валентностью. Сила тока здесь незначительна, и высокой скорости обработки заготовки достичь не удастся. Поэтому в ЭХО эту область практически не используют. На участке БВ возрастание напряжения вызывает снижение силы тока. Наступает **пассивация** обрабатываемой поверхности, т. е. образование на ней оксидной пленки, обладающей большим сопротивлением. При дальнейшем увеличении напряжения сила тока сначала остается неизменной (участок ВГ), а затем вновь начинает расти (участок ГД). Этот участок называют **областью перепассивации**.

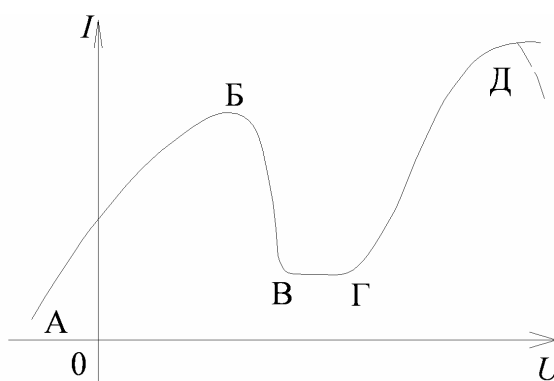


Рисунок 2.3 – Характер изменения силы тока от напряжения при постоянной площади обрабатываемой поверхности

Рост силы тока вызван химическими превращениями в пленке и ее разрушением при повышенных напряжениях. Здесь можно получить большую силу тока, и большую скорость растворения заготовки. Этот участок и используют для ЭХО. После точки Д может начаться новый спад силы тока, т. е. снова возникает пассивация. При дальнейшем увеличении напряжения возможны электрические пробой межэлектродного промежутка.

При обработке **нержавеющих сталей** пассивация проявляется слабо. Для **титановых, вольфрамкобальтовых** и других сплавов наблюдается значительная пассивация. Для ее устранения применяют колебания электродов с **ультразвуковой частотой**, что снижает прочность пленки.

2.4 Подбор электролита для ЭХО

От состава электролита зависят его электропроводность и скорость растворения металла.

Электролиты подбирают в зависимости от обрабатываемого материала по следующим требованиям:

Первое: содержащиеся в водном растворе электролита анионы и катионы должны хорошо диссоциировать при любых комбинациях.

Второе: потенциал материала электрода-инструмента должен быть более положительным, чем потенциал осаждения катионов. Это препятствует осаждению металлических катионов на электрод-инструмент.

Третье: наличие в электролите активирующих анионов, разрушающих под действием тока поверхностные оксидные пленки на аноде и его растворение.

Четвертое: для равномерного растворения всей поверхности заготовки необходимо соответствие концентрации анионов, имеющих близкое сродство к тому или иному компоненту обрабатываемого сплава, содержанию этого компонента в сплаве.

Пятое: обеспечение в ходе реакций в электролите перехода продуктов реакции анодного растворения в нерастворимое состояние для удаления продуктов обработки из раствора.

Электролит также должен обладать невысокой вязкостью. Это облегчает прокачку и ускоряет процессы тепло- и массопереноса в МЭП. Электролит должен обладать невысокой коррозионной активностью к оборудованию, быть безвредным для здоровья, пожаро- и взрывобезопасным.

В качестве электролитов используют нейтральные растворы неорганических солей: хлориды, нитраты и сульфаты натрия и калия.

В растворы могут вводиться добавки для придания дополнительных свойств.

2.5 Гидродинамические процессы в межэлектродном промежутке

Количество продуктов обработки в прианодной и прикатодной областях будет зависеть от скорости анодного растворения и скорости выноса частиц потоком жидкости. Если электролит протекает со скоростью менее 1-2 м/с, то он не успевает вынести из промежутка все продукты обработки и скорость анодного растворения через некоторое время снижается. Поэтому необходимо иметь скорость потока, достаточную для выноса из промежутка всех продуктов обработки, т. е. требуется обеспечить условие

$$\frac{dm_1}{d\tau} \geq \frac{dm_2}{d\tau}, \quad (2.13)$$

где $\frac{dm_1}{d\tau}$ и $\frac{dm_2}{d\tau}$ - соответственно скорость выноса продуктов обработки из промежутка и скорость образования продуктов обработки в результате анодного растворения. Превышение скорости выноса частиц над скоростью их образования должно быть незначительным, иначе неоправданно увеличится мощность насосов для перекачки электролита. С увеличением скорости протекания электролита выше критической, скорость съема металла с заготовки растет до тех пор, пока не будет достигнуто состояние, соответствующее равенству левой и правой частей и выражению (2.13), далее съем стабилизируется или снижается из-за кавитационных явлений, вызывающих местное прекращение процесса анодного растворения. Для каждого режима обработки должна быть своя скорость потока, при которой выполняется равенство левой и правой частей в выражении (2.13), что соответствует максимальной производительности. Диапазон скоростей составляет от 5 до 40 м/с.

2.6 Напряжение

В паузах между импульсами анодного растворения металла не происходит, а электролит протекает. За счет этого межэлектродный промежуток освобождается от

продуктов обработки, выравнивается температура электролита. Это способствует поддержанию расчетного режима ЭХО, повышаются технологические показатели процесса. Чем больше скважность импульсов, тем меньше изменяются условия протекания процесса, но снижается скорость съема металла и усложняются источники питания (для компенсации снижения производительности приходится работать на токе большей силы).

При ЭХО с импульсным напряжением следует учитывать изменение следующих показателей по сравнению с обработкой постоянным напряжением:

- уменьшение зазоров за счет лучшего удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка;
- снижение потерь напряжения в приэлектродных слоях за счет меньшего газонаполнения межэлектродного промежутка в период протекания тока;
- уменьшение пассивации при анодном растворении и увеличение выхода по току за счет лучшего удаления продуктов обработки;
- рост плотности тока в момент подачи импульса, что повышает качество поверхности.

2.7 Технологические схемы электрохимической размерной обработки

2.7.1 Обработка с неподвижными электродами

По этой схеме (рисунок 2.4) получают местные облечения в деталях, отверстия в листовых материалах, осуществляют маркирование, удаляют заусенцы и скругляют острые кромки.

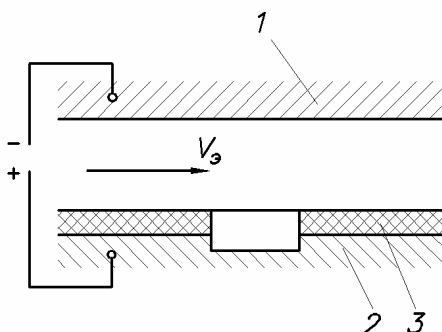


Рисунок 2.4 – Схема обработки с неподвижными электродами:
1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – слой диэлектрика

Требуемая форма углубления или отверстия получается за счет нанесения на электроды слоя диэлектрика 3. При этой схеме электрод-инструмент 1 не перемещается к обрабатываемой поверхности. В результате по мере снятия металла с поверхности заготовки 2 величина МЭП возрастает, а скорость $V_э$ прокатки электролита снижается. Процесс является нестационарным. Это усложняет расчеты технологических параметров, а так же регулирование и управление процессом.

2.7.2 Прошивание полостей, углублений, отверстий

При такой схеме ЭХО (рисунок 2.5а) электрод-инструмент 1 имеет одно рабочее движение - поступательное перемещение со скоростью $V_у$ к заготовке 2. За счет системы регулирования зазора в процессе обработки поддерживается постоянная величина межэлектродного зазора S , т.е. имеет место стационарный режим анодного растворения. Через межэлектродный промежуток прокачивают электролит со скоростью $V_э$.

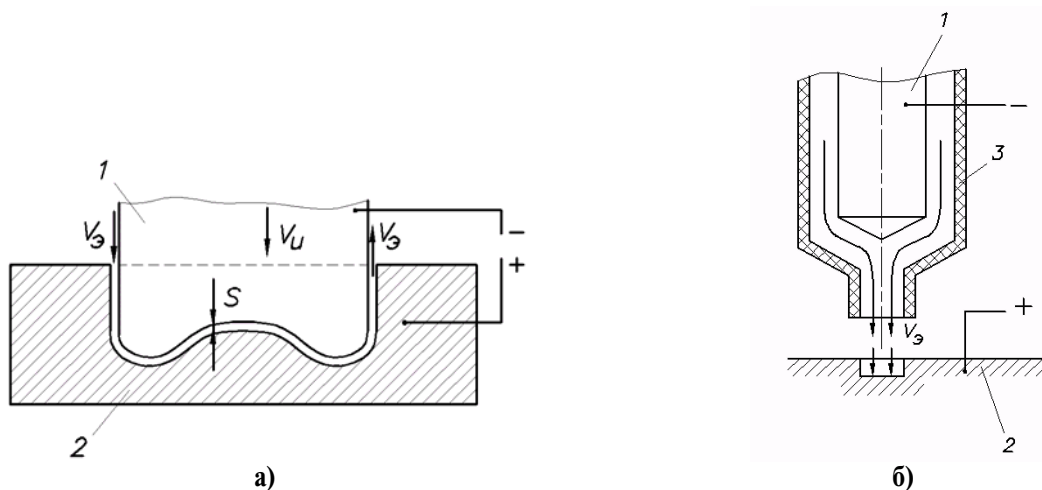


Рисунок 2.5 – Прошивание полостей, углублений, отверстий:

а – схема прошивания полостей углублений, отверстий; 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; б – схема струйного метода обработки отверстий; 1 – токоподвод; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – корпус из электроизоляционного материала

Такую схему ЭХО применяют для изготовления рабочих полостей ковочных штампов, пресс-форм; для прошивания отверстий, пазов; для вырезания заготовок различного профиля.

Разновидностью такой схемы является струйный метод ЭХО (рисунок 2.5б). Электрод-инструмент состоит из токоподвода 1, омываемого потоком электролита со скоростью V_3 . Токоподвод помещен внутри корпуса 3 из изоляционного материала. Струя электролита образует токопроводящий канал между токоподводом 1 и заготовкой 2. В зоне контакта жидкости с обрабатываемой поверхностью материал заготовки растворяется и в ней образуется углубление. По мере увеличения его глубины корпус 3 электрода-инструмента сближают с заготовкой 2. Процесс обработки протекает быстро только при высоких напряжениях. С помощью струйного метода получают отверстия диаметром 1,5 - 2 мм, а также вырезают контуры деталей сложной формы.

2.7.3 Точение наружных и внутренних поверхностей

В этом случае электрод-инструмент 1 (рисунок 2.6) выполняет роль резца, но в отличие от обработки на токарных станках он не имеет механического контакта с заготовкой 2, а располагается от ее поверхности на расстоянии S межэлектродного зазора. В процессе обработки электрод-инструмент может двигаться со скоростью V_U поперек оси вращения заготовки (рисунок 2.6а), так и вдоль нее со скоростью V (рисунок 2.6б). Межэлектродный зазор S поддерживается с помощью диэлектрических прокладок 3.

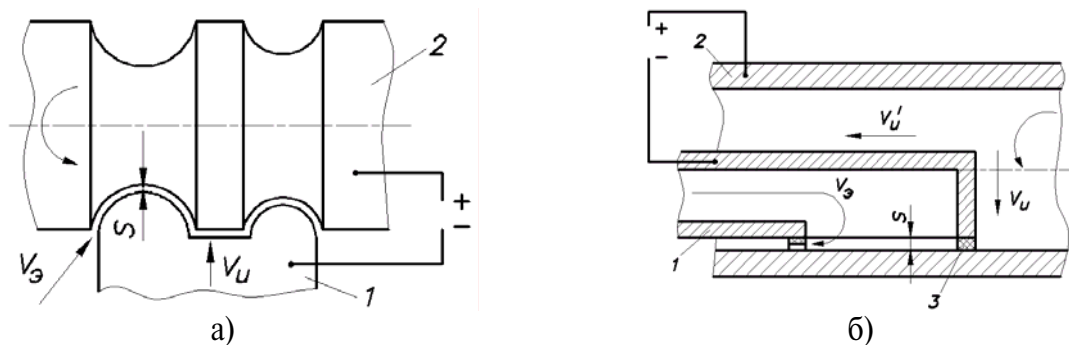


Рисунок 2.6 – Схема точения:

а – наружных поверхностей; б – внутренних поверхностей; 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – диэлектрическая прокладка

2.7.4 Протягивание наружных и внутренних поверхностей

Такая схема (рисунок 2.7) применяется на заготовках, имеющих предварительно обработанные поверхности, по которым можно базировать электрод-инструмент 1. Его устанавливают относительно обрабатываемой поверхности заготовки 2 с помощью диэлектрических прокладок 3. Электрохимическое протягивание выполняют при продольном перемещении (иногда с вращением) электрода-инструмента со скоростью V_u . Такую схему ЭХО применяют для чистовой обработки цилиндрических отверстий, для нарезания резьбы, шлицев и винтовых канавок.

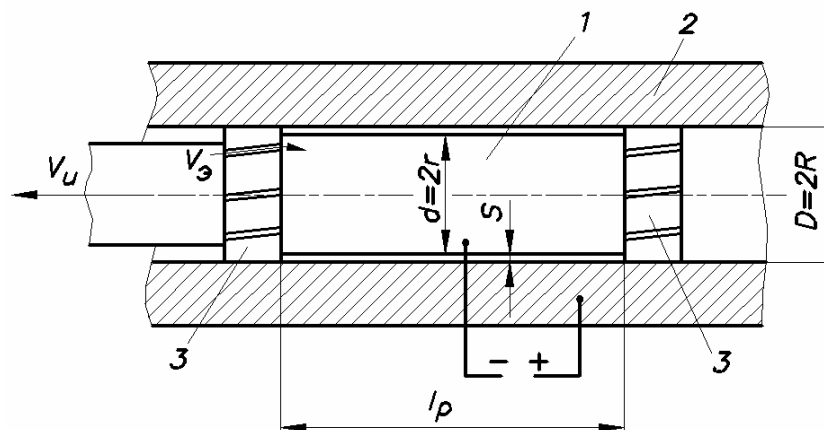


Рисунок 2.7 – Схема протягивания внутренних поверхностей:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – диэлектрические прокладки

2.7.5 Разрезание заготовок

Вращающийся диск 1 (рисунок 2.8а) или проволоку 1 (рисунок 2.8б) подают к заготовке 2 со скоростью V_u , сохраняя при этом постоянным зазор S . Кроме разрезания заготовок по такой схеме выполняют пазы, щели, подрезку торцов нежестких деталей.

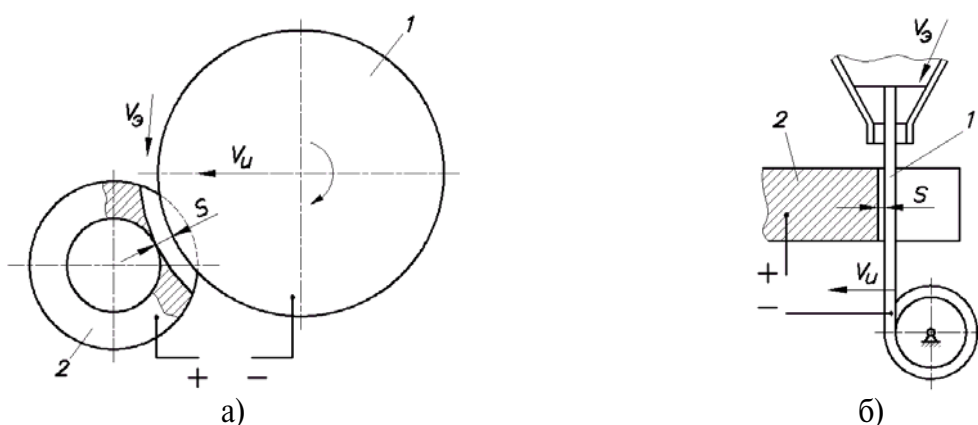


Рисунок 2.8 – Схема разрезания заготовок:
а – диском; б – проволокой; 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

2.7.6 Шлифование

В этом случае (рисунок 2.9) используется вращающийся металлический электрод-инструмент 1 цилиндрической формы, который поступательно движется вдоль заготовки 2 со скоростью V_u . Электрохимическое шлифование применяют как окончательную операцию при изготовлении пакетов пластин из магнитомягких материалов, когда при обработке недопустимы механические воздействия, а также для финишной обработки деталей из вязких и прочных сплавов.

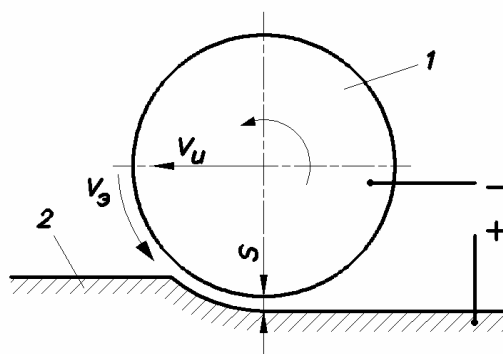


Рисунок 2.9 – Схема шлифования:
1 – вращающийся электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

2.8 Формообразование при размерной электрохимической обработке

2.8.1 Копирование электрода-инструмента на заготовке

Точность копирования электрода-инструмента на заготовке будет зависеть от скорости растворения ее участков, отстоящих на различных расстояниях от электрода-инструмента. Рассмотрим получение углубления (рисунок 2.10) в плоской заготовке 2 электродом-инструментом 1, на котором выполнен выступ ab . В начале обработки поверхность заготовки под электродом-инструментом занимала положение I-I. На расстоянии S_1 от нее находится выступ ab электрода-инструмента, который перемещается к заготовке со скоростью V_u , обеспечивающей постоянство зазора S_1 . Электролит прокачивается через МЭП со скоростью $V_з$.

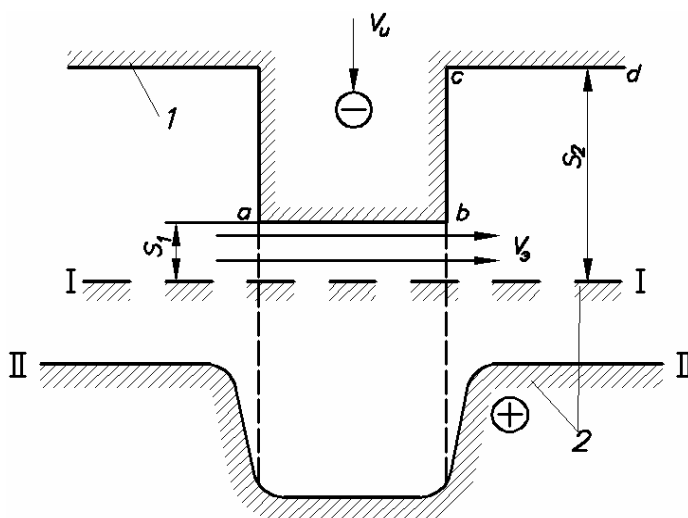


Рисунок 2.10 – Схема получения углубления:
1 – электрод-инструмент; 2 – плоская заготовка

Примем, что выход по току, удельная проводимость электролита и напряжение остаются неизменными по всей длине межэлектродного промежутка. Тогда скорости анодного растворения материала под участками ab и cd согласно (2.12) будут равны

$$V_{ab} = \frac{\varepsilon\eta\psi U}{\rho \cdot S_1}; V_{cd} = \frac{\varepsilon\eta\psi U}{\rho \cdot S_2}. \quad (2.14)$$

Обозначив через $K = \frac{\varepsilon\eta\psi U}{\rho}$, тогда выражения (2.14) примут вид

$$V_{ab} = \frac{K}{S_1}; V_{cd} = \frac{K}{S_2}. \quad (2.15)$$

Т.е. скорость анодного растворения на участках ab и cd зависит только от размеров межэлектродных зазоров между начальной границей заготовки и соответствующей поверхностью электрода-инструмента. Так как в начальный момент обработки $S_1 \ll S_2$, то скорость анодного растворения на участке ab будет больше, чем на участке cd

$$\frac{V_{ab}}{V_{cd}} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (2.16)$$

По мере растворения материала заготовки и перемещения электрода-инструмента величина зазора S_2 уменьшается, но тем не менее $S_2 > S_1$, т.е. съём металла под выступом происходит быстрее. Через некоторое время в плоской заготовке будет получено углубление с границей контура по линии II-II и форма электрода-инструмента с некоторой погрешностью отобразится на заготовке.

2.8.2 Межэлектродный зазор

Из уравнения (2.16) скорость анодного растворения, а также точность обработки будет тем выше, чем меньше величина МЭП. Однако с уменьшением зазора усложняется процесс его регулирования, возрастает сопротивление прокачке электролита, повышается вероятность пробоя МЭП. Кроме того, из-за повышенного газонаполнения электролита при малых зазорах снижается скорость анодного растворения.

Поэтому при ЭХО отверстий и небольших полостей, а также при разрезании заготовок поддерживают зазор $S = 0,1 - 0,3$ мм. При обработке крупных плоскостей, для схем точения и протягивания $S = 0,3 - 0,5$ мм. Для струйного метода обработки $S = 1 - 15$ мм. При ЭХО по схеме с неподвижными электродами $S = 0,1 - 0,3$ мм.

При ЭХО применяют три способа регулирования межэлектродного зазора.

1) При ЭХО с неподвижными электродами зазор постоянно возрастает, а скорость анодного растворения снижается, т.е. процесс ЭХО является нестационарным.

В начале процесса анодного растворения электрод-инструмент 1 (рисунок 2.11) находится на расстоянии S_0 относительно заготовки 2. Через некоторое время фграница обрабатываемой поверхности заготовки I-I переместится в положение II-II, а зазор увеличится на толщину растворенного слоя. Ось X направим по потоку электролита, а ось Y — перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Скорость анодного растворения металла равна $dy / dt_{\text{фи}}$ при $\eta z = \text{Const}$ получим

$$\frac{dy}{d\tau} = \frac{\eta\varepsilon\psi U}{\rho y}. \quad (2.17)$$

Проинтегрируем

$$\tau = \int_{S_0}^{S_k} \frac{y\rho}{\eta\varepsilon\psi U} dy = \frac{(S_k^2 - S_0^2)\rho}{2\eta\varepsilon\psi U}, \quad (2.18)$$

где S_k - межэлектродный зазор в конце обработки.

$$S_k = \sqrt{\frac{2\eta\varepsilon\psi U}{\rho} + S_0^2}. \quad (2.19)$$

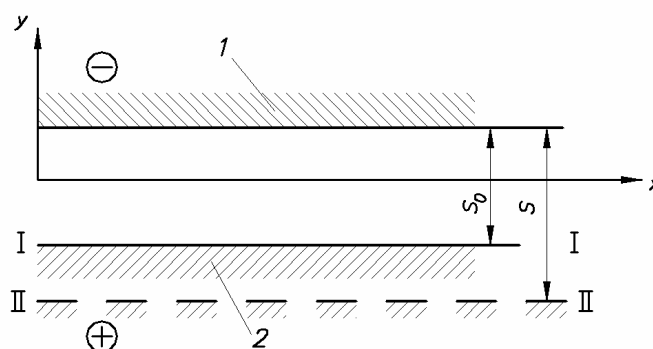


Рисунок 2.11 – Схема изменения межэлектродного зазора при обработке с неподвижными электродами:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

2) ЭХО с постоянной скоростью подачи электрода-инструмента. Если выбранная скорость подачи электрода-инструмента меньше, чем скорость растворения металла, то зазор постепенно увеличивается, что приводит к снижению скорости удаления металла. Через некоторое время скорость подачи электрода-инструмента и скорость растворения материала заготовки выравнивается, и режим становится стационарным. С превышением скорости подачи электрода-инструмента над скоростью растворения металла также происходит саморегулирование зазора. Значение установившегося зазора S_y определяется как

$$S_y = \frac{\eta\varepsilon\psi U}{\rho V_{и}}. \quad (2.20)$$

3) При периодическом перемещении электрода-инструмента относительно заготовки. Через определенные промежутки времени отключают рабочий ток, подводят электрод-инструмент до контакта с поверхностью заготовки, затем отводят его на расчетное расстояние и снова включают рабочий ток. Между циклами подвода и отвода электрода-инструмента его оставляют неподвижным относительно заготовки, либо перемещают к ней или от нее со скоростью рабочей подачи. Время между циклами измеряется секундами. Поэтому изменение зазора во времени происходит незначительно, а режим рассматривают как стационарный.

2.8.3 Припуск на обработку

На рисунке 2.12 показано, что припуск на заготовке 2 изменяется в пределах допуска (Z_1-Z_2). При этом величина зазора изменяется от S_1 до S_2 . В области меньшего зазора скорость съема металла будет выше. При достаточном времени обработки можно получить деталь с контуром по линии II-II, который повторяет профиль электрода-инструмента 1. Чем ближе будет контур I-I исходной заготовки к требуемому контуру детали II-II, тем меньше необходим минимальный припуск Z_{\min} .

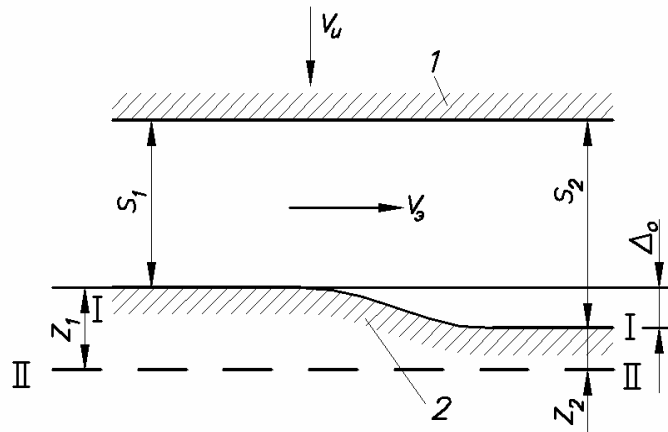


Рисунок 2.12 – Схема к определению припуска:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

Минимальный припуск при ЭХО рассчитывают в зависимости от допуска на деталь ($IT_{\text{дет}}$) и глубины анодного растворения металла

$$Z_{\min} = y_1 + IT_{\text{дет}}, \quad (2.21)$$

где y_1 - съём металла на участке с минимальным зазором.

На рисунке 2.12 $Z_{\min} = Z_1$, а минимальный зазор S_1 .

При неподвижных плоских электродах съём металла можно представить как разность между межэлектродными зазорами в конце и в начале обработки заготовки

$$y_1 = S_k - S_0. \quad (2.22)$$

Подставляя в (2.22) выражение S_k из формулы (2.19), можно записать

$$y_1^2 + 2S_0 y_1 - \frac{2\eta\epsilon\psi U}{\rho} = 0, \quad (2.23)$$

откуда имеем

$$y_1 = -S_0 + \sqrt{S_0^2 + \frac{2\eta\epsilon\psi U}{\rho}}. \quad (2.24)$$

Найдя значение y_1 , определяют Z_{\min} и корректируют чертеж детали с учетом обеспечения минимального припуска. При обработке с неподвижными электродами и протягивании $Z_{\min} = 0,1 - 0,3$ мм. При обработке по схемам точения и шлифования с постоянной подачей $Z_{\min} = 0,1-0,5$ мм.

2.8.4 Производительность электрохимической обработки

Оценивается по скорости подачи электрода-инструмента. При обработке с неподвижными электродами по средней скорости растворения металла

$$V_{\text{cp}} = \frac{Z}{\tau}, \quad (2.25)$$

где Z - припуск на обработку; τ - время протекания процесса.

Для схем прошивания, разрезания, точения и врезного шлифования производительность оценивается скоростью подачи инструмента из уравнения (2.20)

$$V_{\text{и}} = \frac{\eta \varepsilon \psi U}{\rho S}. \quad (2.26)$$

В зависимости от обрабатываемой поверхности скорость подачи $V_{\text{и}} = 0,005 - 0,1$ мм/с, а время обработки составляет

$$\tau = \frac{Z}{V_{\text{и}}}.$$

Если используется импульсный ток, скорость подачи инструмента определяется

$$V'_{\text{и}} = \frac{V_{\text{и}}}{q}, \quad (2.27)$$

где $V_{\text{и}}$ - скорость подачи для постоянного тока;

q - скважность импульсного тока.

2.8.5 Точность электрохимической обработки

На точность размеров и формы детали влияют погрешности электрода-инструмента, погрешности оборудования, погрешности, из-за отклонения режима ЭХО от расчетного, величина припуска на обработку и его неравномерность.

В процессе ЭХО между инструментом и заготовкой отсутствует механический контакт, а удаление материала происходит одновременно по всей поверхности. При этом ограничить растворение на участках, где уже снят весь припуск практически невозможно.

Поэтому погрешность детали будет тем меньше, чем меньше погрешность исходной заготовки, величина начального зазора и чем больше время обработки.

Влияние на суммарную погрешность ЭХО оказывают нестабильность электропроводности электролита, выхода по току и величины зазора (до 50% от всей погрешности), отклонения от расчетного режима течения электролита (до 20%), упругие и температурные деформации (до 15%), погрешности установки и настройки (до 15%).

Применяются различные способы снижения погрешности обработки. Так как на точность формообразования влияет форма исходной поверхности заготовки, при ее проектировании необходимо рассчитывать величину минимального припуска и ограничивать его неравномерность. На поверхности заготовки не допускается окалина и другие неэлектропроводные загрязнения, вызывающие прекращение процесса на этих участках.

Повысить точность ЭХО можно за счет уменьшения межэлектродного зазора. При обработке по схеме с неподвижными электродами ее нужно выполнять с периодической перестановкой электродов. Чем чаще повторяется такой процесс, тем точнее можно получить деталь, но возрастает время обработки. Зазоры размером 0,02 - 0,05 мм получают установкой на поверхности электрода-инструмента твердых упоров из изоляционных материалов (алмазные иглы, абразивные зерна).

Уменьшить величину межэлектродного зазора можно применением импульсного напряжения. При обработке также применяют дополнительную ультразвуковую вибрацию электродов. Это ускоряет удаление продуктов обработки и повышает устойчивость протекания процесса.

Кроме того, широко применяют локализацию процесса анодного растворения за счет нанесения диэлектрических покрытий на заготовку или электрод-инструмент.

Если необходимо снизить скорость съема металла на каком-либо участке поверхности, то на нем можно увеличить зазор за счет удаления противоположного участка на электроде-инструменте, т.е. осуществить его коррегирование (рисунок 2.13).

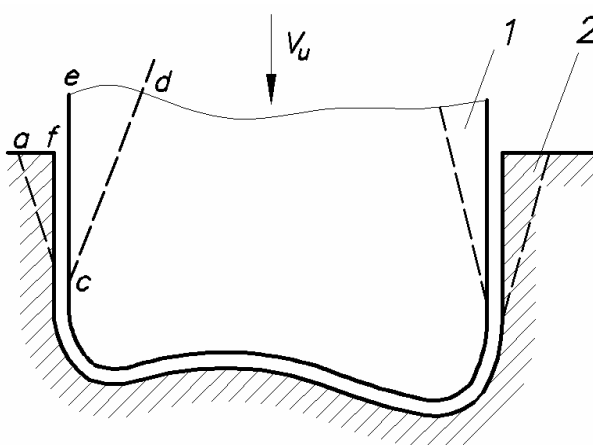


Рисунок 2.13 – Схема, поясняющая метод коррегирования при прошивании плоскости:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

Процесс формообразования глубоких полостей занимает десятки минут. Если вертикальная поверхность не покрыта изоляционным материалом, то на участке *cf* заготовки 2 в течение всего времени обработки происходит анодное растворение и в конце операции деталь будет иметь форму, соответствующую *ac*. Поэтому в области на боковой поверхности заготовки искусственно увеличивают зазор за счет удаления материала на электроде-инструменте по линии *cd*.

Размерная электрохимическая обработка позволяет обеспечить:

- при обработке с неподвижными электродами со съемом припуска по глубине 0,2 мм погрешность не более 0,02 мм, при большей глубине - 0,03-0,05 мм;
- при прошивании отверстий диаметром до 2 мм точность по 8-9 качеству;
- при обработке полостей и разрезании точность по 12-14 качеству;
- при точении и шлифовании точность по 8-10 качеству.

2.8.6 Качество поверхностей деталей после электрохимической обработки

Шероховатость обработанной поверхности. При ЭХО формирование микрорельефа на поверхности заготовки зависит от структуры ее материала, состава, температуры и скорости прокачки электролита, а также электрических параметров режима обработки. Эти факторы постоянно изменяются, поэтому анодное растворение в каждой точке на

поверхности заготовки протекает по разному, что приводит к формированию микронеровностей на обрабатываемой поверхности.

После механической обработки в начале процесса анодного растворения микрорельеф обрабатываемой поверхности повторяет ее исходный профиль на заготовке.

Характер формируемых при ЭХО микронеровностей зависит от структуры обрабатываемого металла. Чаще всего имеет место межкристаллитное растравливание (рисунок 2.14). Зерна 1 металла, как правило, имеют меньшую скорость растворения, чем материал 2 между ними. В результате на обрабатываемой поверхности возникают углубления размером h . Чем меньше зерно, тем меньше оказывается глубина межкристаллитного растравливания. Поэтому шероховатость поверхности крупнозернистых сплавов обычно выше.

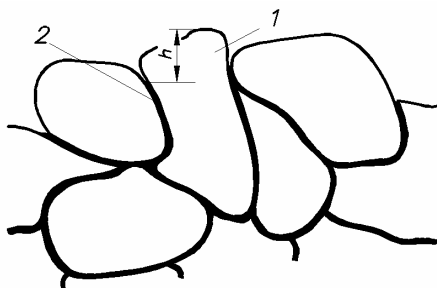


Рисунок 2.14 – Схема, поясняющая межкристаллитное растравливание:
1 – зерна металла; 2 – материал между зёрнами

Глубина микронеровностей при ЭХО зависит от плотности тока (рисунок 2.15).

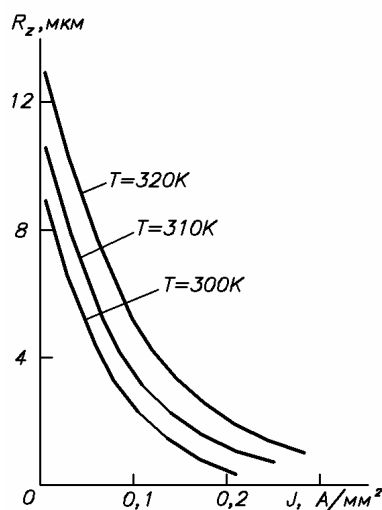


Рисунок 2.15 – Зависимости шероховатости поверхности при обработке никелевого сплава от плотности тока и температуры электролита

При снижении температуры электролита с увеличением плотности тока наблюдается снижение шероховатости поверхности (рисунок 2.15), но падает скорость растворения металла. Как правило, при ЭХО используют электролиты с температурой 290 - 310 К.

Физические свойства поверхности. После ЭХО в поверхностном слое нет снижения содержания углерода и изменения твердости, а также отсутствует наклеп. Напряжения в поверхностном слое после ЭХО повышаются в результате межкристаллитного растравливания, так как (рисунок 2.14) межкристаллитные углубления имеют малый радиус закругления. Для их уменьшения повышают плотность тока, применяют охлаждение электролита, стабилизируют гидродинамический режим протекания через МЭП, используют импульсный ток.

В процессе анодного растворения заготовки на катоде выделяется водород, который может достигать поверхности заготовки, вызывая ее наводороживание, что повышает хрупкость материала и снижает усталостную прочность. Для его предотвращения повышают скорость протекания электролита.

Влияние качества поверхности после ЭХО на механические свойства материалов. Малая шероховатость поверхности после ЭХО повышает механические свойства материалов. Этому же способствует отсутствие следов инструмента на обработанной поверхности, более плавный профиль на вершинах выступов, одинаковое качество поверхности во всех направлениях.

Отсутствие наклепа поверхности снижает механические показатели и, в первую очередь, сопротивление усталости. Отрицательно сказывается процесс микрорастворивания по границам зерен, вызывающий появление концентраторов напряжений, и явление наводороживания поверхности.

Для повышения механических свойств материалов после ЭХО проводят последующее полирование. Эффективно применение виброполирования, которое позволяет удалить растравленный слой и произвести наклеп поверхности.

Полному восстановлению усталостных характеристик сплава после ЭХО способствует его последующее поверхностное упрочнение виброударным, пневмогидравлическим, дробеструйным и ротационным способами.

2.9 Расчет и изготовление электродов-инструментов для электрохимической размерной обработки

2.9.1 Особенности проектирования электродов-инструментов

Электрод-инструмент для размерной ЭХО проектируют и изготавливают для конкретного типоразмера детали. Точность формы и размеров его рабочего профиля должны быть на один квалитет выше, чем обрабатываемой детали. Шероховатость поверхности рабочей части инструмента не влияет на качество обрабатываемой поверхности, но определяет характер течения электролита в зазоре и интенсивность его загрязнения продуктами обработки. Поэтому она принимается $Ra = 2,5$ мкм. При проектировании электродов-инструментов необходимо обеспечивать такие условия, чтобы электролит в зоне обработки протекал плавно, без резких поворотов и срывов потока электролита с появлением на заготовке местных необработанных участков.

Электроды-инструменты для размерной ЭХО проектируют на основании расчета профиля их рабочей части.

2.9.2 Материалы для изготовления электродов-инструментов

Должны обладать коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, хорошей сопротивляемостью местному разрушению при коротких замыканиях, высокой адгезией к диэлектрическим покрытиям, механической прочностью и хорошей обрабатываемостью, низкой стоимостью. Этому удовлетворяют медь и ее сплавы, нержавеющие стали, в меньшей - титановые сплавы. Недостаток меди и ее сплавов - высокая чувствительность к воздействию коротких замыканий.

Для изготовления электродов-инструментов повышенной прочности применяют нержавеющие стали. Их недостаток - низкая удельная проводимость.

В конструкциях электродов-инструментов диэлектрические материалы могут применяться либо в виде наносимых покрытий, либо в виде механически обработанных отдельных элементов.

В качестве материалов покрытий используются лаки, эпоксидные смолы, керамические эмали.

Для повышения адгезии покрытий перед их нанесением в детали 1 (рисунок 2.16а) предварительно сверлят отверстия 2 небольшого диаметра, расположенные под различными углами к поверхности. В процессе нанесения покрытие 3 заполняет эти отверстия и прочно удерживается на детали. Иногда в просверленные отверстия запрессовывают короткие штифты 4 (рисунок 2.16б).

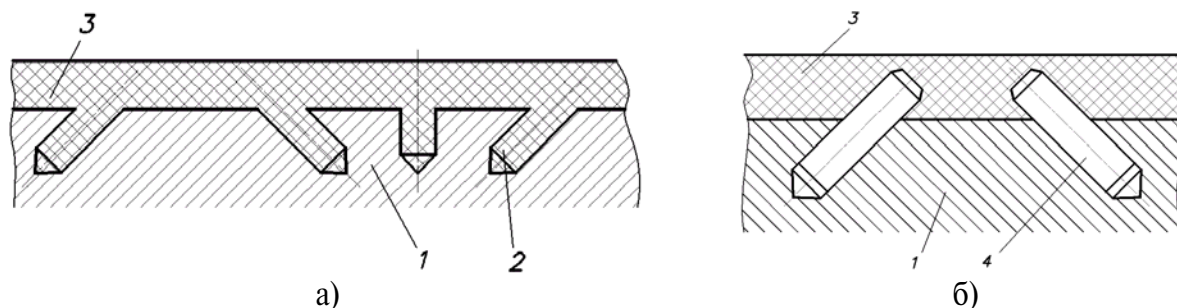


Рисунок 2.16 – Способы повышения адгезии наносимых на детали покрытий:
а – сверлением отверстий в детали; б – запрессовкой в деталь коротких штифтов; 1 – деталь; 2 – отверстия, просверленные в детали; 3 – материал покрытия; 4 – короткие штифты

2.9.3 Расчет и изготовление электродов-инструментов

В процессе ЭХО форма обработанной поверхности на заготовке оказывается непараллельной форме электрода-инструмента, что связано с непостоянством режимов обработки, а так же с тем, что даже при плоских параллельных поверхностях заготовки 1 и инструмента 2 (рисунок 2.17) плотность тока, а соответственно, съем металла вблизи краев заготовки на участке l будет другими, чем на основной части детали. Различие будет тем заметнее, чем дальше друг от друга электрод-инструмент и заготовка.

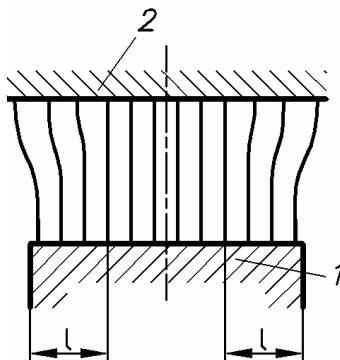


Рисунок 2.17 – Характер распределения электрического поля в межэлектродном зазоре:
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – электрод-инструмент

Чтобы приблизить форму детали к требуемой либо наносят слой диэлектрического покрытия на электрод-инструмент или деталь, либо корректируют форму рабочей поверхности электрода-инструмента по результатам экспериментов. Тогда режим обработки принимается стабильным. При этом методика расчета зависит от технологической схемы ЭХО.

При ЭХО по схеме с неподвижными электродами корректировка формы рабочей поверхности инструмента не дает результатов, так как из-за постоянного возрастания межэлектродного зазора условия обработки по времени меняются. В этом случае используют диэлектрические покрытия. На рис. 2.18 показаны примеры нанесения покрытия 2 на поверхность электрода-инструмента 1. Если размеры электропроводной

части электрода-инструмента совпадают с размерами заготовки 3 (рисунок 2.18а), то искажение электрического поля будет только в непосредственной близости от кромок, и профиль детали будет близок к форме рабочей поверхности электрода-инструмента (показано пунктиром). Если размеры заготовки 3 отличаются от размеров рабочей части инструмента 1 (рисунок 2.18б), то электрическое поле в зазоре окажется неравномерным и форма детали около границ обрабатываемого контура исказится (пунктирная линия).

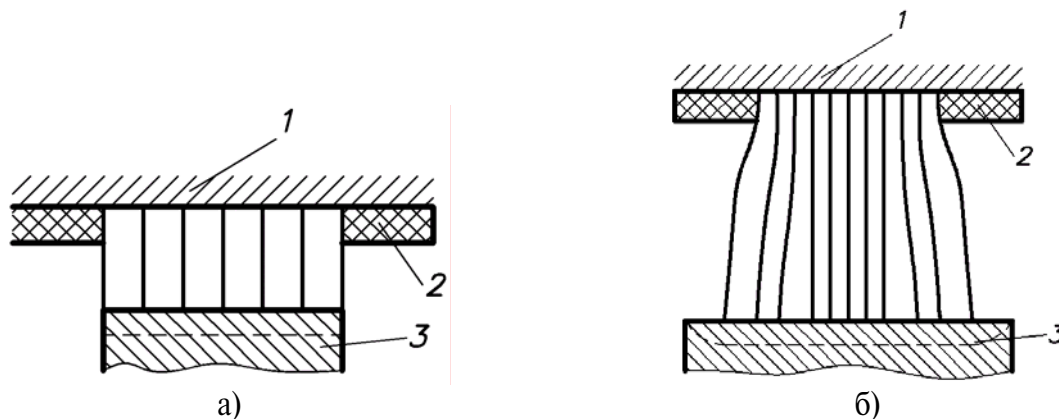


Рисунок 2.18 – Характер распределения электрического поля в межэлектродном зазоре при нанесении диэлектрического покрытия на электрод-инструмент:

а – размеры заготовки и электропроводной части инструмента совпадают; б – размер заготовки больше электропроводной части инструмента; 1 – электрод-инструмент; 2 – диэлектрическое покрытие; 3 – обрабатываемая заготовка

Когда диэлектрик наносится на заготовку 3 (рисунок 2.19), то вблизи границ изолятора 2 плотность тока возрастает. В этих местах независимо от размеров инструмента 1 будет происходить увеличенный съем металла (пунктирная линия), т.е. возникает погрешность по глубине обработки. Но для большинства операций ЭХО с неподвижными электродами эта погрешность не является определяющей. Поэтому лучше наносить изоляцию на заготовку.

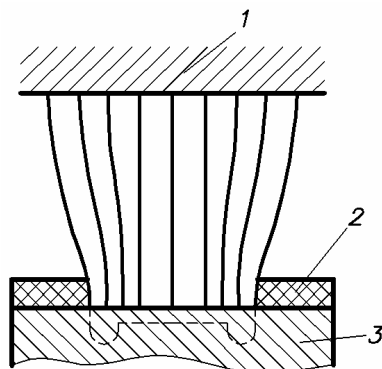


Рисунок 2.19 – Характер распределения электрического поля при нанесении диэлектрического покрытия на заготовку:

1 – электрод-инструмент; 2 – диэлектрическое покрытие; 3 – обрабатываемая заготовка

Диэлектрические покрытия на заготовку наносят с помощью масок или фотолитографии. После ЭХО покрытия удаляют путем шлифования, полирования или химического травления. При этом покрытие используется только один раз, что усложняет процесс подготовки заготовок к ЭХО.

Чтобы избежать этого применяют диэлектрический трафарет, который изготавливают методом гравирования на фрезерно-копировальных станках.

Для изготовления отверстий применяется электрод-инструмент (рисунок 2.20) в виде трубки 1, изолированной снаружи диэлектрическим покрытием 2.

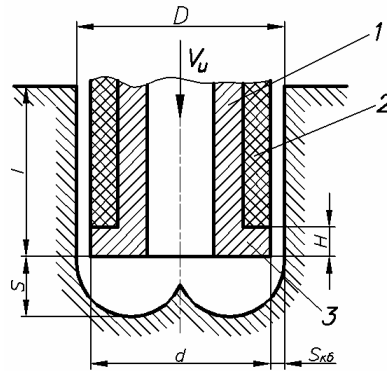


Рисунок 2.20 – Схема прошивания отверстия с помощью трубчатого электрода-инструмента:
1 – металлическая трубка; 2 – диэлектрическое покрытие; 3 – бурт

Со стороны рабочего торца выполнен бурт 3, который предохраняет покрытие 2 от разрушения струей электролита и продуктами обработки. Если обрабатывается круглое отверстие, то электрод-инструмент дополнительно вращается для повышения точности размеров сечений.

Расчет электрода-инструмента сводится к определению диаметра d_n , обеспечивающего получение отверстия диаметром D . За счет съема буртом 3 металла с боковых поверхностей отверстия можно записать

$$d_n = D - 2y, \quad (2.28)$$

где y - съем металла с боковых поверхностей отверстия.

Он равен изменению бокового зазора за время прохождения отверстия буртом

$$y = S_{к.б} - S_{об}, \quad (2.29)$$

где $S_{к.б}$ - величина конечного зазора;

$S_{об}$ - величина начального бокового зазора.

Значение конечного зазора $S_{к.б}$ определяется как

$$S_{к.б} = \sqrt{\frac{2\eta\psi U\tau}{\rho} + S_{об}^2}. \quad (2.30)$$

Время воздействия бурта на боковую поверхность $\tau = H / V_n$, где H высота бурта. Начальный боковой зазор $S_{об}$ можно приравнять к торцовому установившемуся зазору S , поэтому

$$d_n = D - 2\sqrt{\frac{2\eta\psi UH}{\rho V_n} + S^2} + 2S. \quad (2.31)$$

Длина электрода-инструмента l рассчитывается по формуле

$$l = h_{рем}(l_d + l_3 + l_b), \quad (2.32)$$

где l_d - глубина обрабатываемого отверстия;

l_3 - длина участка для закрепления инструмента в электрододержателе;

l_b - длина выхода инструмента при прошивании сквозных отверстий;

$h_{рем} = 1,2 - 2$ - коэффициент, учитывающий сокращение длины инструмента при ремонте.

Изготавливают электроды-инструменты в следующей последовательности:

- рассчитывают диаметр d_u ;
- трубку необходимого диаметра рихтуют;
- отрезают кусок трубы необходимой длины;
- протягивают или шлифуют наружную поверхность на глубину слоя изоляции, оставляя бурт и участок для закрепления электрода-инструмента в электрододержателе;
- наносят диэлектрическое покрытие;
- зачищают рабочую часть электрода-инструмента от изоляции;
- проводят контроль параметров электрода-инструмента.

При прошивании некруглых узких пазов могут возникнуть трудности в получении центрального отверстия в электроде-инструменте. Тогда зазор между сплошным электродом-инструментом 1 (рисунок 2.21) и заготовкой 2 уплотняют по всей глубине отверстия прокладками 3. Электролит подают с одной стороны отверстия, он проходит под торцом инструмента и выходит с другой стороны.

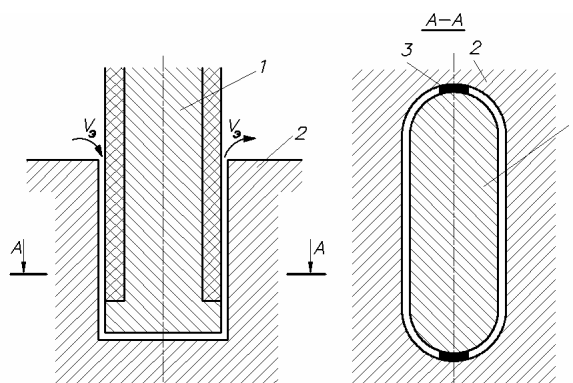


Рисунок 2.21 – Схема прокачки электролита при обработке некруглых узких пазов:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – диэлектрические прокладки

При проектировании электрода-инструмента для прошивания полостей необходимо рассчитать форму его рабочей поверхности, а также определить расположение на ней отверстий и щелей для подвода электролита в зону обработки. Для этого по чертежу обрабатываемой поверхности детали строят эквидистантный профиль рабочей поверхности электрода-инструмента с зазором, равным установившемуся зазору S . После этого находят действительную форму электрода-инструмента, используя один из методов:

- аналитический и графоаналитический;
- метод моделирования;
- производственный метод.

Аналитический расчет формы инструмента выполняется путем разделения контура на отдельные участки, описываемые плоскими, цилиндрическими и сферическими поверхностями (громоздкий).

При методе непрерывного моделирования фильтровальную бумагу 1 (рисунок 2.22), накладывают на подставку 2, с капиллярными отверстиями 3. При этом часть капилляров можно перекрывать заслонкой 4, повторяющей по форме начальную обрабатываемую поверхность. Подставку 2 помещают в жидкость, которая через свободные капилляры смачивает фильтровальную бумагу 1. Протекание процесса смачивания и последующего распространения жидкости по фильтровальной бумаге фиксируют с помощью кино- или фотоаппарата 5. Получаемая картина подобна изменению формы обрабатываемой поверхности при ЭХО. Форму заслонки 4 подбирают так, чтобы получить требуемый контур углубления на детали. Способ простой, но не точный.

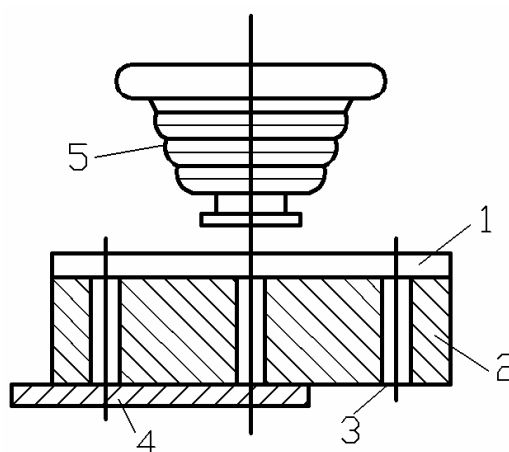


Рисунок 2.22 – Схема метода непрерывного моделирования:

1 – фильтровальная бумага; 2 – подставка; 3 – капиллярные отверстия; 4 – заслонка; 5 – кино- или фотоаппарат

Наибольшее распространение в ЭХО получили производственные методы, когда требуемая форма и размеры электрода-инструмента уточняются на основе экспериментов, проведенных на промышленном оборудовании. Используются два способа получения требуемой формы электрода-инструмента:

- способ обратного копирования;
- способ последовательных приближений.

При первом способе электрод-инструмент получают с помощью ЭХО, когда в виде инструмента используется изготовленная слесарно-механическим методом модель детали.

При втором способе требуемое уточнение формы рабочей части электрода-инструмента производится по результатам обработки пробной партии заготовок. При этом уточнение формы и размеров инструмента проводят до получения деталей, соответствующих требованиям чертежа.

Для эффективной ЭХО необходимо правильное расположение на электродах-инструментах щелей и отверстий для подачи электролита. При прошивании подача электролита в зазор может осуществляться по двум вариантам:

вдоль или поперек обрабатываемой поверхности;

через отверстия и щели, выполненные в электроде-инструменте.

Первое применяют при обработке полостей до 10 - 15 мм, когда обрабатываемая поверхность имеет плавный профиль и путь протекания электролита до 100 - 150 мм (рисунок 2.23).

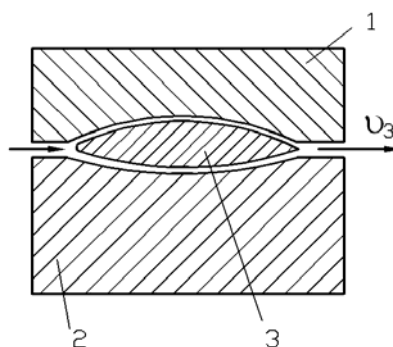


Рисунок 2.23 – Схема подачи электролита:

1, 2 – электроды-инструменты; 3 – лопатка турбины

Когда обрабатываемая полость имеет значительную глубину, то электролит подают через предусмотренные в электроде-инструменте отверстия (рисунок 2.20). Недостатки метода - сложность изготовления инструментов и необходимость последующей обработки участка заготовки, расположенного напротив отверстия, где остаются выступы высотой до 1 мм.

При определении числа отверстий и щелей для подачи электролита и мест их расположения руководствуются рекомендациями:

1) отверстия и щели необходимо располагать на выступающих участках электрода-инструмента вдоль осей симметрии профиля;

2) стремятся к тому, чтобы путь электролита в каждом сечении от щели или отверстия до одной из границ обрабатываемого контура был минимальным.

Если обрабатываемое углубление имеет вытянутую форму (рисунок 2.24а), то предусматривают одну щель, расположенную вдоль длинной стороны по оси симметрии. Для полостей с квадратным или ромбовидным поперечным сечением (рисунок 2.24б) в инструменте прорезают щели, направленные по диагонали. Если обрабатываемые полости имеют расширения на концах (рисунок 2.24в, г), то на электродах-инструментах необходимо выполнять кроме продольной одну или две прорези в местах расширения. Для обработки полостей, имеющих форму тел вращения (рисунок 2.24д) подвод электролита осуществляется через систему отверстий, расположенных по контуру наружной поверхности инструмента.

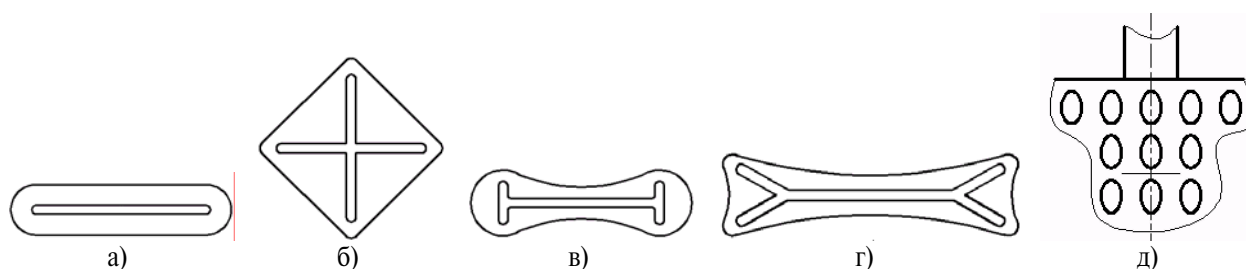


Рисунок 2.24 – Расположение щелей и отверстий для прокачки электролита на электродах-инструментах при обработке полостей различной формы:

а – полость вытянута; б – полость квадратной или ромбовидной формы; в и г – полости, имеющие расширение на концах; д – полости, имеющие форму тел вращения

Инструменты, применяемые для обработки торцов, имеют коробчатую форму (рисунок 2.25в). Их рабочая часть имеет форму диска с радиальными пазами для подвода электролита. Если мощность источника питания недостаточна для обеспечения расчетной плотности тока, то рабочую часть электрода-инструмента делают в форме сектора (рисунок 2.25г) или нескольких секторов, часть из которых изготовлена из диэлектрика (рисунок 2.25д). Подвод электролита в зону обработки осуществляется через радиальные щели (рисунок 2.25г) или через центральное отверстие (рисунок 2.25д).

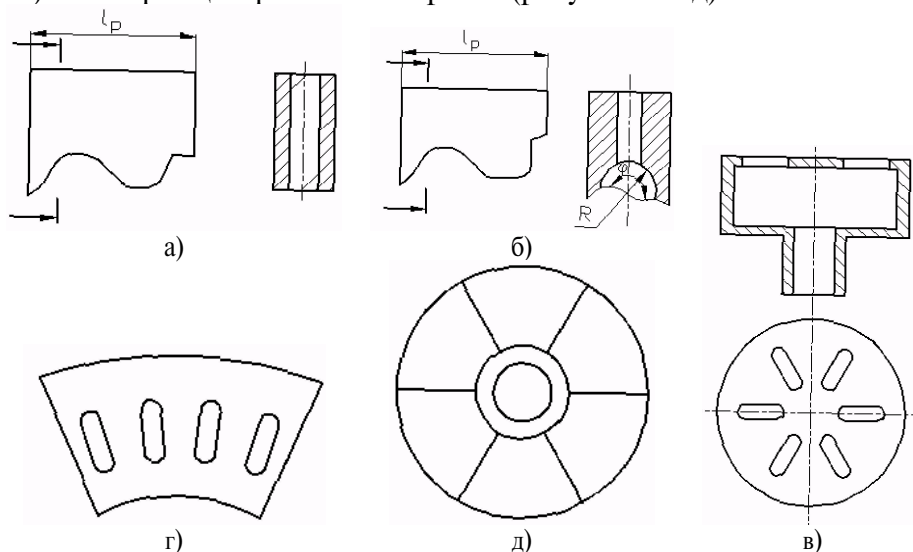


Рисунок 2.25 – Формы электродов-инструментов для электрического точения:

а, б – для точения наружных поверхностей; в, г, д – для обработки торцевых поверхностей

Для точения внутренней поверхности применяется электрод-инструмент в виде вала с центральным отверстием для подвода электролита (рисунок 2.26). На их наружной поверхности могут устанавливаться диэлектрические упоры 3, выступающие из корпуса 1 на величину, близкую к размеру МЭП. По длине электрода-инструмента выполняют несколько рабочих участков, которые последовательно вступают в работу.

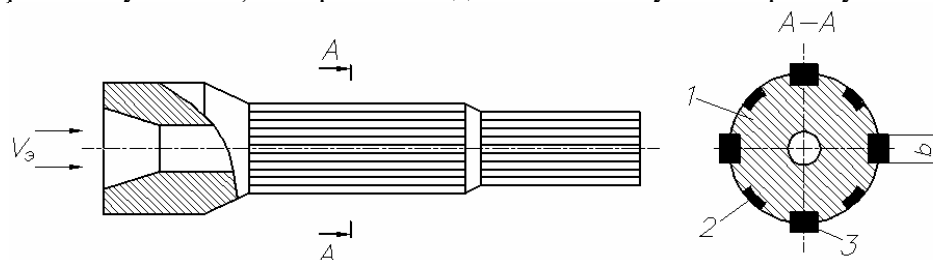


Рисунок 2.26 – Конструкция электрода-инструмента для точения внутренней поверхности:
1 – металлический корпус; 2 – диэлектрические вкладыши; 3 – диэлектрические упоры

При обработке отверстий некруглого поперечного сечения или переменного по длине диаметра применяют электроды-инструменты, выполненные в виде перемещаемой по отверстию каретки (рисунок 2.27) с рабочей частью 5 и упорами 3. Электролит в зону обработки подают через внутреннюю полость штанги 1 и корпуса 2. Размер межэлектродного зазора поддерживается за счет диэлектрических роликов 3. При обработке отверстия переменного диаметра, упоры 4 раздвигаются или сближаются, за счет чего обеспечивается постоянный прижим роликов 3 к заготовке.

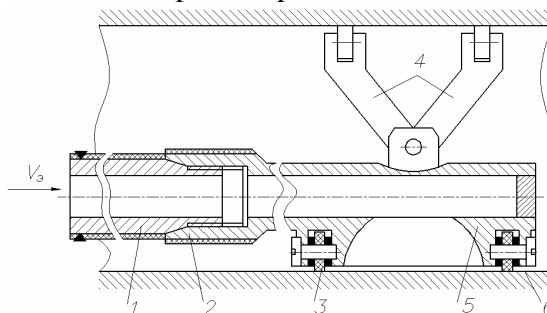


Рисунок 2.27 – Конструкция электрода-инструмента для обработки отверстий некруглого поперечного сечения или переменного по длине диаметра:

1 – штанга; 2 – корпус; 3 – диэлектрические ролики; 4 – упоры; 5 – рабочая часть; 6 – обрабатываемая заготовка

Электроды-инструменты для протягивания применяют для обработки поверхностей с плавными переходами между ними. Для повышения точности круглого цилиндрического отверстия заготовке может предаваться вращательное движение с частотой 0,5 - 1,5 Гц.

Корпус 1 электрода-инструмента (рисунок 2.28) из латунного проката. Ток от штанги подводят через конический участок с резьбой. Конус на штанге и в корпусе притирают до площади контакта не менее 70%. Переднюю 2 и заднюю 3 направляющие выполняют из диэлектрика с винтовыми канавками для протекания электролита. После этого их протачивают по наружной поверхности в сборе с корпусом инструмента.

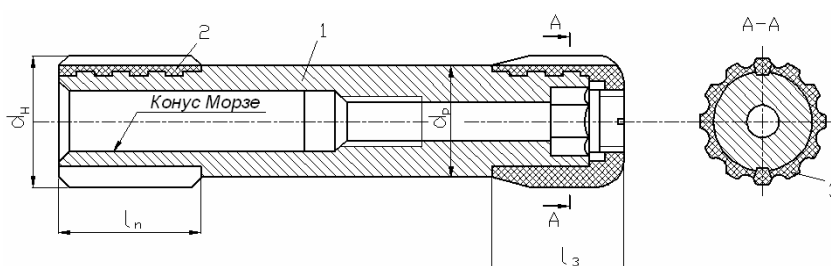


Рисунок 2.28 – Конструкция электрода-инструмента для обработки внутренних поверхностей круглых труб:
1 – корпус; 2, 3 – передняя и задняя направляющие

При обработке отверстия с профилем переменного сечения применяют электрод-инструмент нежесткой конструкции (рисунок 2.29). Он представляет собой эластичную камеру 1 из резины. На наружной поверхности камеры выполнены углубления, в которых закреплены металлические полоски 2. Через трубки 3 внутрь камеры подают воздух под давлением. В результате наружная поверхность камеры прижимается к поверхности детали и повторяет ее форму по мере перемещения электрода-инструмента вдоль оси детали. Электрический ток к полоскам подводят через штангу 4, а по внутренней поверхности заготовки прокачивают электролит. Закрепляют полоски на камере слоем резины при вулканизации.

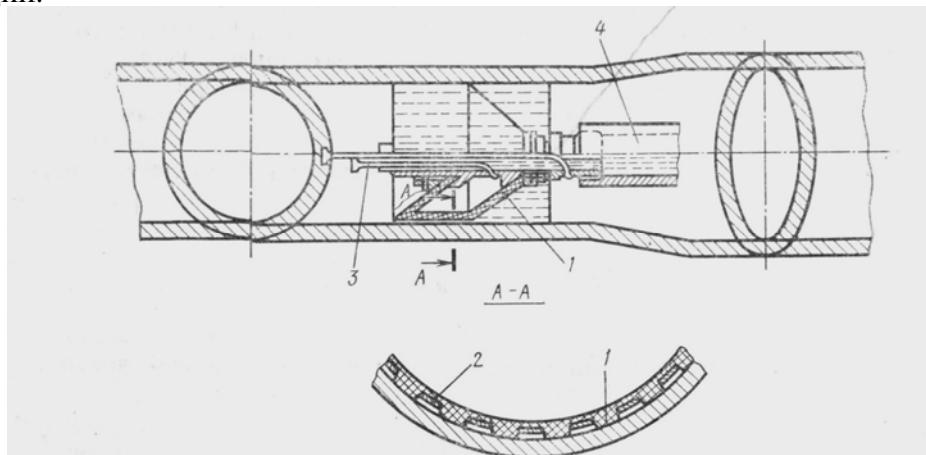


Рисунок 2.29 – Конструкция нежесткого электрода-инструмента для обработки отверстий с профилем переменного сечения:

1 – эластичная камера из резины; 2 – металлические полоски; 3 – трубки для подачи воздуха под давлением; 4 – штанга

2.10 Технологические возможности электрохимической размерной обработки

Маркирование деталей выполняют по схеме с неподвижными электродами. Необходимая информация переносится на деталь путем копирования профиля на электродах или избирательным растворением металла в прорезях диэлектрического трафарета. Знаки 1,4 (рисунок 2.30) на инструменте выполнены в зеркальном отображении и закреплены на торцевой части корпуса 3. Пространство между ними заполнено диэлектриком 2, который предохраняет материал детали от растворения на участках между знаками. Начальный зазор между рабочей частью наносимых знаков 1,4 и заготовкой 6 обеспечивается диэлектрическими прокладками 5. В результате анодного растворения металла под знаками образуются углубления, повторяющие отображение профиля знаков. Процесс протекает при малой скорости электролита и продукты обработки оседают в углублениях, образуя контрастное изображение.

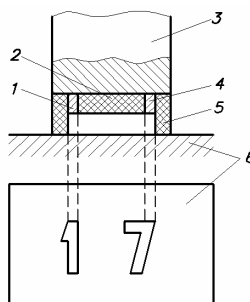


Рисунок 2.30 – Схема маркирования с нанесением диэлектрика на электрод-инструмент:

1, 4 – знаки, выполненные в зеркальном отображении; 2 – диэлектрик, заполняющий пространство между знаками; 3 – корпус электрода-инструмента; 5 – диэлектрические прокладки; 6 – обрабатываемая заготовка

При маркировании с использованием диэлектрических трафаретов (рисунок 2.31) наносимая информация имеет форму просечек 1, 2. Трафарет 4 накладывают на деталь 3 и прижимают электродом-инструментом 5. Процесс анодного растворения протекает в электролите, который заранее нанесен на поверхность детали.

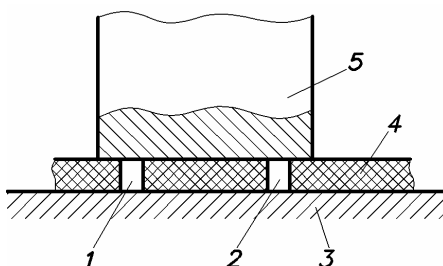


Рисунок 2.31 – Схема маркирования с использованием диэлектрических трафаретов:
1, 2 – просечки, имеющие форму наносимой информации; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – трафарет;
5 – электрод-инструмент

При обработке по схеме с неподвижными электродами можно удалять заусеницы в труднодоступных местах. После механической обработки на кромках отверстий образуются заусеницы 4 (рисунок 2.32). Их необходимо удалить, а кромки отверстий скруглить. Для этого в одно из отверстий заготовки 2 вводят электрод-инструмент 1, у которого наружная боковая поверхность покрыта изоляционным слоем 3. При этом снижается шероховатость поверхности и гидравлические потери в системе.

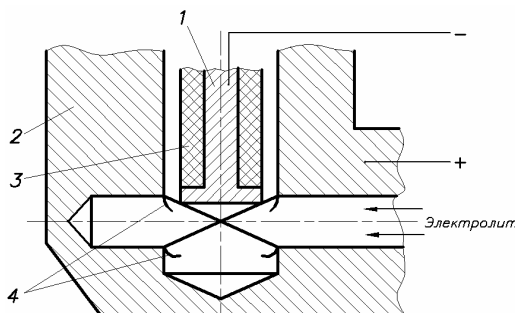


Рисунок 2.32 – Схема удаления заусениц в труднодоступных местах:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – слой изоляции; 4 – заусеницы на кромках отверстий

Применяются детали из трудно деформируемых сплавов с внутренними полостями (рисунок 2.33). Диаметр рабочей части у них в несколько раз превышает диаметр горловины. Изготовить внутреннюю полость металлорежущим инструментом невозможно. С помощью ЭХО их получают электродом-инструментом 1 в виде трубки. В заготовке предварительно просверливают отверстие 5 (показано пунктиром) и вставляют электрод-инструмент. Часть поверхности электрода-инструмента или заготовки на участке горловины покрывают изоляционным слоем 4, предотвращая растворение этого участка детали. Через отверстие 3 в электроде-инструменте прокачивают электролит со скоростью $V_э$.

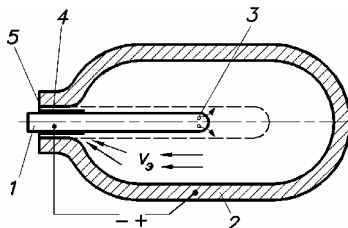


Рисунок 2.33 – Схема обработки внутренней полости в заготовках, изготовленных из труднодеформируемых сплавов:

1 – электрод-инструмент в виде трубки; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – отверстие в электроде-инструменте;
4 – слой изоляционного материала; 5 – предварительно просверленное отверстие

Схему точения можно использовать при обработке части нежесткой заготовки (рисунок 2.34), у которой имеется выступ 3, который необходимо сохранить. Сама заготовка является нежесткой. Обработка ее возможна только с использованием бесконтактных методов. Электрохимическую обработку выполняют электродом-инструментом 1, через который прокачивают электролит со скоростью V_3 . Заготовке 2 сообщается возвратно-вращательное движение вокруг оси так, что рабочая часть электрода-инструмента не достигает выступа на заготовке. Так получают детали до нескольких метров при толщине стенки в доли миллиметра.

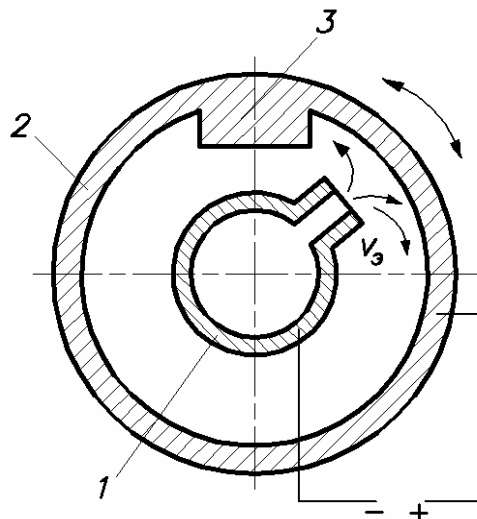


Рисунок 2.34 – Схема точения при обработке части нежесткой заготовки:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – выступ на заготовке

При схеме прошивания можно одновременно получать несколько плавно сопряженных между собой поверхностей сложной формы (рисунок 2.35). При этом можно обеспечить точное взаимное расположение всех участков без применения копировальных устройств. Электрод-инструмент 1 имеет одно поступательное движение V_u к заготовке 2 независимо от формы обрабатываемой поверхности. Электролит поступает в межэлектродный зазор через систему отверстий и щелей в электроде-инструменте.

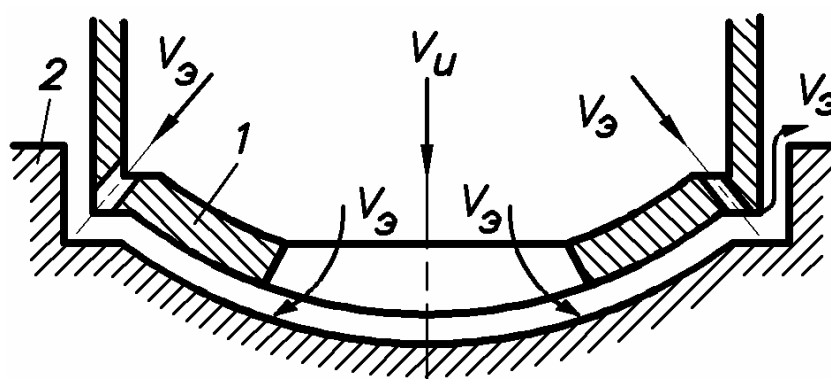


Рисунок 2.35 – Схема обработки нескольких плавно сопряженных между собой поверхностей сложной формы:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

С помощью ЭХО по схеме прошивания выполняют каналы произвольного сечения с криволинейной осью (рисунок 2.36). Для этого электрод-инструмент 2 подают к заготовке 3 по окружности радиусом R . Чтобы предотвратить конусность отверстия электрод-инструмент 2 покрывают изоляционным слоем 1.

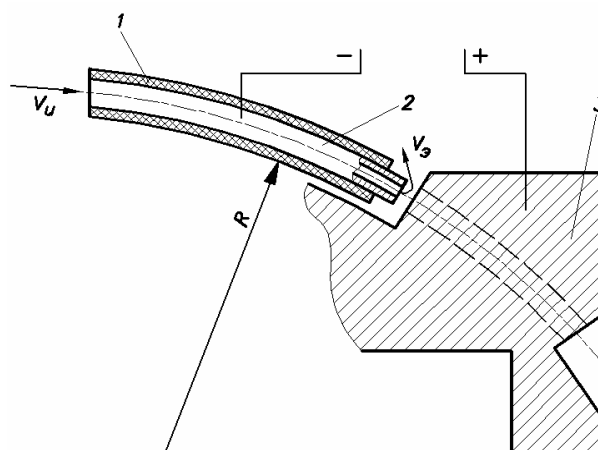


Рисунок 2.36 – Схема обработки канала с криволинейной осью:
1 – слой изоляции; 2- электрод-инструмент; 3 – обрабатываемая заготовка

При протягивании выполняют чистовую обработку отверстий любого поперечного сечения к с криволинейной осью (рисунок 2.37). Электрод-инструмент 3 выполняется бочкообразной формы и на его наружную поверхность наносят выступы 2 из диэлектрика. В процессе ЭХО электрод-инструмент протягивается вдоль трубы 1 тросом, со скоростью V_u . Внутри трубной заготовки со скоростью $V_э$ прокачивается электролит.

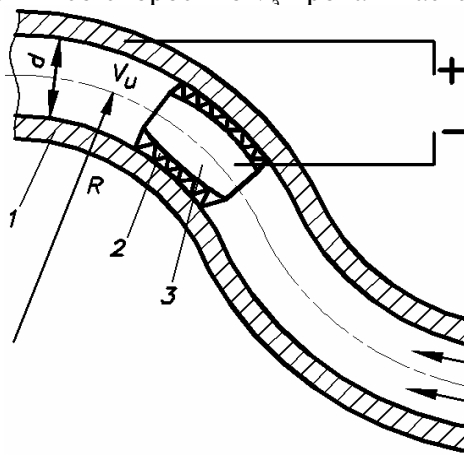


Рисунок 2.37 – Схема обработки протягиванием внутренней поверхности трубы:
1 – обрабатываемая труба; 2 – выступы из диэлектрического материала; 3 – электрод-инструмент

2.11 Оборудование для электрохимической обработки

2.11.1 Типовая структура оборудования

По структуре станки для ЭХО близки к агрегатным. Они включают стандартные узлы: источник питания, насос, ванны для хранения электролита и промывочно-пассивирующих жидкостей, устройство для очистки электролита и элементы управления. Механическая часть электрохимических станков включает элементы для установки и закрепления заготовки, механизмы подачи электродов-инструментов, системы подвода напряжения и электролита.

2.11.2 Источники питания и их выбор

Источники питания (ИП) электрохимических станков преобразуют переменное напряжение электрической сети в постоянное или униполярное импульсное. Для всех

способов обработки, кроме струйного метода, выходное напряжение ИП не превышает 36 В. Сила тока может достигать 30000 А.

Все источники питания разделяются на два вида: электромеханические и статические. Первые представляют собой механически связанные электродвигатель и генератор, вырабатывающий ток требуемого напряжения. Однако они имеют низкий КПД, шумят вибрируют, поэтому они практически не применяются.

Статические источники питания используют селеновые и кремниевые выпрямители. Напряжение от сети переменного тока подается на понижающий трансформатор 1 (рисунок 2.38), затем на выпрямитель 2, который связан с блоками регулирования 3 и стабилизации процесса 5. Блок регулирования позволяет задать нужную форму изменения напряжения, тока и их полярность. При коротком замыкании между заготовкой и электродом-инструментом и при других перегрузках срабатывает система защиты 4, которая прерывает подачу напряжения на электроды.

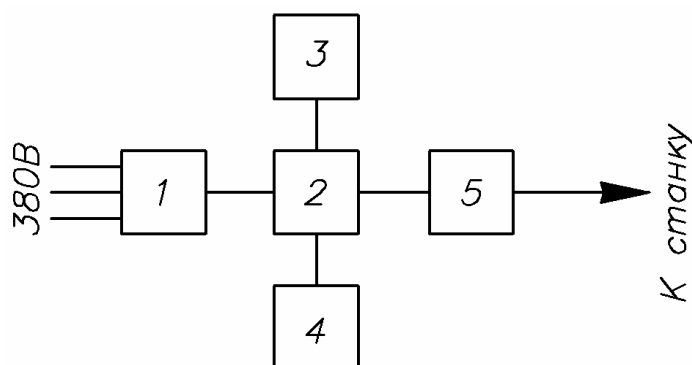


Рисунок 2.38 – Блок-схема источника питания электрохимических станков

Блок стабилизации 5 напряжения или силы тока обеспечивает постоянное поддержание этих параметров независимо от условий ЭХО. Источники питания могут иметь на выходе различные внешние вольт-амперные характеристики (рисунок 2.39): жесткую 1, естественную 2 и крутопадающую 3. Источники с естественной и жесткой характеристикой имеют слабо изменяющиеся или постоянное напряжение независимо от силы выходного тока. Это облегчает управление и регулирование процессом ЭХО. Однако при коротких замыканиях в таких источниках резко возрастает ток, что приводит к их выходу из строя. Источники с крутопадающей внешней характеристикой, при коротких замыканиях ограничивают возрастание силы тока значением тока короткого замыкания I_k , близким к рабочему $I_{раб}$ (рисунок 2.39).

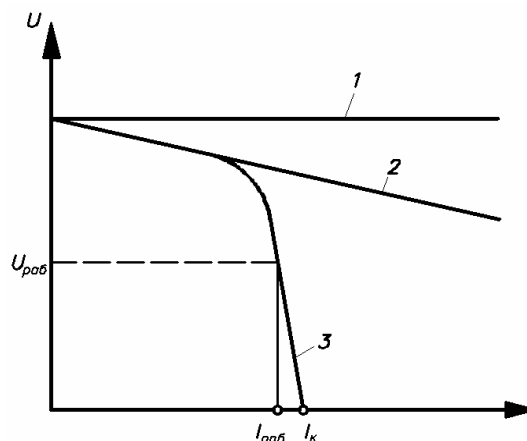


Рисунок 2.39 – Виды вольтамперных характеристик на выходе источников питания:
1 – жесткая; 2 – естественная; 3 – крутопадающая

Выбор и расчет токоподводов. От источника питания ток к механической части станка передают по гибким или жестким шинам. Если сила тока не превышает 100 А используют отдельные провода большого сечения или их наборы. При силе тока до 1000-1200 А применяют наборы гибких медных оплеток или пакеты медной фольги. При силе тока свыше 1200 А в качестве токоподводов применяют жесткие шины в виде полос из меди, алюминия или их сплавов. Иногда они могут быть охлаждаемыми.

Площадь сечения токоподвода S_t находят из условия прохождения по нему тока с определенной плотностью i_n :

$$S_t = \frac{I_t}{i_n} \quad (2.33)$$

Для медных токоподводов $i_n = 1-2$ А/мм², для алюминиевых $i_n = 0,8-1,5$ А/мм². При охлаждении $i_n = 3-6$ А/мм² и $i_n = 2-3$ А/мм², соответственно для медных и алюминиевых проводов.

Для надежной передачи тока следует правильно выбирать размеры контактных площадок и силы их прижима. От того будут зависеть потери напряжения, которые не должны превышать $(0,03...0,05)UL$, где U - номинальное напряжение, В; L - длина токоведущих шин, м.

Необходимую площадь контакта S_k в местах присоединения рассчитывают по формуле

$$S_k = \frac{I_t}{i_k}, \quad (2.34)$$

где i_k - предельная плотность тока через контакт (без охлаждения $i_k = 1$ А/мм², а с охлаждением $i_k = 8$ А/мм²).

Для снижения потерь напряжения и мощности необходимо обеспечить высокую плотность прижима в контактных соединениях для меди $(60...100) 10^5$ Па, для алюминия $(200...250) 10^5$ Па.

2.11.3 Системы регулирования режима ЭХО

В качестве основного параметра режима используют:

- при неподвижных электродах - постоянную плотность тока;
- при обработке заготовок с постоянной площадью обрабатываемой поверхности - постоянную силу тока;
- при необходимости удалить определенный объем металла - количество электричества;
- при обработке заготовок с переменной площадью - минимальный межэлектродный зазор.

Постоянство плотности тока осуществляют пропорциональным увеличением напряжения по мере анодного растворения металла с поверхности заготовки, т.е. при возрастании межэлектродного зазора.

Для постоянной силы тока в процессе ЭХО изменяют скорость подачи электрода-инструмента. Если ток увеличивается, скорость подачи снижают до требуемого значения.

Дозирование количества электричества осуществляют с помощью приборов типа ваттметров с выключателями. После прохождения заданного количества электричества ток автоматически выключается и процесс обработки прекращается.

При ЭХО заготовок с переменной площадью поддерживают размер торцевого межэлектродного зазора периодически сближая электроды при выключенном напряжении (рисунок 2.40). С помощью механизма подачи 6 электрод-инструмент 5 перемещается к обрабатываемой заготовке 4. Через некоторое время прерыватель 1 отключает источник питания 2, после чего сближают электроды 4 и 5 до их касания. Момент касания фиксируется системой 3 автоматического регулирования. После этого от блока 3 поступает сигнал на электродвигатель 7 механизма подачи 6. По этому сигналу электрод-инструмент 5 отводится от заготовки 4 на заданный размер межэлектродного зазора. После чего от блока 3 поступает сигнал прерывателю 1 на включение источника питания 2 и процесс обработки возобновляется.

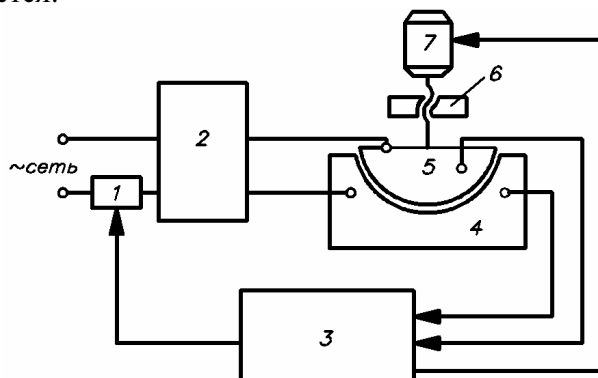


Рисунок 2.40 – Принципиальная схема системы регулирования размера межэлектродного промежутка:
1 – прерыватель; 2 – источник питания; 3 – система фиксации момента касания электродов;
4 – обрабатываемая заготовка; 5 – электрод-инструмент; 6 – механизм подачи электрода-инструмента;
7 – электродвигатель

Чем чаще происходит регулирование зазора, тем выше точность формообразования детали, но ниже производительность обработки. В производстве зазор регулируют через 3-5 секунд.

Применяют импульсно-циклические схемы регулирования, когда после касания при отводе электрода-инструмента включается рабочий ток, а отвод продолжается до величины заданного зазора. Такая схема обеспечивает высокую точность копирования электрода-инструмента на детали, но имеет сложную конструкцию.

При регулировании зазора без выключения тока электроды сближают на расстояние, при котором еще не происходит короткого замыкания, а истинный зазор определяют по соотношению сил тока перед сближением и в его конце.

2.11.4 Система хранения, подачи и очистки электролита

Для хранения и приготовления электролита применяются ванны из нержавеющей стали или химически стойких диэлектриков. Для стабилизации температуры электролита в ваннах устанавливают теплообменники для его подогрева и охлаждения.

При большом количестве станков применяются бетонные емкости или бассейны. В них электролит методом отстаивания очищается от продуктов обработки, имеет стабильный состав и температуру.

Системы подачи электролита служат для его прокачки через межэлектродный промежуток со скоростью, обеспечивающей удаление из него продуктов обработки. Обычно используют центробежные насосы.

При небольших расходах электролита, для его прокачки применяют пневмонагнетатель (рисунок 2.41). Он состоит из двух цилиндров с поршнями, которые связаны между собой жестким рычагом. Когда на один из поршней давит сжатый воздух и выжимает электролит, в другой цилиндр в этот момент из ванны поступает электролит. Если давление создается левым на рис. 2.41. поршнем, то вентили 1, 4, 5 и 8 открыты, а

вентили 2, 3, 6 и 7 закрыты. Затем вентили переключаются, и электролит к станку поступает из правого цилиндра. Пневмонагнетатели позволяют получать высокое давление. Однако имеют малую производительность и низкую надежность.

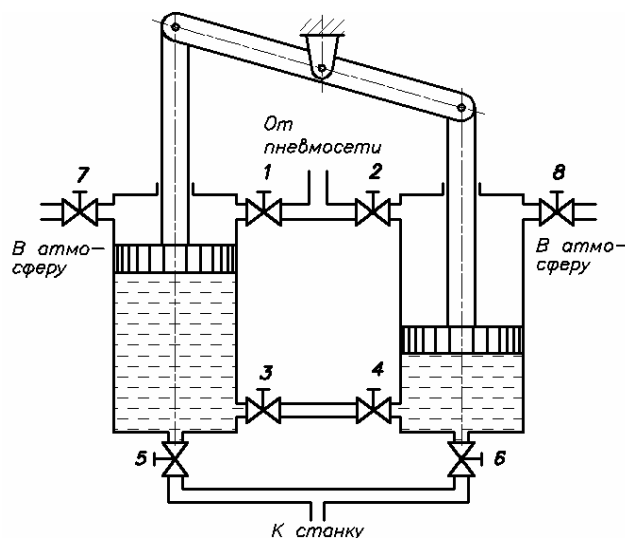


Рисунок 2.41 – Схема пневмонагнетателя для прокачки электролита

Очистка электролита от продуктов обработки

Применяются несколько способов: отстой электролита (наиболее часто используется), центрифугирование, очистка пресс-фильтрами и вакуумными фильтрами, электрофлотация или осаждение продуктов обработки с помощью коагуляторов.

Пресс-фильтры, представляют собой систему уловителей (фильтрованной ткани, бумаги) через которую прокачивают электролит под давлением. Они имеют высокую чувствительность, полностью механизированы и обеспечивают высокую степень очистки электролита. Недостаток - большие габариты и необходимость периодической замены фильтрующих элементов.

Очистка электрофлотацией заключается в отделении продуктов обработки с помощью электрического поля, создаваемого в ванне.

Коагуляторы - химические вещества, которые способствуют переходу продуктов обработки в нерастворимое состояние и выпадению в осадок. Однако коагуляторы вызывают образование пены, которая может привести к нарушению стабильности протекания процесса анодного растворения.

3 ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

3.1 Физические основы электроннолучевой обработки

3.1.1 Основные стадии формирования электронного луча и применяемое оборудование

Процесс формирования электронного луча включает следующие стадии:

- получение свободных электронов;
- ускорение электронов электростатическим или магнитным полем и формирование электронного пучка;
- изменение поперечного сечения электронного пучка, т.е. его фокусирование на обрабатываемой поверхности;
- отклонение электронного луча и обеспечение требуемой траектории его перемещения относительно обрабатываемой поверхности.

Для получения электронного луча технологического назначения и управления им применяются **электронные пушки** (рисунок 3.1).

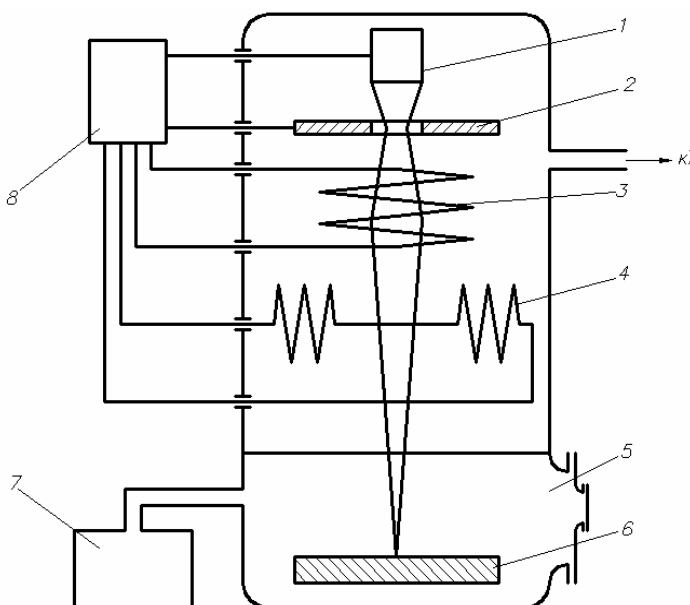


Рисунок 3.1 – Функциональная схема электронной пушки:

1 – термоэмиссионный катод; 2 – анод; 3 – магнитная линза; 4 – отклоняющая система; 5 – рабочая камера; 6 – обрабатываемая заготовка; 7 – система вакуумных насосов; 8 – блок питания

Источником электронов является термоэмиссионный катод 1 из вольфрама, тантала. Рабочая температура достигает $1600-2800\text{ K}$. Подогрев катода осуществляется с помощью накаливаемого электрическим током подогревного элемента. Срок службы катодов не превышает нескольких десятков часов.

На расстоянии от катода расположен анод 2 в виде массивной детали с отверстием. Между катодом и анодом от специального высоковольтного источника питания, входящего в состав блока питания 8, прикладывается **ускоряющее напряжение** $30-150\text{ кВ}$. За счет этого электроны ускоряются до значительных скоростей и большая их часть проходит через отверстие в аноде 2, а далее в заанодном пространстве они движутся по инерции.

Чтобы из такого электронного потока сформировать электронный луч с необходимыми характеристиками, применяют фокусирование. Для этого в электронной пушке используется система **диафрагм и магнитных линз**. Магнитная линза 3 представляет собой соленоид с магнитопроводом, создающий магнитное поле специальной формы, которое при взаимодействии с движущимся электроном смещает его траекторию в

направлении оси системы. За счет этого можно добиться “сходимости” электронов на малой площади поверхности, т.е. сфокусировать электронный луч. При этом в фокусе электронный луч может обладать высокой **плотностью энергии** ($5 \cdot 10^{12} \text{ Вм} / \text{м}^2$).

Перемещают электронный луч по обрабатываемой поверхности за счет его взаимодействия с поперечным магнитным полем, создаваемым отклоняющей системой 4. Обычно используют две пары отклоняющих катушек для перемещения луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В рабочем пространстве электронной пушки должен быть обеспечен высокий вакуум ($10^{-3} - 10^{-4} \text{ Па}$), чтобы молекулы остаточных газов не мешали свободному прохождению электронов.

Электронная пушка выполняется в виде функционального блока, который или неподвижно крепится к рабочей камере 5, или перемещается внутри нее с помощью специальных механизмов.

Обрабатываемая заготовка 6 помещается в рабочую камеру 5. Откачка воздуха из пушки и рабочей камеры производится системой вакуумных насосов 7. При площади обработки 10×10 мм заготовка остается неподвижной, а требуемые перемещения осуществляет электронный луч. Когда зона обработки больше, то необходимые перемещения сообщаются заготовке с помощью специальных механизмов.

3.1.2 Получение свободных электронов

Свободный, не связанный с атомом, электрон можно получить, если сообщить атому избыточную энергию, поглощая которую электрон переходит на более удаленные от ядра орбиты и может потерять связь с ядром. Это происходит при нагреве металлов, которые начинают испускать **термоэлектроны**.

Процесс выхода термоэлектронов с поверхности твердых тел за счет их нагрева получил название **термоэлектронной эмиссии**.

3.1.3 Ускорение электронов

Для сообщения электронам необходимой энергии и формирования из них потока частиц наиболее часто используется метод ускорения электронов электрическим полем.

На электрон, находящийся в электрическом поле, действует электростатическая сила

$$F = eE, \quad (3.1)$$

где $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона;

E - напряженность поля.

При движении в электрическом поле с разностью потенциалов U под действие силы F электрон приобретает энергию

$$W = eU. \quad (3.2)$$

Это приращение энергии электрона происходит за счет увеличения кинетической энергии (скорости) его движения

$$eU = \frac{m_e(V^2 - V_0^2)}{2}, \quad (3.3)$$

где $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ - масса электрона;

V - конечная скорость электрона;

V_0 - начальная скорость электрона.

Принимая $V_0 = 0$, получаем

$$eU = \frac{m_e V^2}{2}. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) можно получить выражение скорости движения электрона при прохождении разности потенциалов U

$$V = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}. \quad (3.5)$$

Подставляя в последнее выражение значения заряда и массы электрона, получаем

$$V = 593,2\sqrt{U}, \quad (3.6)$$

где скорость V выражается в км/с ; а напряжение U в В .

3.1.4 Управление электронным лучом

Для управления электронным лучом применяют электростатические или магнитные поля. Обычно используются магнитные системы фокусировки и управления перемещением луча.

На движущийся в магнитном поле электрон действует сила

$$F = BVe \sin \alpha, \quad (3.7)$$

где B - магнитная индукция;

V - скорость движения электрона;

α - угол между вектором скорости движения электрона и магнитной силовой линией поля;

$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона.

Под действием этой силы электрон будет двигаться в магнитном поле по окружности, перпендикулярной силовым линиям поля. При этом траектория движения электрона под действием магнитного поля и инерционных сил выглядит в виде спирали, радиус которой зависит от начальной скорости электрона и напряженности магнитного поля.

Путем создания по оси электронного луча магнитного поля определенной формы - **магнитной линзы**, можно обеспечить сходимости траекторий электронов в одной точке, т.е. фокусировку. Изменяя положение этой точки по вертикали к обрабатываемой поверхности, можно менять концентрацию энергии на заготовке.

Для перемещения электронного луча по обрабатываемой поверхности используют его взаимодействие со скрещенными поперечными магнитными полями, создаваемыми отклоняющей системой. Благодаря малой массе электронов, можно перемещать электронный луч по обрабатываемой поверхности в широком диапазоне скоростей при практически любой форме траектории.

Получить электронный луч можно только в вакууме. Иначе в электронной пушке резко возрастает число ионизированных молекул остаточных газов, что может вызвать пробой промежутка между катодом и анодом.

3.1.5 Взаимодействие электронного луча с веществом

При встрече потока электронов с обрабатываемым веществом их кинетическая энергия превращается в другие виды.

Мощность, или **плотность потока энергии**, электронного пучка в месте его встречи с обрабатываемым материалом определяется

$$P = U \cdot I_n \cdot \eta, \quad (3.8)$$

где U - ускоряющее напряжение;

I_n - сила тока луча;

η - эффективный КПД нагрева.

Тогда **удельная поверхностная мощность** луча в зоне его воздействия на вещество будет равна

$$P_0 = \frac{P}{S}, \quad (3.9)$$

где S - площадь сечения луча на поверхности вещества.

Величина P_0 - одна из важнейших энергетических характеристик электроннолучевых процессов и в значительной мере определяет возможности электроннолучевой технологии. Так при максимальном значении P_0 , равном $10^{12} - 10^{13} \text{ Вт/м}^2$ проводят размерную обработку материалов за счет их локального испарения в месте воздействия луча на заготовку. При меньших значениях P_0 , что осуществляется расфокусировкой луча, проводят плавку, сварку, нагрев в вакууме.

Движущиеся электроны пучка достигая обрабатываемой поверхности внедряются в вещество и тормозятся там, проходя некоторый путь. Длина этого пути l в метрах определяется по следующей эмпирической формуле

$$l = \frac{2,1 \cdot 10^{-8} U^2}{\rho}, \quad (3.10)$$

где ρ - плотность вещества, $кг / м^3$;

U - ускоряющее напряжение, кВ.

Торможение электрона в веществе сопровождается следующими основными явлениями:

собственно нагревом поверхности, используемым в технологических целях;

тормозным рентгеновским излучением, возникающем при электронной бомбардировке материалов;

вторичной электронной эмиссией, отражением электронов и термоэлектронной эмиссией с обрабатываемой поверхности.

Нагрев обрабатываемого материала электронным лучом осуществляется за счет выделения энергии в поверхностных слоях вещества и дальнейшей теплопередачи во внутренние слои. При электроннолучевой обработке, благодаря высокой интенсивности ввода энергии в вещество на обрабатываемой поверхности развиваются температуры, превышающие точку кипения тугоплавких материалов.

Съем материала с обрабатываемой поверхности за счет его испарения и взрывного вскипания лежит в основе размерной электроннолучевой обработки.

При электронной бомбардировке вещества часть его атомов возбуждается и испускает **тормозное рентгеновское излучение**, суммарная доля которого в общем балансе выделяемой энергии P_g составляет

$$\eta_x = \frac{P_x}{P_g} = 4,4 \cdot 10^{-7} Z \cdot U, \quad (3.11)$$

где P_x - мощность рентгеновского излучения;

Z - атомный номер элемента;

U - ускоряющее напряжение, кВ.

Для повышения безопасности необходимо ограничивать ускоряющее напряжение до минимального уровня, достаточного для решения данной технологической задачи.

Падающий на заготовку электронный поток вызывает вторичную электронную эмиссию с обрабатываемой поверхности и термоэлектронную эмиссию из разогретой зоны обработки.

3.2 Основные технологические процессы электроннолучевой обработки

3.2.1 Особенности электронного луча как технологического инструмента

Основными достоинствами электроннолучевой обработки с технологической точки зрения являются:

- возможность за счет фокусировки луча плавно изменять в широких пределах удельную энергию в зоне нагрева;

- большая мощность в месте взаимодействия электронного луча с обрабатываемой заготовкой;

- простота управления пространственным положением луча с помощью магнитной системы;

- малая зона воздействия электронного луча на обрабатываемый материал.

Недостатки:

- необходимость обеспечения высокого вакуума, наличие рентгеновского излучения;
- сложность изготовления, высокая стоимость и необходимость в высококвалифицированном персонале.

Основные технологические операции электроннолучевой обработки делятся на три группы:

- **плавление** (технологические процессы локального переплава, плавка в вакууме, сварка);
- **испарение** (испарение в вакууме, размерная электроннолучевая обработка);
- **термообработка** без изменения агрегатного состояния вещества.

3.2.2 Локальный переплав

Позволяет получать очень высокие скорости кристаллизации металла в зоне плавления. Образующиеся при этом структуры значительно отличаются от структур, получаемых в обычных условиях. Расширяются границы растворимости для твердых растворов, измельчается микроструктура, повышаются пластичность и твердость. Быстрое остывание расплавленного металла приводит к последующей дополнительной закалке, что повышает износостойкость поверхности.

3.2.3 Электроннолучевая плавка

Применяется, когда необходимо выплавлять особо чистые металлы, в том числе химически активные. Плавка электронным лучом позволяет получать более высокий перегрев жидкого металла в ванне. Это позволяет наиболее полно производить дегазацию металла, отгонку летучих примесей.

На рисунке 3.2 приведены варианты схем плавки электронным лучом 5, создаваемым пушками 4. Слиток 1 вытягивается из тигля 2 с заданной скоростью и через вакуумный шлюз удаляется из рабочей камеры. Переплавляемый металл может подаваться в виде бруса (штабика) 3 (рисунок 3.2а) или порошка, гранул, кусочков 3 (рисунок 3.2б). Применение электроннолучевой плавки удобно для выращивания монокристаллов по схеме Чохральского (рисунок 3.2в), когда на затравку 6 наплавляется материал из тигля 2, и она вытягивается с заданной скоростью вертикально вверх.

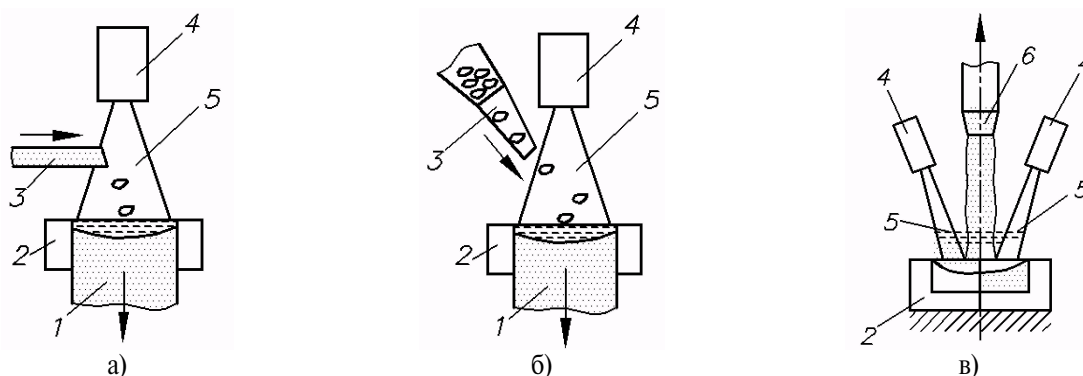


Рисунок 3.2 – Варианты схемы плавки электронным лучом:

а – переплавляемый металл в виде бруса (штабика); б – переплавляемый металл в виде порошка, гранул, кусочков; в – выращивание монокристаллов по схеме Чохральского; 1 – слиток; 2 – тигель; 3 – переплавляемый металл; 4 – электронная пушка; 5 – электронный луч; 6 – затравка

Иногда необходимо осуществлять многократный переплав материала. Для этого переплавляемый материал 1 (рисунок 3.3) входит в зону действия кольцевой

электроннолучевой пушки 2, которая воздействует электронным лучом 3 на материал, производя его локальный переплав. Материал после выхода из зоны плавки 5 кристаллизуется, образуя слиток 4 с лучшими характеристиками. Этот метод применяется для выращивания монокристаллов германия, кремния и вольфрама.

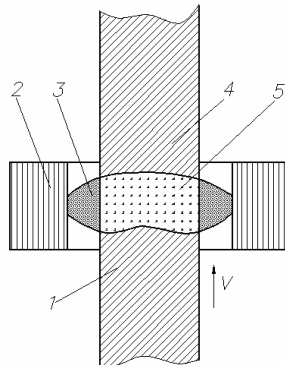


Рисунок 3.3 – Схема зонной плавки материала электронным лучом:
1 – переплавляемый материал; 2 – электронный луч; 4 – слиток; 5 – зона плавки

3.2.4 Электроннолучевая сварка

Данная операция представляет собой самое распространенное технологическое применение электронного луча.

За счет фокусировки луча можно в широких пределах изменять величину удельной поверхностной мощности. При ее небольших значениях форма проплавления имеет такой же характер, как и при газовой и дуговой сварке (рисунок 3.4а). При увеличении удельной поверхностной мощности начинается интенсивное испарение металла. Это приводит к деформации жидкого металла под действием реакции паров и получению швов с глубоким проплавлением (рисунок 3.4б). Проплавление такого вида называют «кинжальным».

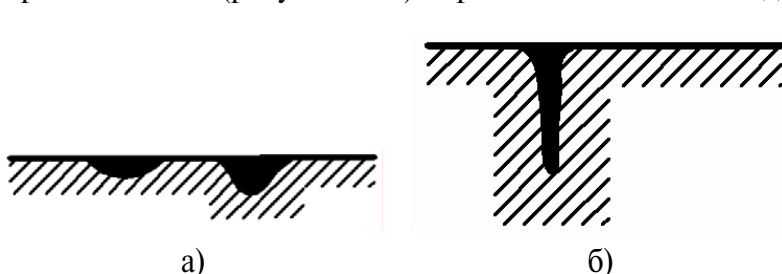


Рисунок 3.4 – Форма проплавления при электроннолучевой сварке:
а – при небольшой удельной поверхностной мощности электронного луча P_0 ; б – при больших значениях P_0 («кинжальное» проплавление)

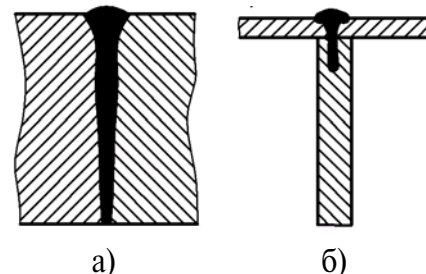


Рисунок 3.5 – Примеры использования «кинжального» проплавления для соединения различных конструкций:
а – для сварки за один проход без разделки кромок; б – получение сварного соединения принципиально новой формы на тонкостенных заготовках

Оно дает возможность за один проход сваривать заготовки толщиной до 100 мм (рисунок 3.5а). Глубокое проплавление позволяет получать сварные соединения принципиально новой формы (рисунок 3.5б).

Вакуум как защитная среда при сварке обеспечивает более высокие показатели свойств сварного шва, чем при сварке в среде защитных газов. Поэтому сварные конструкции из вольфрама, молибдена, титана, тантала, циркония и др., изготавливаются в основном с помощью электроннолучевой сварки (рисунок 3.6). Простота управления электронным лучом позволяет сваривать материалы, свойства которых различны (металл и керамику или металл и графит).

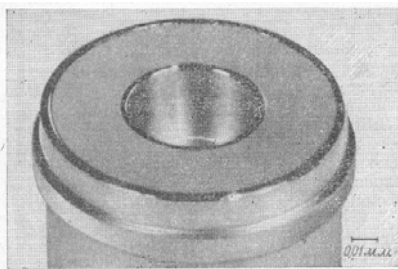


Рисунок 3.6 – Фотография узла, в котором вольфрамовое кольцо сварено с молибденовым цилиндром

Из-за малого объема ванны расплавленного металла при электроннолучевой сварке, снижаются деформации свариваемых элементов конструкции. Это позволяет сваривать окончательно обработанные детали.

Сварку электронным лучом применяют при изготовлении толстостенных конструкций, так как за один проход можно получить проплавление глубиной до 200–300 мм.

Для экономии дорогостоящих инструментальных сталей применяют электроннолучевую сварку при производстве заготовок для ленточных пил (рисунок 3.7). Лента 2 шириной 1-3 мм из инструментальной стали сваривается с материалом полотна 1, выполненного из менее дорогого материала. При последующей нарезке корни 3 зубьев доводятся до зоны более вязкого металла, что снижает выкрашивание зубьев при эксплуатации.

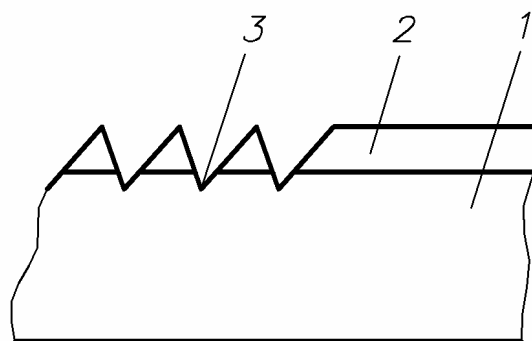


Рисунок 3.7 – Применение электроннолучевой сварки при изготовлении ленточных пил:
1 – материал полотна из конструкционной стали; 2 – лента из инструментальной стали; 3 – корни зубьев при нарезке

Электронным лучом в вакууме сваривают различные герметичные мембранные узлы для измерения давления (анероидные коробки), а также корпуса микросхем, полупроводниковых приборов, реле и т.п.

3.2.5 Электроннолучевое испарение материалов

Используется при нанесении тонких пленок. По сравнению с другими способами, при электроннолучевом испарении осуществляется прямой нагрев поверхности материала. Это позволяет испарять материалы из водоохлаждаемых тиглей.

На рисунке 3.8 приведена принципиальная схема испарительной установки для нанесения покрытий. Испаряемый материал из бункера 5 по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, порциями поступает в охлаждаемый тигель 9.

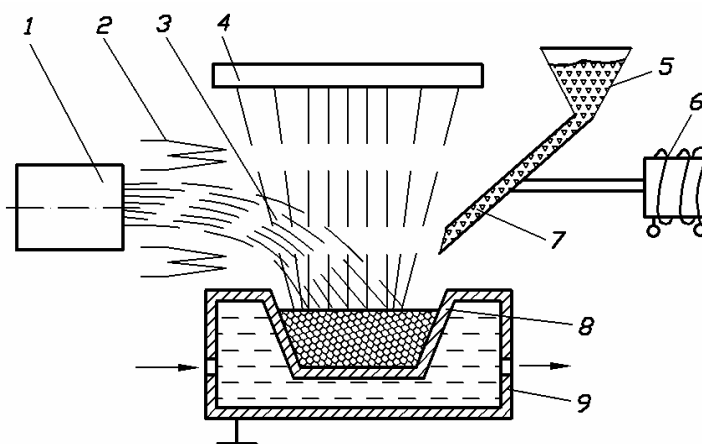


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема электроннолучевой установки для нанесения покрытий:
 1 – электронная пушка; 2 – отклоняющая система; 3 – электронный луч; 4 – подложка; 5 – бункер;
 6 – вибратор; 7 – желоб; 8 – испаряемое вещество; 9 – тигель

Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 1, посредством отклоняющей системы 2 искривляется в направлении испаряемого вещества 8. При воздействии электронного луча на поверхность материала он испаряется и частицы пара, поднимаясь вверх, оседают на поверхности подложки 4, образуя на ней плотную пленку.

Наличие вакуума в процессе испарения материалов позволяет получать особо чистые по составу пленки, а также повышает их адгезию с поверхностью подложки.

3.2.6 Размерная электроннолучевая обработка

Основана на том, что при достаточно большой удельной поверхностной мощности скорость испарения обрабатываемого материала и давление пара возрастают настолько, что весь жидкий металл с потоком пара выбрасываются из зоны обработки. Так в заготовках получают глухие и сквозные отверстия заданных размеров, а также обрабатывают на них контур с определенными допусками на его размеры.

Различают три режима размерной электроннолучевой обработки:

- моноимпульсный режим (обработка ведется одиночным импульсом, т.е. когда отверстие получают за время действия только одного импульса);
- многоимпульсный режим;
- режим обработки с перемещением электронного луча по заготовке с заданной скоростью.

Параметры электроннолучевой обработки связаны с физическими характеристиками материала заготовки (температурой плавления, теплоемкостью, удельной теплотой испарения) и не зависят от его механических свойств (твердости, прочности, пластичности). Поэтому, электронный луч применяется для размерной обработки твердых материалов - алмазов, кварца, керамики, кристаллов кремния и германия.

Образование полостей с помощью электроннолучевой размерной обработки ведут в многоимпульсном режиме при длительности импульса $\tau_u = 10^{-3} - 10^{-7} \text{ с}$ и их скважности $q = 100 - 200$. В паузах между импульсами материал в зоне обработки успевает охладиться до температуры, близкой к начальной температуре заготовки и общий ее нагрев оказывается невелик. С увеличением числа импульсов глубина обрабатываемой полости растет по логарифмической зависимости. Поэтому размерную электроннолучевую обработку ведут на глубину не более 15 – 20 мм.

Кромки на входе отверстия, полученного электроннолучевой обработкой имеют плавное скругление, а его диаметр по глубине уменьшается (рисунок 3.9).

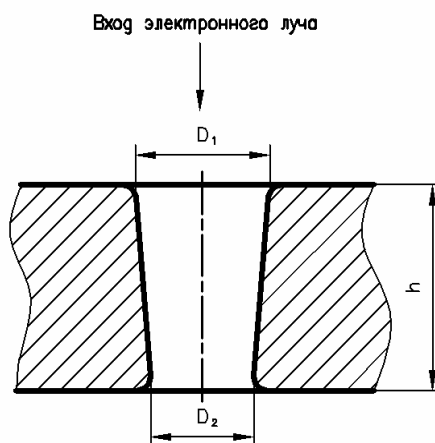


Рисунок 3.9 – Форма продольного сечения сквозного отверстия, полученного электроннолучевой обработкой

Такая форма отверстия благоприятна для работы алмазных волоочильных фильер, часовых камней. При глубине реза h до 5 мм обеспечивается уклон стенок меньше 1° .

В фокальной плоскости электронный луч может иметь диаметр менее 1 мкм, а минимальная ширина реза составляет 5–10 мкм.

Технологическим достоинством этого процесса является возможность перемещения электронного луча с помощью отклоняющей системы. Это позволяет вместе с модуляцией мощности луча обрабатывать отверстия сложных профилей, получать на поверхности заготовок канавки различной формы, гравировать клише для глубокой печати. Траектория перемещения электронного луча задается в виде электрических сигналов на отклоняющей системе.

Способ обработки электронным лучом пригоден для очень твердых материалов (рисунок 3.10).

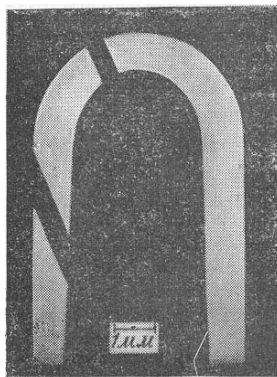


Рисунок 3.10 – Фотография наклонных отверстий диаметром 0,5 мм, полученных электроннолучевой обработкой в закаленной стальной плоской трубе

Аналогично обрабатывают кварцит, графит или керамику.

Особая разновидность размерной электроннолучевой обработки - **перфорация**, т.е. получение множества мелких сквозных отверстий. Перфорацией изготавливают металлические и керамические элементы фильтров, пористый материал. Производительность перфорации зависит от мощности электронного луча и толщины заготовки и достигает 10^5 отверстий в секунду (рисунок 3.11).

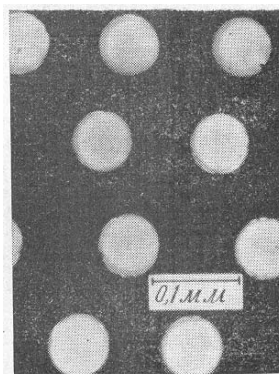


Рисунок 3.11 – Фотография отверстий диаметром 0,07 мм, полученных в фольге из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм, способом электроннолучевой перфорации

Благодаря короткому промежутку времени воздействия тепла в зоне обработки, его влияние на периферийные области оказывается незначительным, что позволяет применять электронный луч для перфорирования тонких листов из пластмассы.

На рисунке 3.12 приведен элемент дифракционной решетки, полученный с помощью электронного луча. Заготовка в процессе обработки остается неподвижной, а требуемые перемещения луча осуществляются заданной программой.

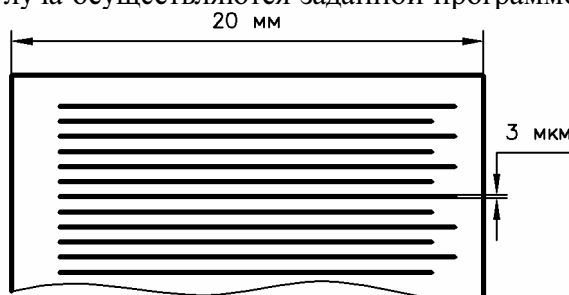


Рисунок 3.12 – Элемент дифракционной решетки, изготовленной из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, полученный с помощью электроннолучевой размерной обработки

Для производства искусственных волокон широко применяются фильеры, изготовленные из различных твердых сплавов, керамики. Они изготавливаются диаметром до 50 мм при толщине 1-3 мм и могут содержать до 500 отверстий. Отверстия в фильерах могут иметь сложную форму поперечного сечения (рисунок 3.13). Каждое отверстие получают перемещением луча, а переход от одного отверстия к другому перемещением рабочего стола с заготовкой.

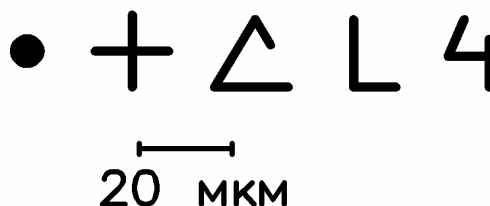


Рисунок 3.13 – Формы поперечного сечения отверстий в фильерах, полученных электроннолучевой обработкой

Благодаря простому управлению интенсивностью электронного луча, он пригоден для обработки напыленных слоев, когда лежащий под слоем материал не должен подвергаться никаким изменениям.

4 СВЕТЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

В 1917г. А. Эйнштейн, изучая равновесие между энергией атомных систем и их излучением, предположил, что световые волны строго определенной длины можно получить за счет **индуцированного**, т.е. вынужденного излучения атомов и молекул вещества. Это послужило основой для создания нового направления науки и техники - **квантовой электроники**, связанного с излучением электромагнитных колебаний оптического диапазона. Особую ценность представляет получение **когерентного** (монохроматического) света, т.е. световой волны строго определенной длины.

В 1960 г. был разработан первый образец **оптического квантового генератора (ОКГ)**, в котором в качестве рабочего тела был использован синтетический рубин.

4.1 Физические основы получения светолучевых источников энергии

4.1.1 Когерентное излучение и условия его получения

Обычный **полихроматический свет**, представляет собой набор волн с различной частотой. При распространении любой электромагнитной волны, в том числе и света, в пространстве создается электрическое поле напряженностью E и магнитное поле напряженностью H .

Значения этих величин в каждый момент времени t в некоторой точке пространства с координатой x описываются зависимостями

$$\begin{aligned} E &= E_0 \sin \left[2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi \right]; \\ H &= H_0 \cos \left[2\pi \left(\nu t - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi \right], \end{aligned} \quad (4.1)$$

где E_0 и H_0 - амплитуды волн;

ν - частота;

φ - фаза;

$\lambda = \frac{c}{\nu}$ - длина волны;

c - скорость света.

Если частота ν и длина волны λ не зависят от времени t , то волна монохроматична. Когда амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация электромагнитной волны постоянны во времени или изменяются по определенному закону, то такая волна **когерентна**.

Получить мощное когерентное световое излучение удалось, используя для генерации колебаний резонансные свойства отдельных атомов и молекул. При этом энергия относительного движения частиц, составляющих атом или молекулу, может принимать строго определенные значения энергии $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_k$ (рисунок 4.1), которые называются **уровнями энергии**, а система энергетических уровней составляет **энергетический спектр** атома. Нижний уровень с минимальной энергией ε_1 называется **основным**, а остальные - **возбужденными**. **Число атомов, обладающих данной энергией**, называется **населенностью уровня**.

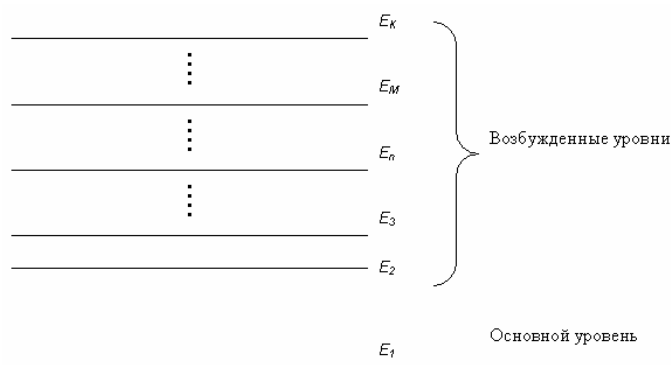


Рисунок 4.1 – Система энергетических уровней атома

Если атому, находящемуся на основном уровне ε_1 , сообщить энергию, то он может перейти на один из возбужденных уровней. Если возбужденный атом самопроизвольно переходит на один из нижележащих уровней, то при этом он излучает определенную порцию энергии в виде фотона. Если излучение происходит при переходе атома с уровня ε_m на уровень ε_n (рисунок 4.1), то частота излучаемого фотона (в Гц)

$$\nu_{mn} = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{h}, \quad (4.2)$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка.

Подобные процессы излучения происходят в нагретых телах. Кванты света хаотически испускаются атомами в виде так называемых **волновых цугов**, которые не согласованы друг с другом во времени (имеют различную фазу), а поэтому спонтанное излучение не когерентно.

Кроме спонтанного излучения возбужденного атома может происходить **индуцированное** (вынужденное) **излучение**, когда атомы начинают излучать энергию под действием внешнего электромагнитного поля.

Требования для получения когерентного излучения:

1. **Резонанс** - совпадение частоты падающего света с одной из частот ν_{mn} энергетического спектра атома. При этом переход с верхнего уровня ε_m на нижний уровень ε_n будет соответствовать переходу между теми же уровнями других атомов.

2. Одновременно с вынужденным излучением света атомами, находящимися на верхнем уровне ε_m происходит резонансное поглощение энергии атомами, находящимися на нижнем уровне ε_n . При этом атом, переходя на более высокий уровень ε_m , поглощает световой квант, что препятствует генерации. Для генерации когерентного света необходимо, чтобы **число атомов на верхнем уровне ε_m было больше числа атомов на нижнем уровне ε_n** . В естественных условиях на более высоком энергетическом уровне всегда находится меньше частиц, чем на более низком. Поэтому необходимо, чтобы из двух выбранных уровней верхний был населен больше, чем нижний. Такое состояние вещества называется **активным** или состоянием с **инверсной** (обращенной) **населенностью**.

3. В процессе генерации **часть излучаемой световой энергии должна все время оставаться внутри рабочего вещества**, вызывая вынужденное излучение все новых атомов. Это требование выполняется с помощью зеркал, одно из которых отражает всю падающую на него энергию, а второе является полупрозрачным: часть энергии оно пропускает (полезная энергия), а часть отражает. Отраженная часть служит для вовлечения в генерацию новых порций рабочего вещества.

4. **Усиление, даваемое рабочим веществом должно превышать некоторое пороговое значение**, зависящее от коэффициента отражения полупрозрачного зеркала. Чем меньше

этот коэффициент, тем больше должно быть пороговое усилие рабочего вещества, иначе колебания в рабочем веществе затухнут.

4.1.2 Основные схемы ОКГ

В любом ОКГ присутствуют следующие основные элементы:

- **рабочее тело** (вещество), для которого может быть создана инверсия населенностей;
- система, позволяющая осуществлять инверсию - **система накачки**;
- **оптический резонатор**, в котором происходит отбор генерируемой энергии;
- устройство для вывода энергии из резонатора;
- система управления концентрацией энергии и пространственным положением полученного пучка света.

Для создания инверсии населенности в ОКГ применяют следующие виды накачки:

- **оптическую накачку** за счет облучения вещества мощным световым потоком;
- **электрическую накачку**, при прохождении через вещество электрического тока;
- **химическую накачку**, за счет химической реакции, в которой принимает участие рабочее вещество.

В зависимости от типа рабочего вещества ОКГ разделяют на твердотельные, газовые, жидкостные и полупроводниковые.

Твердотельные ОКГ (в качестве рабочего вещества используют твердые тела, в частности, синтетический рубин, иттриево-алюминиевый гранат, неодимовое стекло).

Синтетический рубин генерирует когерентное излучение в видимой части спектра (красный свет).

Иттриево-алюминиевый гранат (ИАГ) -генерирует излучение в инфракрасной части спектра.

Стержень 2 (рисунок 4.2), изготовленный из рабочего вещества, помещается между двумя зеркалами 1 и 3. Зеркало 1 полностью отражает падающие на него лучи, а зеркало 3 является полупрозрачным. Для накачки энергии используется газоразрядная лампа - вспышка 4, которая для наибольшей эффективности облучения стержня помещается вместе с ним внутрь отражающего кожуха 5, имеющего в поперечном сечении форму эллипса. При размещении лампы-вспышки и стержня в фокусах эллипса создаются наилучшие условия для равномерного освещения рабочего тела. Питание лампы-вспышки осуществляется от специальной высоковольтной батареи конденсаторов 6.

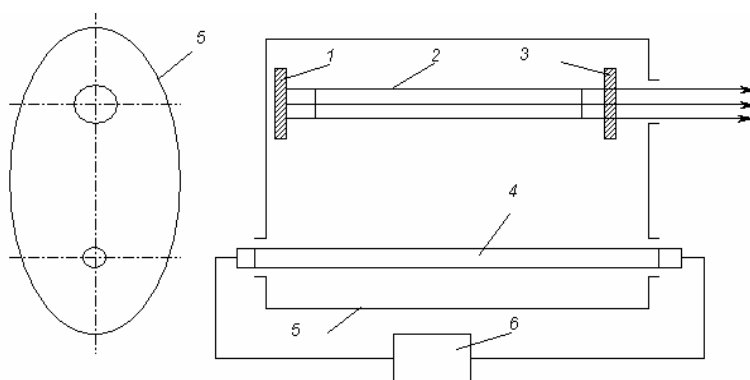


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема твердотельного ОКГ:

1 – зеркало; 2 – стержень из рабочего вещества; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – газоразрядная лампа-вспышка; 5 – отражающий кожух; 6 – батарея высоковольтных конденсаторов

Не вся энергия, поглощенная стержнем, превращается в энергию излучения ОКГ 40-70% превращается в теплоту. В результате нагрева рабочего тела изменяются энергетические уровни оптически активных атомов и по достижении критической температуры генерация когерентного излучения прекращается. Кроме того в стержне

возникают термические напряжения. Поэтому в твердотельных ОКГ предусматривается охлаждение рабочего тела воздухом, водой.

При разряде батареи конденсаторов лампа дает интенсивную вспышку полихроматического света. Это излучение воздействует на активные атомы оптического резонатора, которые поглощая энергию накачки, возбуждаются и затем при переходе на низшие энергетические уровни генерируют собственное излучение.

Начавшееся в рабочем теле ОКГ излучение распространяется по всему объему стержня-резонатора и из-за многократного отражения от зеркал, вовлекает в процесс когерентного излучения все оптические атомы. Часть когерентного излучения выходит через полупрозрачное зеркало из резонатора. Диаметр выходящего светового пучка примерно равен диаметру резонатора, а удельная плотность потока энергии в пучке невелика. Для ее увеличения осуществляют фокусировку луча.

Газовые ОКГ. В качестве рабочего тела используются газообразные вещества, а накачка осуществляется за счет прохождения электрического тока через газ. В качестве активных газов применяют аргон, неон, криптон, ксенон, смеси гелия и неона, углекислый газ с примесью азота и гелия.

Все газовые ОКГ подразделяются на три группы: лазеры на атомных, ионных и молекулярных переходах.

Примером **атомного** лазера является гелиево-неоновый ОКГ (рисунок 4.3). Газоразрядная трубка 1 заполняется гелием и неоном под давлением. От источника высокого напряжения 2 в трубке создается высоковольтный электрический разряд 3, который возбуждает атомы гелия и неона за счет соударения с электронами. Излучение выходит через полупрозрачное зеркало 4. Генерируемые при этом волны лежат в видимой и инфракрасной частях спектра. Этот ОКГ имеет небольшую мощность, но простое устройство и надежность.

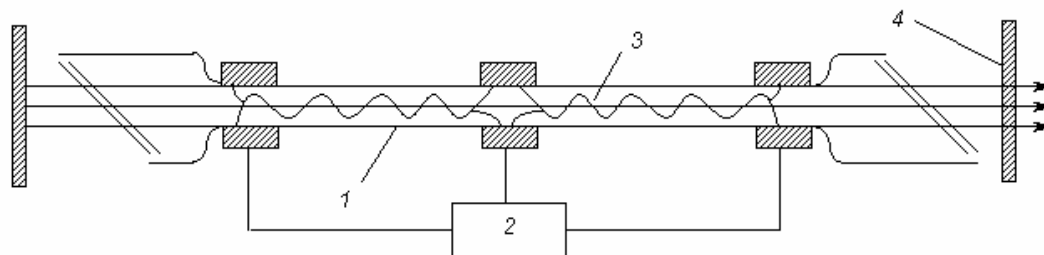


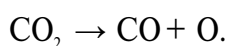
Рисунок 4.3 – Принципиальная схема газового гелиево-неонового ОКГ:

1 – газоразрядная трубка, заполненная гелием и неоном; 2 – источник высокого напряжения; 3 – электрический заряд; 4 – полупрозрачное зеркало

В **ионных** газовых ОКГ используются переходы между энергетическими уровнями ионов благородных газов (ксенона, аргона, неона, криптона). Типичным представителем этой группы является аргоновый лазер. Отличие по конструкции от гелиево-неонового ОКГ состоит в том, что газоразрядная трубка заполняется аргоном под давлением в несколько десятков паскалей. Мощность ОКГ этой группы выше. Газовый ОКГ на аргоне генерирует излучение в видимой сине-зеленой части спектра.

Наибольшую мощность и КПД имеют ОКГ, генерирующие колебания на **молекулярных** переходах (ОКГ на основе углекислого газа). Молекулы CO_2 , возбуждаются ударами электронов в газовом разряде, причем для увеличения мощности добавляют молекулярный азот. При этом происходит резонансная передача энергии от возбужденных молекул N_2 молекулам CO_2 .

В газовом разряде часть молекул диссоциируют по схеме



Продукты диссоциации снижают эффективность генерации и уменьшают мощность ОКГ. Поэтому мощные лазеры работают при непрерывной подаче свежего газа и требуют интенсивного охлаждения рабочей газовой смеси.

На рисунке 4.4 приведена схема ОКГ на CO_2 . Электрический разряд возбуждается в охлаждаемой стеклянной газоразрядной трубке 3. Разряд возбуждается между электродами 1 с помощью высоковольтного источника питания 2. Излучение выводится через окно 4 из материала, пропускающего инфракрасные лучи.

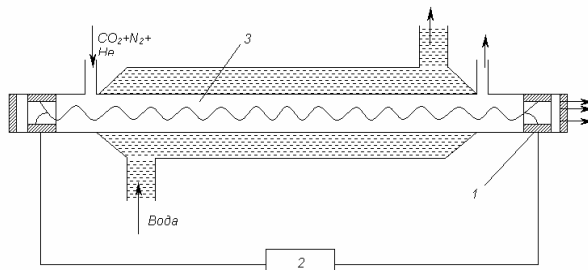


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема газового ОКГ на CO_2 :

1 – электроды; 2 – высоковольтный источник питания; 3 – охлаждаемая стеклянная газоразрядная трубка

При схеме ОКГ с продольной прокачкой газа с 1 м длины резонатора можно снимать мощность не более 50 Вт, а для получения большей мощности приходится значительно увеличивать длину трубы резонатора. Для уменьшения габаритов ОКГ, используют многотрубные системы (рисунок 4.5). Луч с помощью зеркал 1 последовательно проходит через все трубки 2. Однако при большом количестве зеркал резко возрастают потери, поэтому более 15 трубок не применяют.

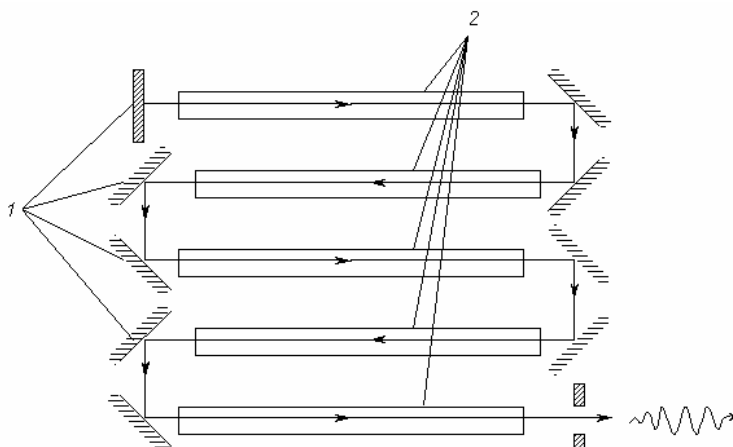


Рисунок 4.5 – Схема газового ОКГ с многотрубной системой:

1 – зеркала; 2 – трубки

Большой мощностью обладают лазеры на CO_2 , в которых используются системы с поперечной относительно направления электрического тока прокачкой газа (рисунок 4.6). При этом применяют интенсивную прокачку газа 1 через объем резонатора 2 с охлаждением его в теплообменнике 3. Электрический разряд возбуждается между анодной плитой и секционированным катодом. Статическое давление в разрядной камере 5-8 кПа. Расход газовой смеси составляет 2-3 $\text{м}^3/\text{с}$. Электроразрядные лазеры с поперечной прокачкой газа работают в непрерывном режиме генерации и развивают мощность до 50 кВт.

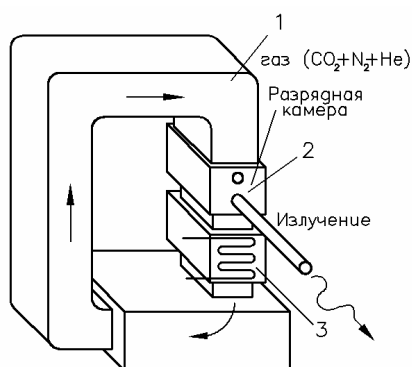


Рисунок 4.6 – Схема газового ОКГ с поперечной прокачкой газа

Полупроводниковые ОКГ. Они генерируют когерентное излучение за счет процессов, происходящих в р-n-переходе (рисунок 4.7). Верхняя часть 1 кристалла имеет проводимость р-типа, а нижняя 2 - n-типа. Между ними образован р-n- переход толщиной порядка 0,1 мкм. Излучающий слой имеет несколько большую толщину, около 1-2 мкм. Выводы 3 и 6 служат для подачи питающего напряжения, причем нижний выполняет и функцию теплоотвода.

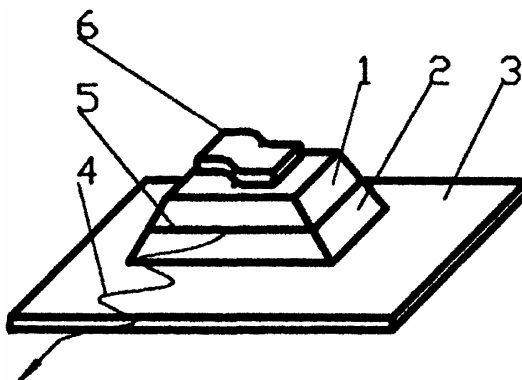


Рисунок 4.7 – Схема полупроводниковые ОКГ

При подаче на эти выводы напряжения р-n-переход генерирует излучение 4 в инфракрасной области спектра. Для других материалов длины генерируемых волн могут иметь другие значения.

Мощность излучения ОКГ в импульсно - периодическом режиме составляет 100 Вт, а в непрерывном режиме - 10 Вт.

4.1.3 Взаимодействие излучения ОКГ с обрабатываемым веществом

Отражение и поглощение излучения ОКГ. При падении на поверхность некоторая часть лучистой световой энергии поглощается обрабатываемым веществом, а другая его часть отражается от поверхности. Доля отраженной энергии зависит от длины волны излучения и состояния поверхности вещества. По сравнению с электронным лучом, КПД передачи энергии потоком света значительно меньше.

Энергия поглощенного веществом излучения передается электронам, а поэтому глубина проникновения световой энергии в вещество соответствует средней длине их пробега. Для большинства веществ это $(5-50) \cdot 10^{-3}$ мкм. Дальнейшая передача энергии из этой зоны в глубь вещества происходит за счет теплопроводности. В отличие от электронного луча энергия светового излучения при взаимодействии с веществом в основном превращается в тепло, а доля возникающего при этом рентгеновского излучения мала.

С увеличением плотности потока возрастает глубина проплавления, а начиная с некоторого его значения происходит испарение вещества. При дальнейшем повышении

концентрации световой энергии доля испаренного вещества начинает резко возрастать, и отдельные капли и частички вещества, за счет действия паров выбрасываются из зоны обработки. Повышение плотности лучистого потока до максимального значения, приводит к интенсивному испарению вещества при минимальном количестве жидкой фазы с выносом его в виде паров из зоны обработки.

При работе ОКГ в импульсном режиме, чем короче импульс при той же его энергии, тем меньшая её часть расходуется на теплопроводность. Поэтому процессы размерной обработки с помощью ОКГ осуществляют в импульсном режиме с минимальной длительностью импульса.

4.2 Технология светолучевой обработки материалов

4.2.1 Особенности ОКГ как технологического инструмента

Использование мощных ОКГ, имеет ряд технологических преимуществ:

1. Энергию в виде светового луча можно передавать на расстояние, в том числе и через прозрачную разделительную перегородку или по световоду.
2. Высокая концентрация энергии в пятне нагрева.
3. Возможность плавной регулировки плотности потока лучистой энергии в пятне нагрева за счет фокусировки луча.
4. Возможность получать как импульсы энергии малой длительности, так и непрерывное излучение.
5. Малые размеры (до нескольких мкм) зон обработки.
6. Возможность реализации технологического процесса в любой оптически прозрачной среде.

4.2.2 Лазерное плавление

Локальный переплав поверхностных слоев осуществляется для повышения твердости обрабатываемого материала. Нагрев излучением ОКГ до плавления поверхности заготовки и затем быстрое охлаждение и кристаллизация небольших объемов металла приводит к образованию структур, которые в обычных условиях получить нельзя.

Для чугуна и высокоуглеродистой стали осуществляют не сплошной поверхностный переплав, а создают зоны проплавления в виде отдельных линий, сеток, спиралей и т.д. Это позволяет эффективно сочетать прочность и пластичность основного материала (матрицы) с повышенной твердостью и износостойкостью переплавленных зон.

Лазерная сварка. Импульсные твердотельные ОКГ применяются для сварки малогабаритных деталей, где важно получать швы с минимальным разогревом материала. Используют как точечную, так и шовную сварку. Сварку импульсным ОКГ используют при изготовлении герметичных корпусов из тонколистовых материалов толщиной до 1 мм (рисунок 4.8). Из-за небольшого разогрева свариваемого изделия, лазерная сварка позволяет герметизировать корпуса, заполненные различными веществами, значительный нагрев которых может привести их в негодность.



Рисунок 4.8 – Сварка импульсным ОКГ при изготовлении герметичных корпусов

При герметизации с помощью лазерной сварки корпусов различных микросхем и полупроводниковых приборов процесс осуществляется в инертной среде, чаще всего в гелии, так как он затем используется и для контроля герметичности соединения.

Микросварка импульсным излучением с использованием твердотельных ОКГ применяется при монтаже навесных элементов в гибридных микросхемах, монтаже интегральных микросхем на платы, при сборке элементов радиоламп. На рисунке 4.9. приведены типичные формы соединений, получаемых лазерной микросваркой. Диаметр соединяемых проводников круглого сечения от 0,05 до 10 мм, а толщина плоских выводов - 0,03-0,5 мм.

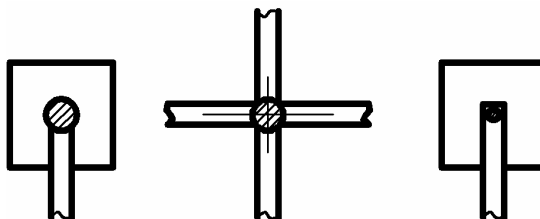


Рисунок 4.9 – Типичные формы соединений, получаемые лазерной микросваркой

С этой целью используется излучение ОКГ с длиной волны $\lambda < 1,06$ мкм прозрачное для стеклянного корпуса прибора.

С помощью мощных газовых ОКГ непрерывного излучения можно за один проход луча проплавливать металл на значительную толщину. Но при толщине > 200 мм требуется мощные ОКГ в сотни киловатт.

Лазерная сварка неметаллических материалов (стекло, керамика и др.) осуществляется за счет хорошего поглощения ими излучения с большой длиной волны. Так изготавливают стеклянные корпуса термометров.

4.2.3 Лазерная резка и размерная обработка

Процесс резки излучением ОКГ основан на локальном плавлении материала и его дальнейшем удалении под действием силы тяжести, конвективного потока или газовой струи.

Повысить эффективность лазерной резки можно за счет введения в зону обработки газа, например, кислорода, что увеличивает выделение энергии. На этом принципе основан процесс газолазерной резки ГЛР (рисунок 4.10).

При этом кислород:

- за счет реакции окисления обеспечивает выделение основной части энергии;
- увеличивает поглощающую способность материала за счет создания на его поверхности оксидов, имеющих меньший коэффициент отражения;
- снижает поверхностное натяжение расплавленных металлов, имеющих жидкотекучие оксиды;

— струя газа под давлением способствует удалению расплавленных оксидов из зоны реза;

— охлаждает кромки разрезанного металла.

Максимальная толщина заготовок при газолазерной резке составляет:

- низкоуглеродистая сталь - до 10 мм;
- легированные стали - до 6 мм;
- никелевые сплавы - до 5 мм;
- титан - до 10 мм.

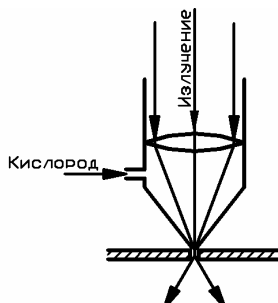


Рисунок 4.10 – Схема процесса газолазерной резки

Излучение ОКГ используется для прошивания отверстий в различных материалах, чаще всего с помощью импульсных твердотельных ОКГ за один или несколько импульсов. По сравнению с механической обработкой лазерное прошивание отверстий имеет ряд преимуществ:

- можно обрабатывать практически любые материалы независимо от их твердости;
- можно получать отверстия малых диаметров ($d < 0,1$ мм) с большим отношением глубины к диаметру;
- можно получать отверстия, ось которых наклонена под углом к обрабатываемой поверхности;
- повышается точность расположения отверстий на обрабатываемой заготовке благодаря высокой точности систем наведения луча.

Дно отверстия при лазерном прошивании формируется главным образом за счет испарения, а его боковые стенки - за счет плавления материала и вытекания жидкости при избыточном давлении паров в полости отверстия. Геометрическая форма отверстия зависит от места расположения фокального пятна относительно обрабатываемой поверхности заготовки. Максимальный диаметр отверстия находится у его входной части, а его глубина тем больше, чем выше энергия излучения.

Для получения глубоких отверстий малых диаметров осуществляют обработку на многоимпульсном режиме. По сравнению с электроннолучевым способом получения отверстий лазерное их прошивания является более производительным и экономичным.

Метод получения отверстий с помощью ОКГ применяется при изготовлении фильер, подшипников из кристаллических материалов, часовых камней (рисунок 4.11). Для этого используются твердотельные ОКГ, работающие в импульсном режиме. Профиль канала образуется за счет обработки алмаза с двух сторон с разным числом импульсов (со стороны входа число импульсов больше). Применение лазерного прошивания отверстий в часовых камнях из рубина позволило в сотни раз повысить производительность выполнения операции.

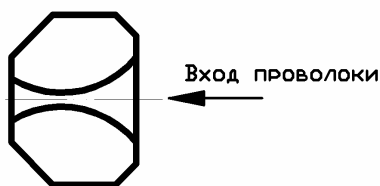


Рисунок 4.11 – Схема финишной операции при изготовлении часовых камней

5 ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Плазма может быть получена различными способами. Чаще всего её получают при электрофизических процессах - в электрическом дуговом разряде, высокочастотном электрическом поле, с помощью энергии лазерного излучения и т. д.

Плазма применяется в процессах требующих высокотемпературного концентрированного нагрева, при резке различных материалов, плазменном нанесении покрытий. Как правило используют так называемую «низкотемпературную» плазму с температурой $10^3 - 10^5$ К, которая представляет собой частично ионизированный газ.

5.1 Устройства для получения плазмы

Для получения плазмы, используемой в технологических целях, разработаны устройства, называемых **плазмотронами** или **плазменными горелками** (рисунок 5.1). Наиболее распространены плазмотроны, в которых нагрев газа до необходимой температуры осуществляется электрическим дуговым разрядом. Применяются также высокочастотные плазмотроны с так называемым «безэлектродным разрядом».

В дуговых плазмотронах плазма с требуемыми характеристиками может быть получена при различных видах взаимодействия дуги с плазмообразующим газом.

Стабилизация дуги в плазмотроне может осуществляться аксиальным потоком газа 1, создающим слой 2, ограничивающий столб дугового разряда (рисунок 5.1а). При тангенциальной подаче газа в дуговую камеру плазмотрона (рисунок 5.1б) стабилизация достигается за счёт вихревого потока 1 плазмообразующего газа. Эффективным способом стабилизации дугового разряда в плазмотроне и повышения его энергетических характеристик является ограничение диаметра столба дугового разряда охлаждаемой стенкой (рисунок 5.1в). Эта стенка выполняется в виде медного водоохлаждаемого сопла 1 небольшого диаметра, ограничивающего наружный диаметр дуги 2.

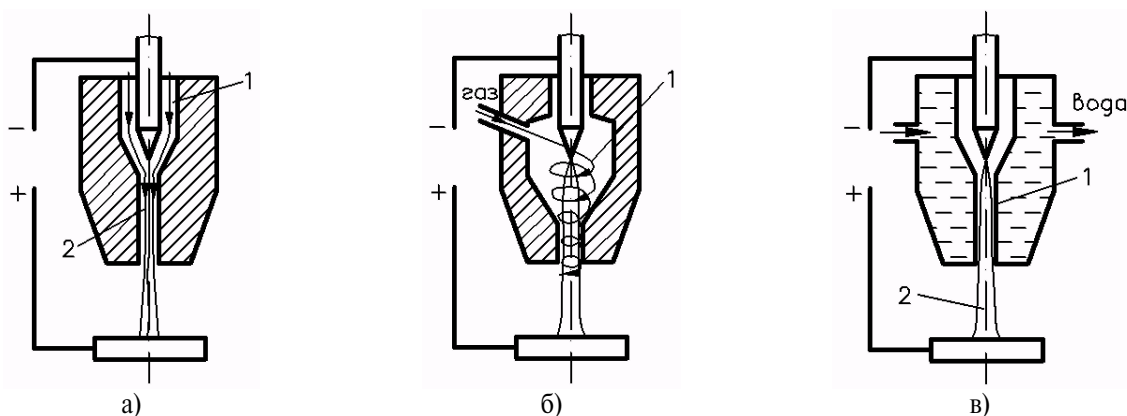


Рисунок 5.1 – Схемы плазмотронов с различными способами стабилизации дуги:

а – с применением аксиального потока газа; б – с применением тангенциального потока газа; в – с применением водоохлаждаемой стенки

Плазмообразующий газ в значительной степени определяет технологические возможности плазменной дуги. Широко применяются аргон, гелий, азот, водород, кислород и воздух.

5.2 Виды плазменных источников энергии

При нагреве плазмой деталей передача энергии может осуществляться или только за счёт процессов теплообмена нагретого газа с твёрдой или жидкой фазой (деталь

электрически не связана с источником питания), или за счёт суммарного действия теплообмена и электрического взаимодействия заряженных частиц плазмы с электродом-заготовкой. Тогда эффективность нагрева выше, но деталь при этом должна быть электропроводной.

Применяются три основных схемы плазмотронов (рисунок 5.2). В двух схемах (рисунок 5.2а, б) для получения плазмы используется **электрический дуговой разряд**, на рисунке 5.2в, нагрев газа и образование плазмы осуществляется за счёт **безэлектродного высокочастотного индукционного разряда**.

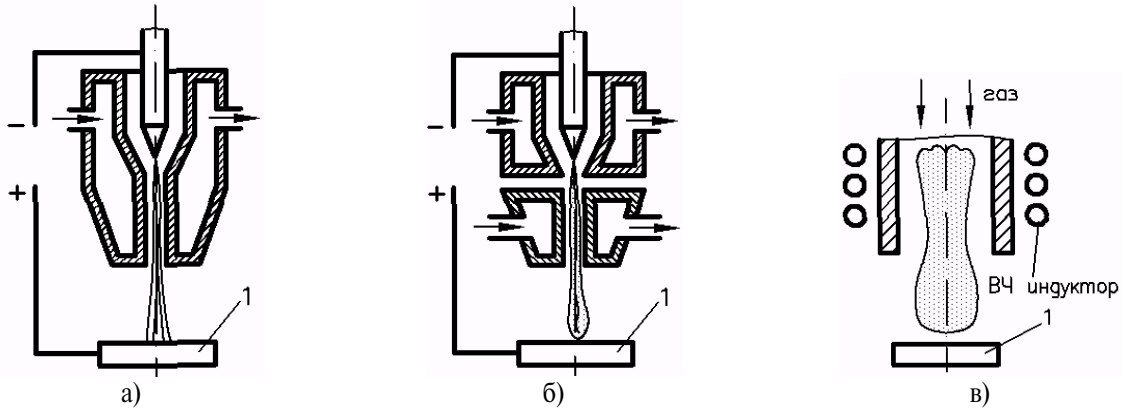


Рисунок 5.2 – Схема основных видов источников плазменной энергии:
а – плазмотрон прямого действия; б – плазмотрон косвенного действия; в – плазмотрон с использованием безэлектродного высокочастотного индукционного разряда

Схема на рисунке 5.2а, называется **плазменная дуга**, а плазмотрон для её получения - **плазмотрон прямого действия**. Если изделие 1 гальванически не связано с источником питания (рисунок 5.2б), то схема называется **плазменной струей**, а плазмотрон называется **плазмотроном косвенного действия**.

5.3 Характеристики плазменного источника энергии

Это **эффективная тепловая мощность**, определяющая отношение количества теплоты, вводимой в основной металл, ко времени и **коэффициент сосредоточенности**, определяющий распределение удельного теплового потока по поверхности обрабатываемого изделия.

Для плазменной дуги эффективная тепловая мощность

$$q = U \cdot I \cdot \eta_n, \quad (5.1)$$

где U - напряжение дуги;

I - сила тока;

η_n - эффективный КПД процесса плазменного нагрева, учитывающий потери энергии при передачи её к изделию.

На рисунке 5.3а показано распределение температуры для двух вариантов I и II плазменной дуги, а на рисунке 5.3б для плазменной струи по радиусу r и по длине L . Максимальная температура наблюдается в центре на оси плазменного потока, причём она ниже для открытой дуги. **Плотность теплового потока** для плазменных источников энергии достигает 10^6 Вт/см².

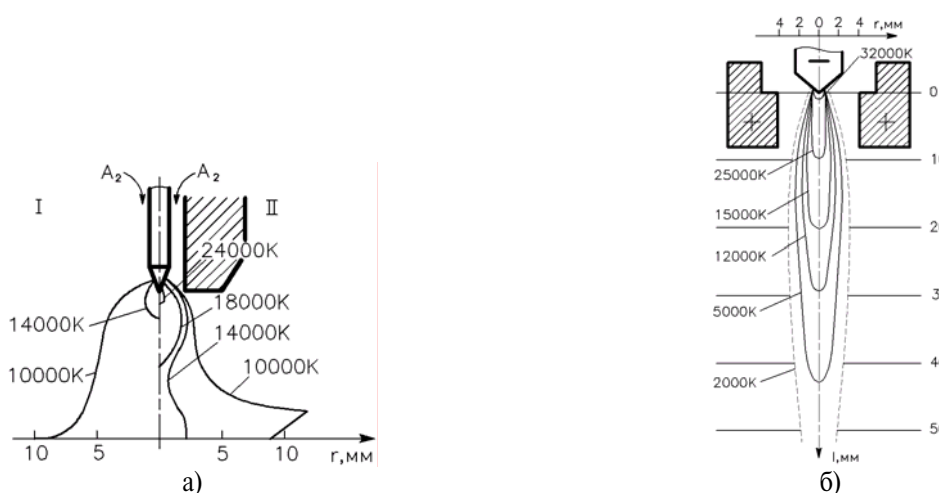


Рисунок 5.3 – Характер распределения температуры по радиусу r и длине L : а – для двух вариантов дуги; I – открытая дуга; II – плазменная дуга; б – для плазменной струи

Нагрев газа в плазмотроне приводит к резкому уменьшению его плотности, что вызывает увеличение скорости его истечения (рисунок 5.4).

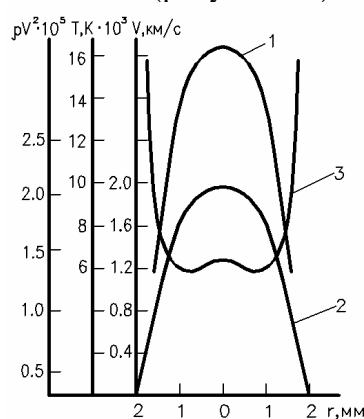


Рисунок 5.4 – Характер распределения скорости струи V (кривая 2), температуры T (кривая 1) и массового расхода газа ρV^2 (кривая 3) по радиусу r ее поперечного сечения

Большая скорость потока плазмы при выходе из плазмотрона позволяет получить значительный газодинамический напор, который возрастает с увеличением силы тока.

В потоке плазмы можно получить практически любое вещество в мелкокапельной или паровой фазе. Вместе с высокой температурой такие условия благоприятны для различных химических реакций, что позволяет получать в паровой фазе нитриды и карбиды, оксиды тугоплавких металлов, и неметаллы высокой чистоты.

5.4 Технологическое применение плазмы

5.4.1 Плазменный нагрев

Эффективен при плазменно-механической обработке металлов (при обработке резанием высокопрочных металлов и сплавов перед резцом 1 устанавливается плазмотрон 3, нагревающий узкую зону обрабатываемого материала 2 (рисунок 5.5)). При нагреве прочность обрабатываемого материала снижается а пластичность повышается, что облегчает условия резания.

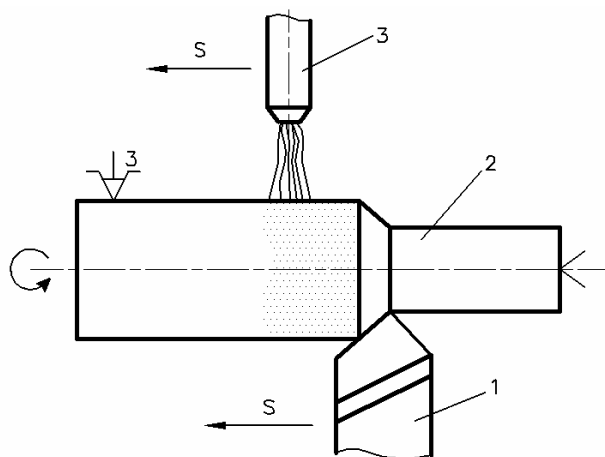


Рисунок 5.5 - Схема плазменно-механического точения труднообрабатываемых материалов:
1 – резец; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – плазменная горелка

Такой способ применяется при обработке жаропрочных сталей, сплавов на основе вольфрама и молибдена, что повышает производительность в 6-8 раз при уменьшении износа резцов в 5- 6 раз.

5.4.2 Плазменное плавление

Позволяет использовать различные среды и исходные материалы при минимальных потерях легирующих компонентов. Наиболее распространена схема печи для плавки в водоохлаждаемом кристаллизаторе (рисунок 5.6). Переплавляемый металл в виде штабика 1 подается в плазменную струю, создаваемую плазмотроном 2. Расплавленный металл попадает на водоохлаждаемый кристаллизатор 3, который, перемещаясь с заданной скоростью вниз, формирует слиток. В таких печах выплавляют инструментальные стали.

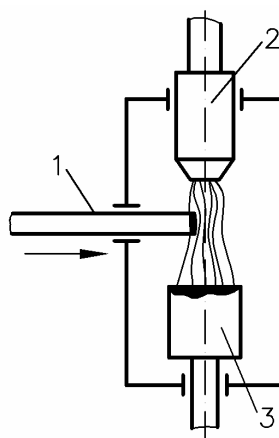


Рисунок 5.6 – Схема печи для плазменной плавки в водоохлаждаемый кристаллизатор:
1 – переплавляемый металл; 2 – плазмотрон; 3 – кристаллизатор

Плазменный нагрев используется для плавки металла с последующим измельчением расплава и кристаллизации его в виде малоразмерных капель. Полученный материал в дальнейшем применяют в порошковой металлургии, для наплавки и т.д. Измельчение металла чаще всего получают путём его разбрызгивания в расплавленном состоянии при вращении тигля 1 (рисунок 5.7). Попадая на холодные стенки кристаллизатора 2, капли жидкого металла затвердевают, и в виде гранул собираются на дне камеры.

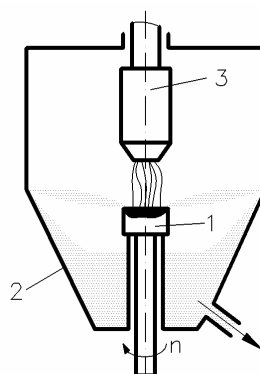


Рисунок 5.7 - Схема плазменной плавки металла с последующим измельчением расплава:
1 – вращающийся тигель; 2 – стенки кристаллизатора; 3 – плазмотрон

5.4.3 Плазменная сварка и наплавка

Плазменной сваркой за один проход сваривают детали толщиной до 20 мм, что позволяет повысить производительность процесса, уменьшить возникающие при сварке деформации.

Плазменная наплавка используется для нанесения на обрабатываемые заготовки поверхностных слоёв из металлов и сплавов, отличных по составу от материала подложки, что повышает их эксплуатационные характеристики. Толщина наплавленных за один проход слоёв достигает 4–5 мм. В качестве плазмообразующих газов используют аргон или водород.

5.4.4 Плазменное напыление

Отличается от наплавки тем, что напыленный материал нагревается в плазмотроне и затем осаждается на подложку. Две основных разновидности процесса:

- напыление металла, подаваемого в плазмотрон в виде прутка или проволоки (рисунок 5.8а);
- напыление материала, подаваемого в виде порошка (рисунок 5.8б).

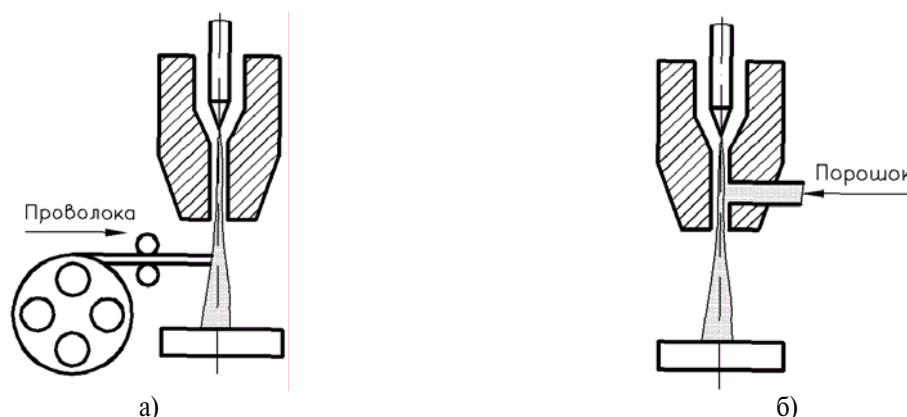


Рисунок 5.8 - Схемы плазменного напыления металла, подаваемого в плазмотрон:
а – в виде прутка или проволоки; б – в виде порошка

Плазменным напылением получают слои малой толщины (10^{-3} - 10^{-6} м). Прочность сцепления напыленного материала с основой может быть различной. Так можно получать **корковые** изделия, состоящие только из напыленного материала.

Одной из разновидностей процесса является **ионная технология нанесения покрытий с помощью плазменных ускорителей** (ионно-плазменное напыление) (рисунок 5.9).

Материал покрытия получают испарением в вакууме водоохлаждаемого катода 1. Затем его ионизируют в электрическом разряде и превращают в плазму 2. С помощью электрического поля полученная плазма ускоряется и фокусируется в поток по направлению к обрабатываемой поверхности 3. Значительная энергия ионов в плазме, позволяет глубоко внедрять их в обрабатываемые поверхности и получать благодаря этому прочные покрытия. Ионная технология позволяет получить покрытия сложного химического состава, которые образуются в результате плазмохимических реакций, протекающих при добавлении в ионные потоки металла различных газов (кислорода, ацетилена, азота). Это используется для увеличения срока службы металлорежущего инструмента и штампов.

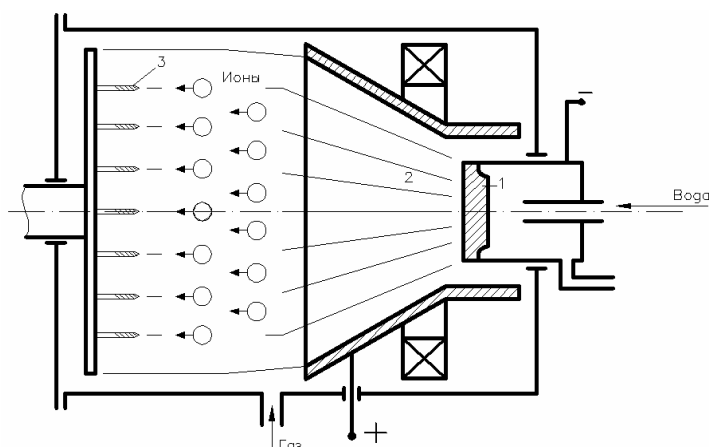


Рисунок 5.9 – Схема установки для ионно-плазменного нанесения покрытий:
1 – водоохлаждаемый катод; 2 – плазменный поток; 3 – обрабатываемая поверхность

Плазменным формованием деталей с помощью напыления получают тонкостенные детали и заготовки сложной геометрической формы из труднообрабатываемых металлов. Тогда материал в виде плазмы напыляют на оправки или шаблоны, которые затем растворяются химическим путём или разбираются на отдельные части.

5.4.5 Плазменная резка

Можно разрезать практически любые металлы и сплавы, толщина которых не превышает 250-300 мм.

Две разновидности плазменной резки:

- **разделительная**, когда металл прорезается на всю глубину (рисунок 5.10а);
- **поверхностная**, называемая **строжкой** (рисунок 5.10б).

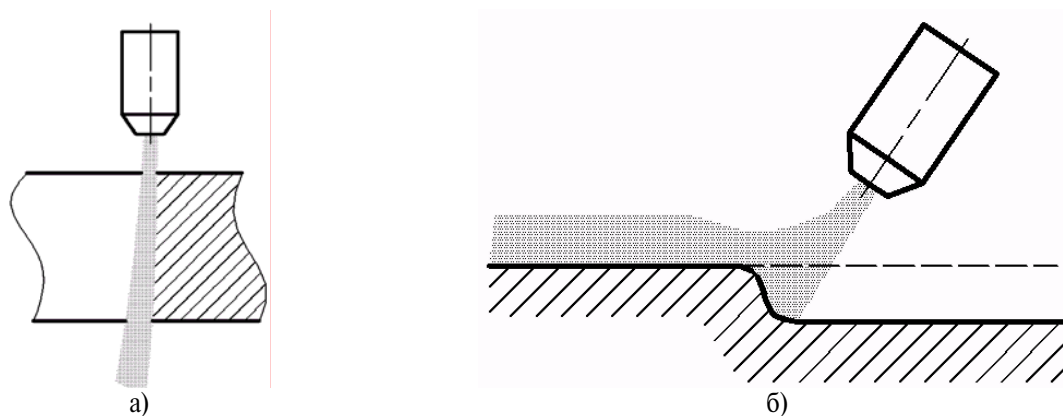


Рисунок 5.10 – Схемы плазменной резки материалов:
а – разделительная; б – поверхностная (строжка)

В основе плазменной резки лежит локальное расплавление металла в зоне реза и удаление его в жидкой фазе за счёт газодинамических сил потока плазмы.

В качестве плазмообразующих газов при резке используется аргон, водород и их смеси, а также воздух.

Поверхностная плазменная резка (строжка) в основном применяется для удаления дефектов (пригаров, неметаллических включений) на поверхности заготовок. Наибольший эффект плазменная строжка даёт при обработке зашлакованных поверхностей слитков и отливок, когда механические способы обработки малоэффективны.

6 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

6.1 Ультразвуковые колебания

Ультразвук - это упругие механические колебания с частотой, превышающей 18 кГц, которая является верхним порогом слышимости человеческого уха. Благодаря повышенной частоте, УЗК обладают рядом специфических особенностей (возможность фокусирования и направленность излучения), что позволяет сконцентрировать акустическую энергию на малых площадках излучаемой поверхности.

От источника колебаний ультразвук передается в среде в виде упругих волн, и может быть представлен в виде волнового уравнения для продольной плоской волны

$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}, \quad (6.1)$$

где A - смещение колеблющейся частицы;

t - время;

x - расстояние от источника колебаний;

c - скорость звука в среде.

Скорость звука c разная для каждой среды и зависит от ее плотности и упругости.

6.2 Форма ультразвуковых волн

Ультразвуковые волны от источника колебаний распространяются во все стороны. Около каждой частицы среды находятся другие частицы, колеблющиеся с ней в одинаковой фазе. Совокупность точек, обладающих одинаковой фазой колебаний, называется **волновой поверхностью**.

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний частиц среды, называется **длиной волны**

$$\lambda = cT = c / f, \quad (6.2)$$

где T - период колебаний;

f - частота колебаний.

Если частицы среды колеблются по линии, совпадающей с направлением распространения волны, то такие волны называются **продольными** (рисунок 6.1а). Когда смещение частиц среды происходит в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, волны называются **поперечными** (рисунок 6.1б).

В жидкостях и газах могут распространяться только продольные волны. В твердых телах как продольные, так и поперечные волны. В твердых телах небольшого размера возникают волны, являющиеся комбинацией двух основных типов - продольных и поперечных: **крутильные, изгибные, поверхностные** волны (рисунок 6.1в).

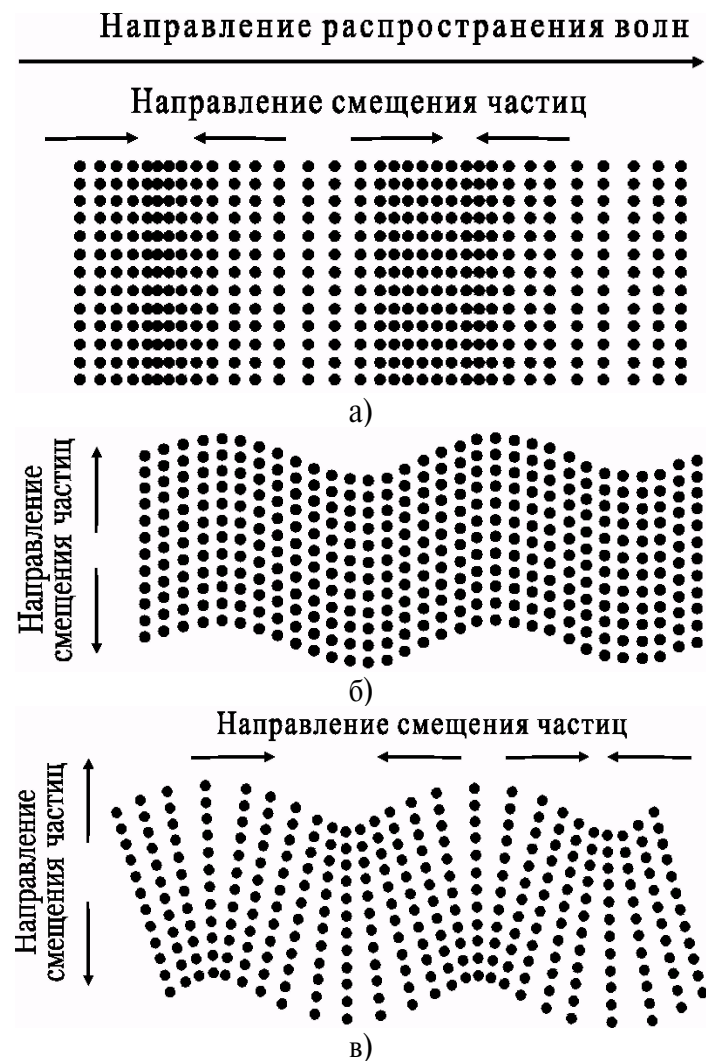


Рисунок 6.1 – Схема колебательных смещений частиц среды для различных типов волн: а – продольная волна; б – поперечная волна; в – изгибная волна

6.3 Основные характеристики ультразвукового поля

К основным характеристикам ультразвукового поля относятся: колебательное смещение A частиц среды; колебательная скорость V_k ; звуковое давление $P_{зв}$. Эти величины связаны друг с другом, поэтому задание закона изменения одной из них определяет аналогичные зависимости всех остальных.

Процесс распространения в упругой среде продольных звуковых волн связан с объемной деформацией. Давление, вызванное деформацией среды, называется звуковым.

Тогда звуковое давление определится

$$P_{зв} = -\sigma = \rho c \omega A_0 \cos(\omega t - x/c). \quad (6.3)$$

Максимум (амплитуда) звукового давления

$$P_{0зв} = \rho c \omega A_0. \quad (6.4)$$

Произведение ρc является величиной характеризующей акустические свойства среды и называется **волновым сопротивлением**.

При отсутствии затухания энергия ультразвуковой волны равна сумме потенциальной и кинетической энергии колеблющихся частиц. Кинетическая энергия в единице объема выражается как

$$W_{\kappa} = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{\rho A_0 \omega^2 \cos^2(\omega t - \frac{x}{c})}{2}. \quad (6.5)$$

Среднее значение функции $f(x) = \cos^2(\omega t - x/c) = 0,5$, поэтому

$$W_{\kappa.ср.} = \frac{\rho A_0 \omega^2}{4}. \quad (6.6)$$

Так как потенциальная энергия имеет то же значение, что и кинетическая, полная средняя энергия в единице объема среды называется плотностью звуковой энергии и составляет

$$E_{зв.} = \frac{\rho A_0 \omega^2}{2}. \quad (6.7)$$

Под интенсивностью ультразвуковых колебаний, или силой звука, понимается энергия, передаваемая ультразвуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны, за единицу времени

$$I = E c = \frac{\rho c A_0 \omega^2}{2}. \quad (6.8)$$

Принимая во внимание, что $c \rho c A_0 \omega^2 = P_{0зв}$, получаем

$$I = \frac{P_{0зв}^2}{2 \rho c}, \text{ Вт/см}^2. \quad (6.9)$$

6.4 Поглощение и отражение ультразвука. Стоячие волны

Наиболее сильно поглощают ультразвук газы, в меньшей степени жидкости и еще меньше твердые тела. Сильным поглощением характеризуются вещества с малой упругостью, неоднородные, пористые (пластмассы, резина, пенопласты, волокнистые материалы). Они применяются для звукоизоляции или для ослабления ультразвука.

Соппротивление упругой среды может быть активным и реактивным. Активное сопротивление обусловлено внутренним трением в упругой среде. Оно вызывает поглощение механической энергии и выделение ее в виде теплоты. Реактивное сопротивление обусловлено тем, что каждый бесконечно малый элемент реальной среды обладает массой и упругостью. Общее (комплексное) сопротивление упругой среды характеризуется модулем и обозначается Z .

Уменьшение амплитуды колебаний A происходит по экспоненциальному закону

$A = A_0 \exp(-\alpha x)$, где α - коэффициент поглощения, который характеризует уменьшение амплитуды смещения при прохождении волной единицы длины.

При достижении ультразвуковой волной границы раздела двух сред часть ее энергии будет отражаться, а часть попадет во вторую среду.

Коэффициентом отражения R называется отношение энергии отраженной к энергии падающей волны, которое выражается через отношение волновых сопротивлений сред

$$R = \frac{R_2 - R_1}{(R_2 + R_1)^2}, \quad (6.10)$$

где $R_1 = \rho_1 c_1$ и $R_2 = \rho_2 c_2$ - волновые сопротивления сред.

При переходе ультразвуковой волны из жидкого или твердого тела в газ и обратно коэффициент $R \approx 1$, так как волновые сопротивления газов значительно меньше. К примеру, при переходе из воды в воздух $R = 0.9989$. Ультразвуковая волна, распространяющаяся в жидких или твердых телах, почти не переходит в окружающий воздух.

6.4.1 Стоячие волны

В результате отражения волны от граничной поверхности в волновом поле возникает интерференция, т.е. наложение падающей и отраженной волн. В результате суперпозиции двух волн возникает стоячая волна.

Когда волновое сопротивление среды, на которую падает волна, больше волнового сопротивления среды, в которой она распространялась $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$, т.е. вторая среда акустически более «жесткая», то при отражении фаза волны меняется на 180° . Если наоборот, т.е. среда, от которой происходит отражение акустически более «мягкая», то изменение фазы не происходит.

Уравнение для плоской синусоидальной стоячей волны может быть получено при сложении двух бегущих синусоидальных волн одинаковой амплитуды и частоты.

$$A = 2A_0 \cos\left(\frac{\omega x}{c}\right) \sin \omega t. \quad (6.11)$$

Амплитуда колебаний A зависит от координаты x

$$A = 2A_0 \cos \frac{\omega x}{c}, \quad (6.12)$$

или т.к. $\omega = 2\pi / \lambda$,

$$A = 2A_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (6.13)$$

Т.е. амплитуда колебаний достигает максимальных значений в точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$X_{\text{пуч}} = \pm n\lambda / 2, \quad (n = 0, 1, 2 \dots) \quad (6.14)$$

Эти точки называются пучностями стоячей волны, а амплитуда колебаний в них равна удвоенной амплитуде бегущей волны. Располагаются пучности на расстоянии, кратном половине длины волны (рисунок 6.2).

Амплитуда колебаний обращается в ноль в точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$X_{\text{узел}} = \pm(n+1/2)\lambda / 2, (n = 0,1,2 \dots). \quad (6.15)$$

Эти точки называются узлами стоячей волны (рисунок 6.2).

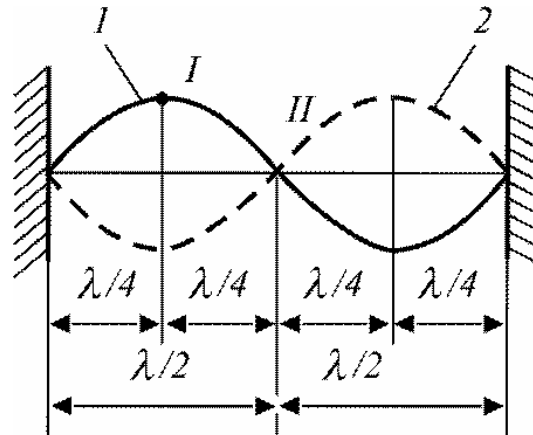


Рисунок 6.2 – Схема образования стоячей волны:

а – ускорения (скорость, смещение); б – давления; 1 – падающая волна; 2 – отраженная волна; I – пучность ускорения, II – узел ускорения, III – узел давления, IV – пучность давления

Амплитуда звукового давления в стоячей волне равна

$$P_{0зв} = 2\rho c\omega A_0. \quad (6.16)$$

При отражении от границы с акустически мягкой средой на граничной поверхности располагается узел давления, а при отражении от жесткой среды - пучность давления. В отличие от бегущей волны, стоячая волна не передает энергии.

В реальных условиях всегда имеется излучение в окружающую среду, и стоячие волны будут затухающими. Получить незатухающие стоячие волны можно в том случае, если компенсировать потери энергии работой вынуждающих сил.

6.5 Основные сведения об акустических колебательных системах технологического назначения

В общем случае ультразвуковая колебательная система (рисунок 6.3) состоит из преобразователя 1, концентратора 2 и рабочего инструмента 3. Электроакустический преобразователь 1 передает колебания согласующему элементу 2, который называется концентратором или трансформатором упругих колебаний, к последнему крепится рабочий инструмент 3. Питание электроакустического преобразователя осуществляется от ультразвукового генератора 4.

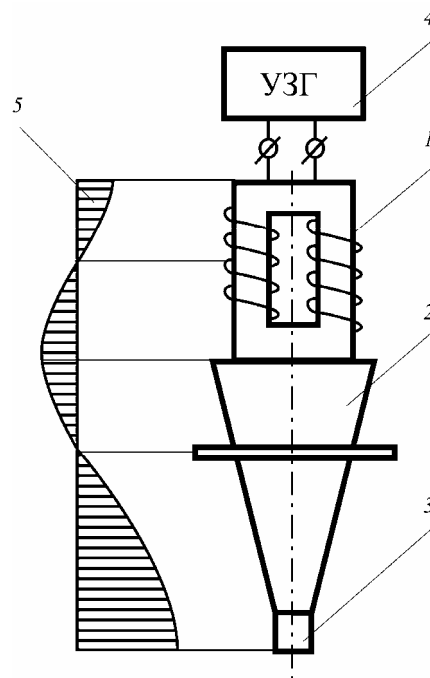


Рисунок 6.3 – Основные элементы ультразвуковой колебательной системы технологического назначения:
 1 – эпора колебательных смещений; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – электроакустический преобразователь;
 4 – концентратор; 5 – инструмент

6.5.1 Характеристики колебательных систем

Основными характеристиками колебательных систем являются резонансная частота и добротность.

При резонансе амплитуда смещений в колебательной системе становится максимальной. Зависимость амплитуды смещений A_0 от частоты возбуждающей силы f_b называется резонансной кривой. В системе с затухающими колебаниями значение амплитуды характеризуется декрементом затухания d , который показывает во сколько раз уменьшается амплитуда колебаний через единицу времени.

На рисунке 6.4 показан ряд резонансных кривых для различных значений декремента затухания ($\delta_{k4} > \delta_{k3} > \delta_{k2} > \delta_{k1}$). Чем меньше затухание в системе, тем больше амплитуда колебаний.

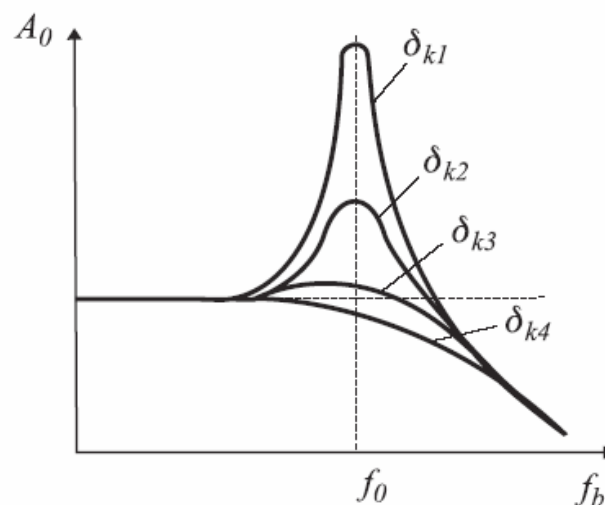


Рисунок 6.4 – Вид резонансных кривых для различных декрементов затухания ($\delta_{k4} > \delta_{k3} > \delta_{k2} > \delta_{k1}$)

Добротность - это отношение полного запаса энергии, накапливающейся в колебательной системе за какой-то промежуток времени, к энергии, отдаваемой на полезную работу и преодоление потерь.

Добротность колебательной системы Q связана с декрементом затухания δ_k соотношением

$$Q = \frac{\omega_0}{2\delta_k}, \quad (6.17)$$

где ω_0 - круговая частота при резонансе.

Оценить добротность колебательной системы можно по ее амплитудно-частотной характеристике (рисунок 6.5). Она определяется как

$$Q = \frac{f_0}{f_1 - f_2} = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (6.18)$$

где частоты f_1 и f_2 выбираются так, чтобы амплитуда вынужденных колебаний на этих частотах была в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем амплитуда при резонансной частоте.

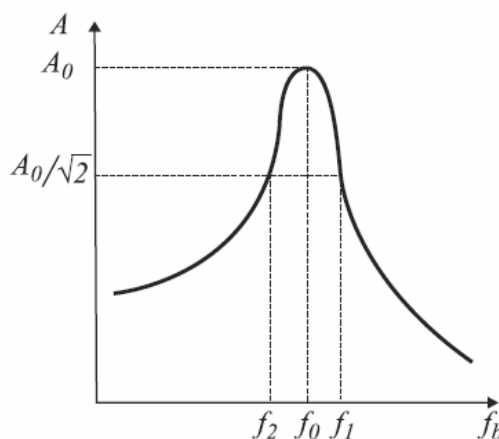


Рисунок 6.5 – Определение добротности колебательной системы по ее амплитудно-частотной характеристике

В излучателях ультразвуковых волн, когда желательно обеспечить возможно большее излучение энергии в жидкость, $Q = 10 \div 20$. В слабо нагруженных ультразвуковых инструментах с концентраторами стремятся к высоким значениям добротности ($Q = 100 \div 10000$), что позволяет получать большие амплитуды смещения рабочего торца инструмента.

6.5.2 Электроакустические преобразователи

Предназначены для преобразования электрической энергии в энергию ультразвуковых волн. В настоящее время применяются магнестрикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

6.5.2.1 Магнестрикционные преобразователи

В основу действия этих преобразователей положен магнестрикционный эффект - изменение размеров ферромагнитных материалов под действием магнитного поля.

Наиболее сильно эффект магнестрикции выражен в ферромагнетиках и некоторых ферритах.

На рисунке 6.6 приведены кривые магнитоэстрикционной деформации различных ферромагнетиков в зависимости от напряженности магнитного поля H .

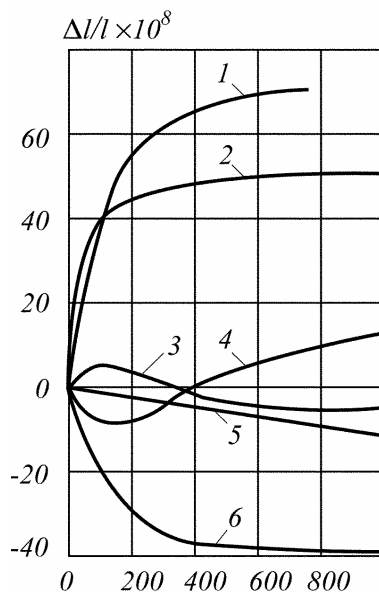


Рисунок 6.6 – Кривые магнитоэстрикционной деформации (H – напряженность магнитного поля):
1 – сплав платины с железом (54% Pt и 46% Fe); 2 – пермендюр; 3 – железо; 4 – литой кобальт;
5 – отожженный кобальт; 6 – никель

В настоящее время наибольшее применение находят никель и пермендюр.

Процесс преобразования можно охарактеризовать двумя последовательными ступенями - **электромагнитной** и **магнитомеханической**. Переменное напряжение создает в обмотке намагничивающий ток, который вызывает изменение магнитного состояния материала сердечника - возбуждает переменную индукцию (первая ступень). Сердечник в переменном магнитном поле под действием периодического намагничивания изменяет свои размеры (вторая ступень).

Этот эффект «квадратичен», т.е. частота колебаний сердечника в два раза выше частоты колебаний электромагнитного поля. Если подмагничивание отсутствует (рисунок 6.7а), то преобразователь изменяет свою длину с удвоенной частотой $2f$ и магнитоэстрикционная деформация невелика.

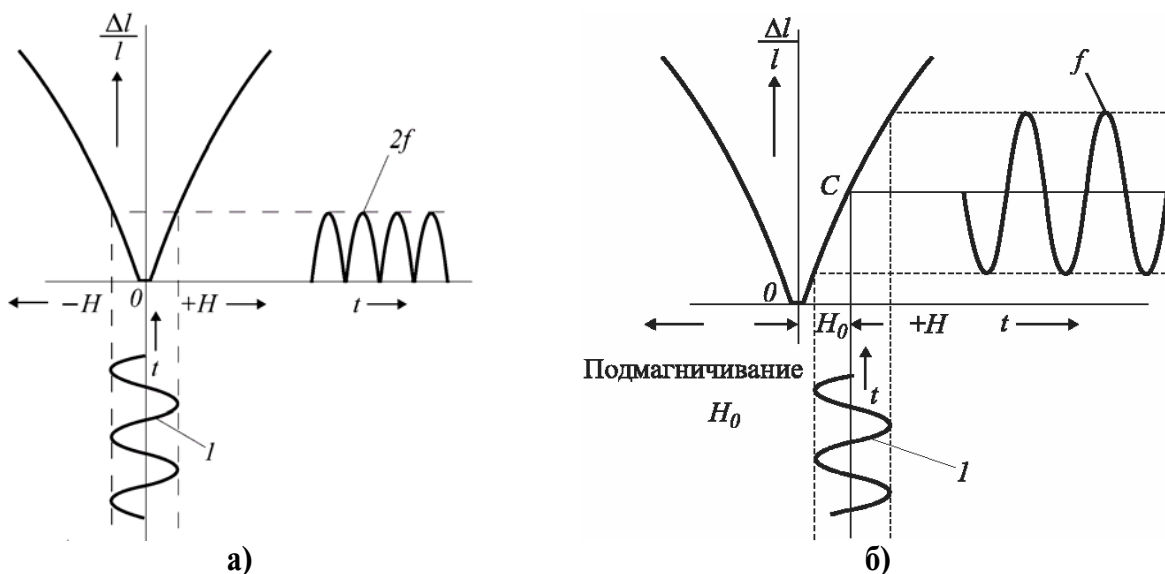


Рисунок 6.7 – Магнитоэстрикционная деформация при возбуждении переменным магнитным полем (H – напряженность магнитного поля; t – время):
а – без подмагничивания; б – с подмагничиванием; 1 – возбуждающее поле частоты f

При наложении постоянного поля H_0 рабочая точка смещается по кривой магнестрикционной деформации (точка C на рисунок 6.7б), в результате чего частота колебаний преобразователя становится равной частоте колебаний поля f и происходит увеличение амплитуды колебаний. Подмагничивание создается или постоянным током, протекающим по обмотке, или с помощью постоянных магнитов, установленных в магнитопроводе сердечника, или за счет остаточной намагниченности.

Амплитуда поляризованного преобразователя A_0 максимальна на резонансном режиме. Наибольшее распространение получили полуволновые двухстержневые продольно-колеблющиеся магнестрикционные преобразователи (рисунок 6.8а).

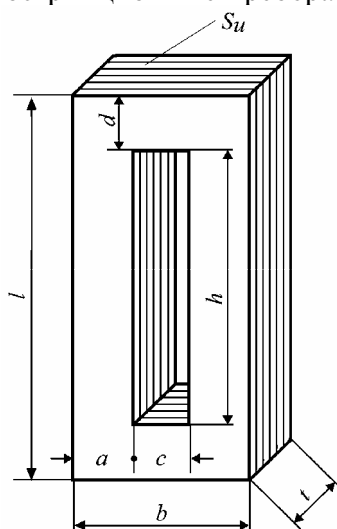


Рисунок 6.8 – Двухстержневой полуволновой магнестрикционный преобразователь

Обмотка возбуждения наносится таким образом, чтобы в соседних стержнях поле было направлено противоположно. Излучение колебаний происходит со стороны накладок, а узел смещения находится по середине стержней. При одностороннем излучении со стороны неработающей поверхности создают отражающий экран - воздушную подушку с помощью пористой резины.

В магнестрикционных преобразователях кольцевого типа (рисунок 6.9) применяется торидальная обмотка. Звук излучается наружной или внутренней цилиндрической поверхностью кольца.

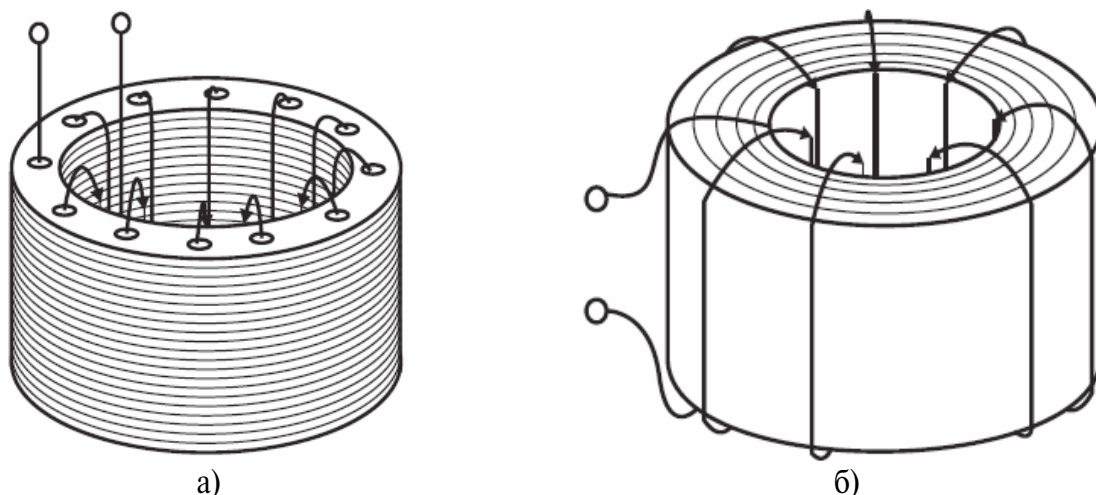


Рисунок 6.9 – Магнестрикционные преобразователи кольцевого типа:
а – с обмоткой через отверстия в сердечнике; б – с обмоткой по наружной поверхности сердечника

Для уменьшения потерь на токи Фуко сердечники из металлических материалов набирают из штампованных тонких пластин или навивают из тонкой ленты. Магнитострикционные преобразователи выполняются с водяным охлаждением.

Их максимальный электроакустический КПД в диапазоне частот 20-30 кГц составляет 50-70%, с повышением частоты колебаний его значение уменьшается.

Магнитострикционные преобразователи изготавливают также из ферритов. Потери на вихревые токи у них практически отсутствуют. Поэтому сердечники из ферритов изготавливаются монолитными. Для их подмагничивания используют пластины ферритовых постоянных магнитов, которые вставляются или клеиваются в магнитопровод преобразователя (рисунок 6.10).



Рисунок 6.10 – Подмагничивание ферритовых преобразователей с помощью постоянных магнитов:
а – с установкой двух магнитов; б – с установкой одного магнита

Электроакустический КПД у ферритовых преобразователей достигает 80-85 %. Они не требуют высокого напряжения питания, могут работать в агрессивных средах, не требуют принудительного водяного охлаждения.

Амплитуда колебаний и интенсивность излучения у преобразователей из ферритов, ограничиваются нелинейными свойствами и их низкой механической прочностью (предельная интенсивность составляет 5-7 Вт/см²).

6.5.2.2 Пьезоэлектрические преобразователи

Их действие основано на способности некоторых кристаллов деформироваться в электрическом поле в направлении его приложения (обратный пьезоэлектрический эффект).

Все пьезоэлектрические материалы делятся на **естественные и искусственные**. Первые - это кварц, турмалин, сегнетовая соль, а вторые - материалы, пьезоэлектрический эффект у которых появляется только после их специальной обработки - поляризации (нагрева керамики до температуры выше точки Кюри и последующего медленного охлаждения в электрическом поле).

Преобразователи из кварца дороги и размеры их ограничены.

Пьезокерамика значительно дешевле, требует меньших возбуждающих напряжений. К этой группе относится керамика титаната бария и керамика цирконата титаната свинца (ЦТС-19, ЦТС-23).

Резонансная частота f_0 пьезокерамического преобразователя зависит от свойств материала и его толщины h . Для титаната бария и для цирконата титаната свинца ее значение, соответственно, определяется

$$f_0 = \frac{2,25}{h}, \text{ МГц} \text{ и } f_0 = \frac{2,1}{h}, \text{ МГц.} \quad (6.19)$$

Широко применяют преобразователи типа «сэндвич», предложенные Ланжевенном. Этот преобразователь состоит из двух металлических накладок-пластин, между которыми

закреплена пьезокерамическая пластина. Возбуждение преобразователя осуществляется таким образом, чтобы вся система работала как полуволновой излучатель. Металлические пластины действуют как добавочные массы и снижают резонансную частоту излучателя.

На рисунке 6.11 приведена конструкция пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена. Он состоит из двух пьезокерамических пластин, излучающей и отражающей накладок, контактных пластин из мягкой фольги и стягивающего центрального болта или шпильки.

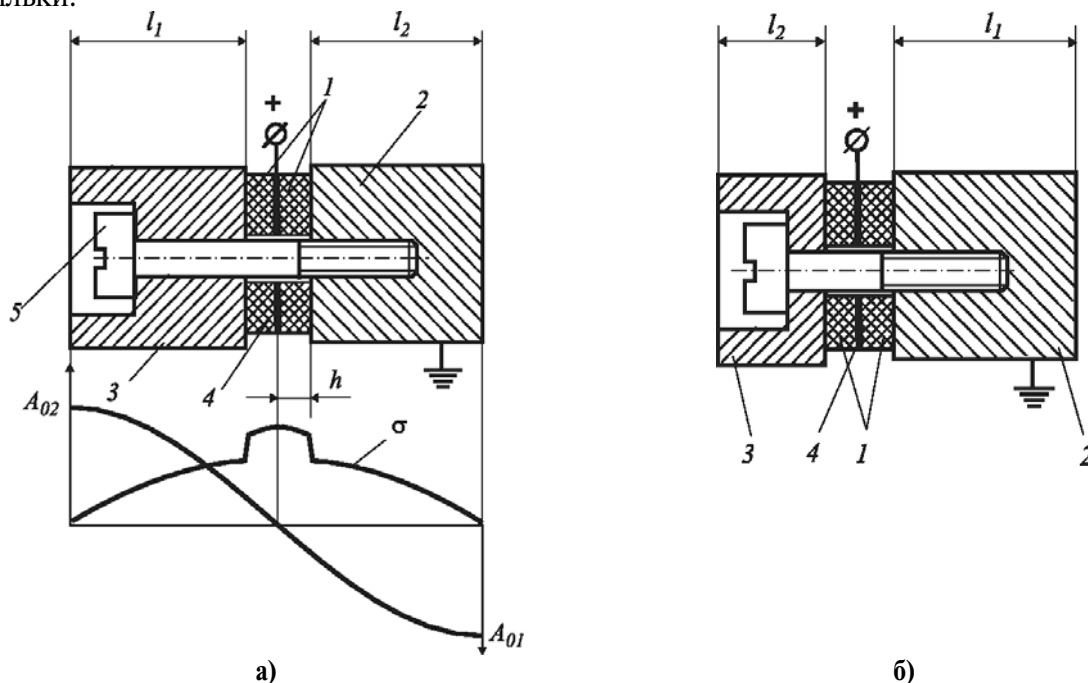


Рисунок 6.11 – Конструкция пьезокерамического преобразователя типа Ланжевена:

а – с частотопонижающими накладками из одного металла; б – с частотопонижающими накладками из разных металлов; 1 – пьезокерамические пластины; 2 – излучающая накладка; 3 – отражающая накладка; 4 – контактные пластины; 5 – стягивающий болт

Параллельное соединение двух пьезокерамических пластин толщиной $h / 2$ удобно, т.к. обе металлические накладки 2, 3 могут быть заземлены. Сопротивление преобразователя на резонансной частоте составляет четвертую часть сопротивления преобразователя с одной пластиной толщиной h , а напряжение возбуждения снижается в два раза. Для эффективной работы преобразователя важно обеспечить плотное и прочное соединение поверхностей пьезоэлементов и накладок. Не допускаются воздушные прослойки между преобразователем и концентраторами или образцом, так как они отражают до 100% энергии ультразвуковой волны. Для обеспечения хорошего акустического контакта в соединениях колебательной системы, сопрягаемые поверхности должны быть тщательно притерты, а при сборке между ними помещается смазка.

Для повышения стабильности работы преобразователя рабочую (излучающую) накладку изготавливают из материала с малым волновым сопротивлением (алюминиевые или титановые сплавы), а пассивную - из стали. При этом длина этих накладок оказывается неодинаковой ($l_1 > l_2$) (рисунок 6.11б).

В пьезокерамике типа ЦТС потери, преобразующиеся в теплоту, невелики, поэтому для преобразователей при длительной их работе достаточно воздушного охлаждения. КПД пьезокерамических преобразователей составляет 40-70%.

6.5.3 Ультразвуковые концентраторы и волноводы

Это устройство для увеличения амплитуды колебательного смещения частиц среды, т.е. интенсивности ультразвука. Применяются два типа концентраторов: фокусирующие (высокочастотные), и стержневые (низкочастотные).

Фокусирующие концентраторы применяются для создания ультразвуковых колебаний высокой интенсивности с целью активного воздействия на различные вещества и объекты.

Для получения особенно высоких интенсивностей ультразвука применяют специальные конструкции фокусирующих концентраторов (рисунок 6.12).

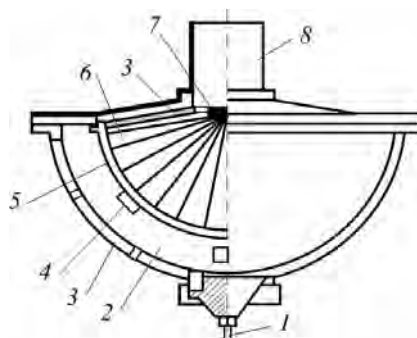


Рисунок 6.12 – Конструкция фокусирующего концентратора с применением в качестве контактной среды дегазированной воды:

1 – электрический контакт; 2 – изолирующая жидкость; 3 – охлаждающая жидкость; 4 – пьезокерамические пластины; 5 – сферическая оболочка; 6 – дегазированная вода; 7 – звукопрозрачная пленка; 8 – стакан

В качестве излучающего элемента в такой конструкции служит сферическая оболочка, которая колеблется на частоте резонанса по толщине. Возбуждается оболочка пьезокерамическими пластинами имеющими ту же резонансную частоту и покрывающими ее сплошь в виде мозаики. Излучение колебаний происходит в полость, заполненную дегазированной водой (контактная среда). Сходящаяся сферическая волна, фокусируется у основания стакана с исследуемым объектом. Полость стакана отделяется от контактной среды звука прозрачной пленкой.

В других конструкциях в качестве контактной среды может использоваться твердое вещество с малым поглощением звука (рисунок 6.13).

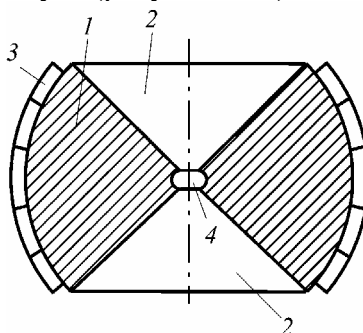


Рисунок 6.13 – Конструкция фокусирующего концентратора с применением металлической контактной среды: 1 – алюминиевая среда; 2 – конические полости; 3 – пьезокерамические пластины; 4 – фокальная область

Стержневой концентратор - это твердый стержень переменного сечения или переменной плотности, присоединяемый к излучателю более широким концом или частью с большей плотностью материала. Принцип действия основан на увеличении амплитуды колебательного смещения частиц стержня, в результате уменьшения его поперечного сечения или плотности по закону сохранения количества движения. Увеличение амплитуды смещения тем больше, чем больше различие диаметров или плотностей

противоположных торцов стержня. Они работают в диапазоне частот от 18 до 100 кГц на резонансной частоте, т.е. их длина должна быть кратна целому числу полуволн.

Максимальный линейный размер широкого конца концентратора должен быть меньше $l/2$, где l - длина волны в материале концентратора.

Коэффициентом усиления или трансформации концентратора K называется отношение амплитуды смещений (или скоростей) на его узком A_0 (V_0) и широком A_n (V_n) концах

$$K = \frac{A_0}{A_n} = \frac{V_0}{V_n}. \quad (6.20)$$

Стержневые концентраторы классифицируют: по форме продольного сечения: **ступенчатые, конические, экспоненциальные, катеноидные и ампульные**;

по форме поперечного сечения: **круглые, клинообразные и др.**

по количеству последовательно соединенных резонансных концентраторов полуволновой длины: **одно-, двух- и т.д. ступенчатые.**

На рисунке 6.14 показаны различные типы полуволновых концентраторов, а также распределение амплитуд смещений A и напряжений δ .

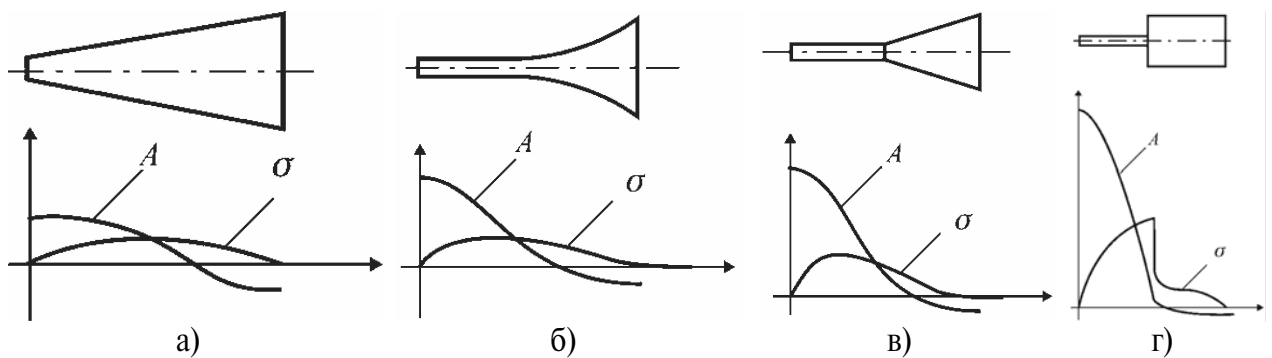


Рисунок 6.14 – Типы полуволновых концентраторов:

а – конический; б – экспоненциальный; в – катеноидальный; г – ступенчатый; А – распределение амплитуд колебательных смещений по длине концентратора; σ – распределение напряжений

Различают два режима работы концентраторов:

- колебательный режим в ненагруженном состоянии (режим стоячей волны);
- режим бегущей волны при нагрузке на полностью поглощающую активную среду.

Степень приближения колебаний к режимам бегущей или стоячей волны определяется коэффициентом бегущей волны

$$k = \frac{A_{0\min}}{A_{0\max}}, \quad (6.21)$$

где $A_{0\min}$ - амплитуда смещений в узловом сечении;

$A_{0\max}$ - то же в пучности колебаний.

Переменную площадь по сечениям концентраторов можно обеспечить, изменяя их внутренний профиль (рисунок 6.15). Материал для концентратора должен обладать высокой усталостной прочностью, малыми потерями, хорошо обрабатываться и паяться твердыми припоями, а так же быть недорогим.

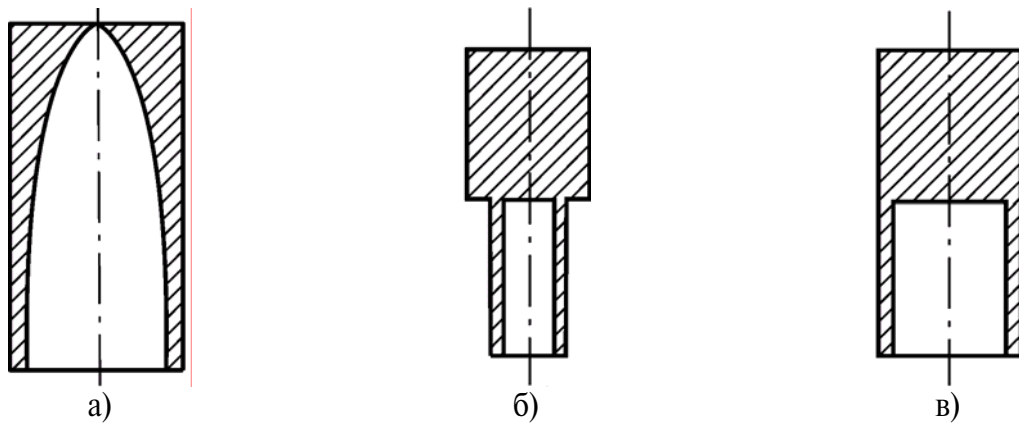


Рисунок 6.15 – Концентраторы с переменной площадью внутреннего сечения:
а, б – наружный профиль цилиндрический, внутренний, соответственно, экспоненциальный и ступенчатый;
в – наружный и внутренний профили ступенчатые

Минимальными потерями обладают титановые сплавы, которые обеспечивают наиболее высокую амплитуду колебаний инструмента. Кроме того, концентраторы из титановых сплавов обладают высокой усталостной прочностью. Однако соединение титана непосредственно с никелем и другими магнестрикционными материалами затруднено.

Концентраторы можно изготавливать и из углеродистых сталей 40, 45. Они недефицитны, хорошо обрабатываются, обладают достаточной усталостной прочностью и легко паяются твердыми припоями.

Соединения звеньев колебательной системы выполняют в узлах деформации или пучностях смещений, где механические напряжения минимальны. Наиболее надежным способом соединения является пайка твердыми и мягкими припоями.

Соединение ферритовых преобразователей с концентратором выполняется на клею. У пьезокерамических преобразователей присоединение концентратора осуществляется с помощью накладок и стяжных болтов. Для колебательных систем со сменными инструментами (концентраторами) применяются резьбовые соединения с мелким шагом.

Кроме колебательных систем продольных ультразвуковых колебаний используются системы со звеньями изгибных и крутильных колебаний для их передачи в нужном направлении, а также чтобы складывать или распределять мощности нескольких преобразователей (рисунок 6.16).

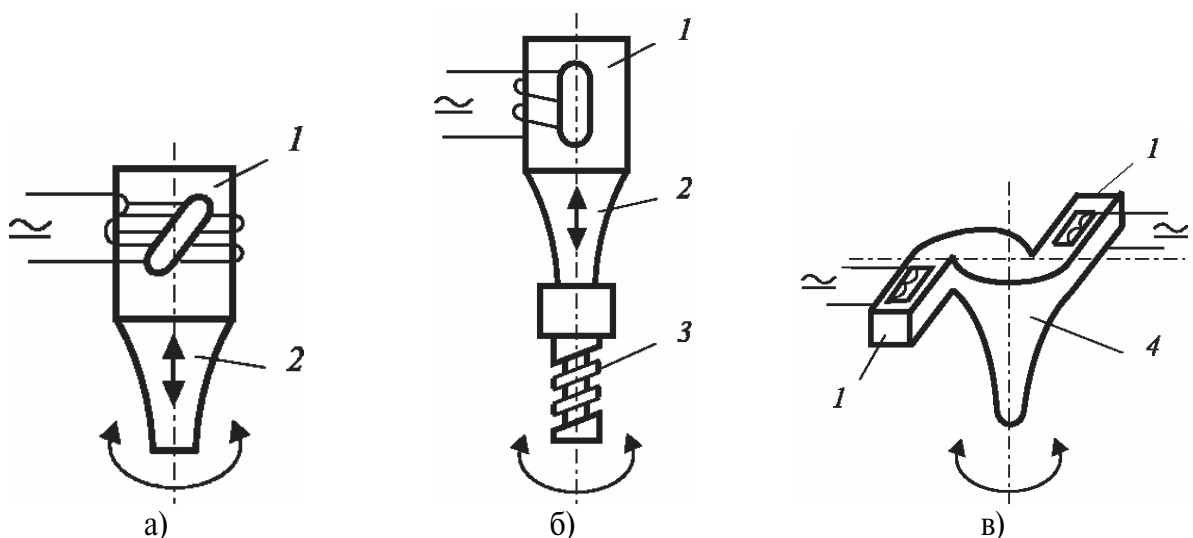


Рисунок 6.16 – Колебательные системы для преобразования продольных колебаний в продольно-крутильные и крутильные:

а – магнестрикционный преобразователь с окнами, выполненными по винтовой линии;
б – инструмент со спиральной нарезкой; в – два преобразователя и инструмент

Известны конструкции пьезокерамических преобразователей крутильных колебаний, состоящие из двух полуцилиндрических пьезоэлементов, которые поляризованы вкруговую и соединены вместе на клею (рисунок 6.17). Однако они не обеспечивают высокой излучающей мощности преобразователя.

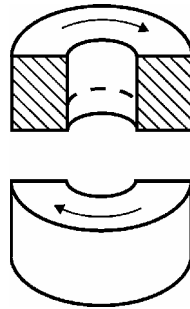


Рисунок 6.17 – Полуцилиндрические пьезоэлементы, поляризованные вкруговую для получения крутильных колебаний

От указанного недостатка свободна конструкция пьезокерамического преобразователя крутильных колебаний, представленная на рисунке 6.18а.

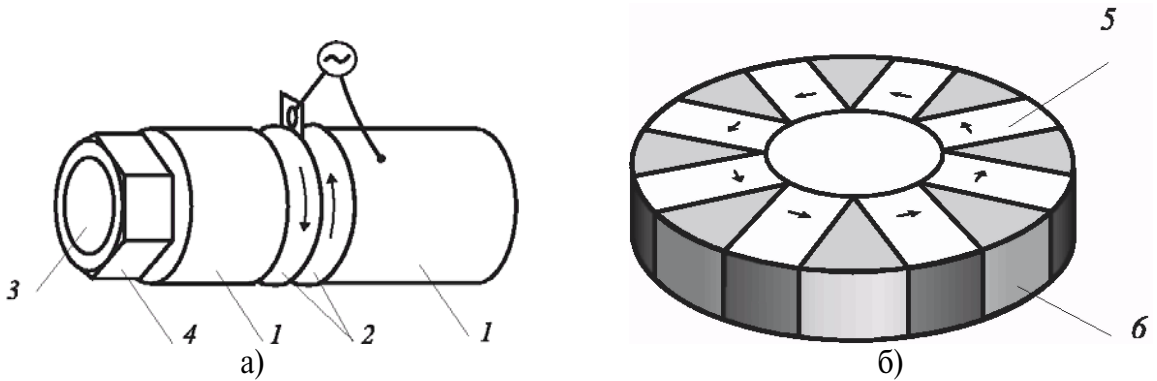


Рисунок 6.18 – Конструкции

а – пьезокерамического преобразователя крутильных колебаний; б – пьезокерамических колец;
 1 – частотопонижающие накладки; 2 – пьезокерамические кольца; 3 – гайка; 4 – стяжной болт;
 5 – пьезокерамические секции; 6 – серебряные электроды

Между частотопонижающими накладками и с помощью болта и гайки закреплены пьезокерамические кольца, которые набраны из отдельных секций пьезокерамики типа ЦТС и серебряных электродов (рисунок 6.18б). При этом пьезокерамика поляризуется по периферии как одно целое.

Применяются акустические системы многонаправленной передачи ультразвуковой энергии, которые преобразовывают колебания по нескольким направлениям или, аккумулируют всю энергию от нескольких источников в одном направлении (рисунок 6.19, 6.20).

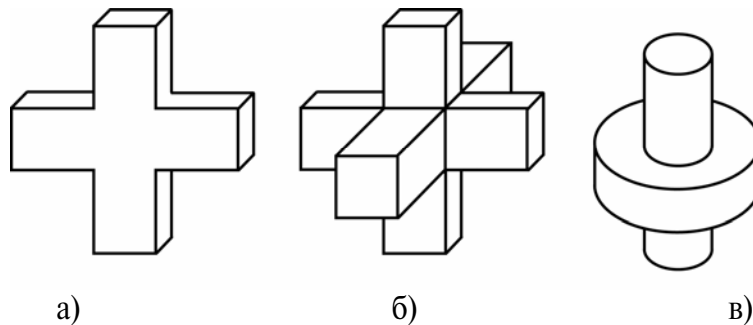


Рисунок 6.19 – Основные типы волноводов для многонаправленной передачи колебаний:
 а и б – для передачи продольных колебаний, соответственно, по двум и трем направлениям; в – для преобразования продольных колебаний в радиальные и наоборот

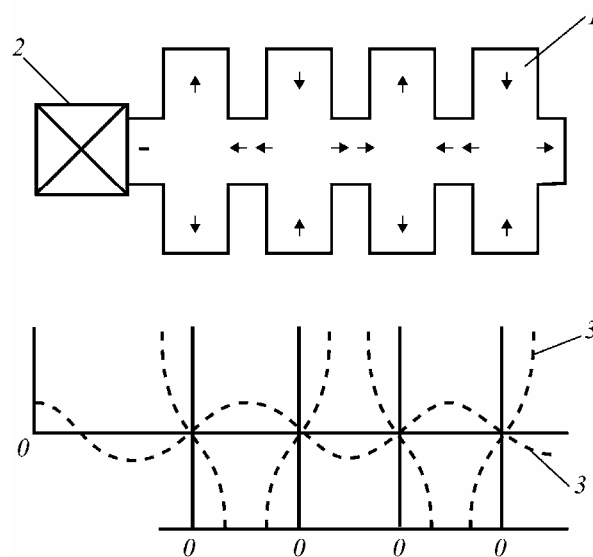


Рисунок 6.20 – Схема многоступенчатого волновода для передачи продольных колебаний по двум направлениям: 1 – волновод; 2 – преобразователь продольных колебаний; 3 – эпюры колебательных смещений

Волновод для преобразования радиальных колебаний в продольные представляет собой диск, к которому по периферии закреплены преобразователи (рисунок 6.21). На торцах цилиндра, соединенного с диском, возникают продольные колебания.

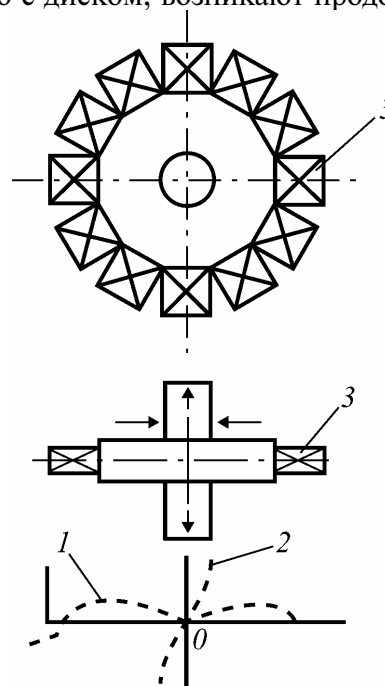


Рисунок 6.21 – Волновод для преобразования радиальных колебаний в продольные: 1 – эпюра колебательных смещений радиальных колебаний; 2 – эпюра колебательных смещений продольных колебаний; 3 – ультразвуковые преобразователи

Чаще всего используется режим одностороннего излучения преобразователей, т.е. излучающим элементом является лишь одна сторона, и концентратор и волновод крепятся к одному из торцов преобразователя. Вместе с тем в некоторых случаях могут применяться двусторонние колебательные системы, когда используется излучение с обоих торцов ультразвукового преобразователя (рисунок 6.22). Такие системы удобны при создании двухпозиционного технологического оборудования.

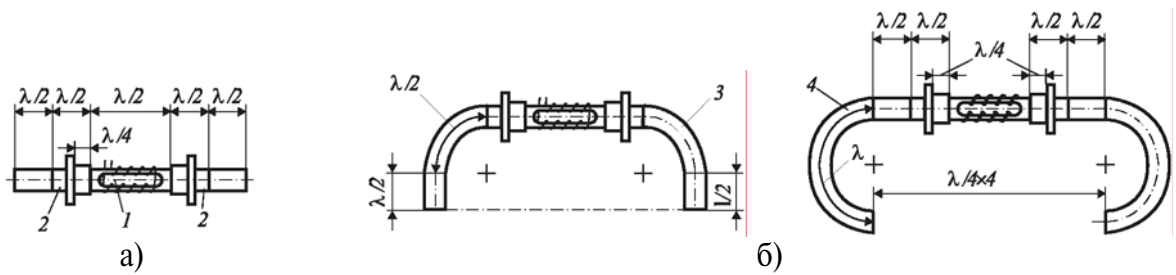


Рисунок 6.22 – Двусторонние колебательные системы:

а – с прямолинейными волноводами; б – с криволинейными волноводами; 1 – преобразователь; 2 – прямолинейный волновод; 3 – криволинейный волновод длиной $X/2$; 4 – криволинейный волновод длиной X

6.6 Ультразвуковая очистка

Ультразвуковая очистка - способ очистки поверхностей твердых тел от жировых и механических загрязнений, при котором в моющий раствор вводятся ультразвуковые колебания. В основе механизма ультразвуковой очистки лежат явления, возникающие в жидкости при возбуждении в ней ультразвуковых волн: кавитация, акустические течения, звуковое давление и звукокапиллярный эффект. Эффективность процесса очистки зависит от частоты колебаний и их интенсивности, а также от физико-химических свойств моющей жидкости (вязкость, упругость насыщенного пара, поверхностное натяжение, степень газосодержания). Также на эффективность очистки оказывают влияние и внешние факторы: температура и гидростатическое давление в жидкости.

В процессе ультразвуковой очистки происходит разрушение поверхностных пленок загрязнений, отслаивание и удаление загрязнений, их эмульгирование и растворение (рисунок 6.24).

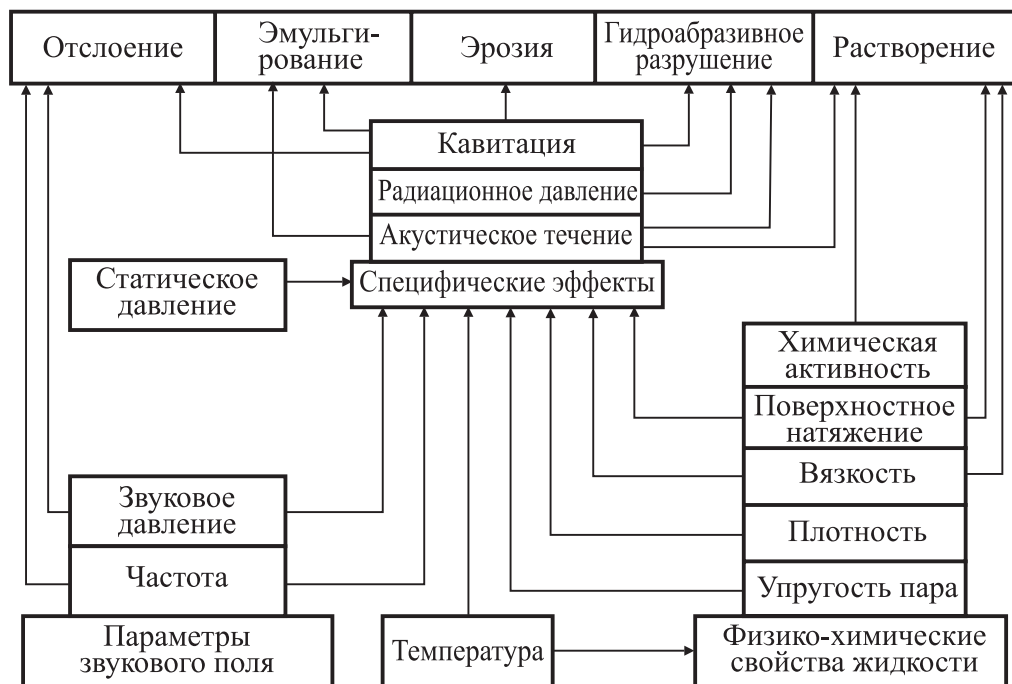


Рисунок 6.23 – Схема влияния различных факторов на механизм ультразвуковой очистки

6.6.1 Акустическая кавитация

Заключается в образовании в жидкости пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью. Различают акустическую кавитацию при прохождении

звуковой волны большой интенсивности, и гидродинамическую из-за сильного локального понижения давления в жидкости вследствие больших скоростей течения.

В интенсивной звуковой волне во время полупериодов растяжения возникают кавитационные пузырьки, которые резко захлопываются после перехода в область повышенного давления. Это вызывает появление в жидкости сильных гидродинамических возмущений. Кавитационные пузырьки образуются там, где давление P в жидкости становится ниже критического значения $P_{кр}$, соответствующего порогу кавитации.

У жидкостей разрывы сплошности возникают при давлениях несколько меньших давления насыщенного пара при данной температуре, так как в них содержится множество парогазовых нерастворенных пузырьков - зародышей кавитации.

Количественно момент возникновения кавитации характеризуют числом кавитации

$$\chi = \frac{P_0 - P_n}{P_{0зв}}, \quad (6.22)$$

где P_0 - гидростатическое давление жидкости;

P_n - давление насыщенного пара;

$P_{0зв}$ - амплитуда звукового давления.

С увеличением температуры жидкости интенсивность кавитации растет до определенного максимума, а затем начинает падать. Эффективность кавитации повышается при увеличении мощности, но понижается с ростом частоты ультразвуковых колебаний.

Кавитация возникает при колебаниях пузырьков, радиусы которых находятся в пределах от $R_{кр}$ до $R_{рез}$. Часть пузырьков, собственная резонансная частота которых соизмерима с частотой приложенного ультразвукового поля, сокращается (захлопывается) с большой скоростью, вызывая возникновение сферических ударных волн. Другая часть пузырьков, собственные частоты которых далеки от частоты ультразвукового поля, совершают сложные негармонические колебания, а сам этот процесс принято называть псевдокавитацией.

В кавитационной области действуют интенсивные микропотоки, порождаемые пульсирующими пузырьками. В результате вещество в кавитационной области подвергается интенсивным воздействиям, что сопровождается разрушением поверхностей твердых тел - кавитационной эрозией.

6.6.2 Звукокапиллярный эффект

Заключается в аномально глубоком проникновении жидкости в капилляры и узкие щели под воздействием ультразвука. При этом жидкость поднимается по капилляру под воздействием ультразвука только в том случае, когда кавитационная область, состоящая из пульсирующих и захлопывающихся кавитационных пузырьков, находится непосредственно под капилляром.

Звукокапиллярный эффект вызван суммарным действием единичных импульсов давления, которые возникают при захлопывании кавитационных пузырьков. Он находит применение при пропитке пористо-капиллярных тел и катушек трансформаторов, при дублировании кож, при окрашивании толстых тканей, при изготовлении точных отливок из алюминиевых сплавов.

Большинство процессов ультразвуковой обработки твердых тел в жидкости в условиях действия кавитации начинается с интенсивного проникновения жидкости в капиллярные щели твердых тел и расклинивания их.

6.6.3 Акустические течения

Они представляют собой регулярные течения среды вихревого характера, возникающие как в свободном неоднородном звуковом поле, так и вблизи различного рода препятствий. С увеличением интенсивности звука скорость акустических течений возрастает.

Возникновение акустических течений обусловлено законом сохранения количества движения и заключается в том, что переносимое звуковой волной количество движения, связанное с колебаниями частиц среды, при поглощении волны передается среде, вызывая ее регулярное движение. Поэтому скорость акустического течения пропорциональна коэффициенту поглощения звука и его интенсивности.

Различают акустические течения трех типов:

- 1) течения в свободном неоднородном поле, когда характерный масштаб течения определяется размером неоднородности, к примеру, радиусом звукового пучка r (рисунок 6.24а);
- 2) течения в стоячих волнах, масштаб которых определяется длиной волны (рисунок 6.24б);
- 3) течения в пограничном слое вблизи препятствий, расположенных в акустическом поле (рисунок 6.24в).

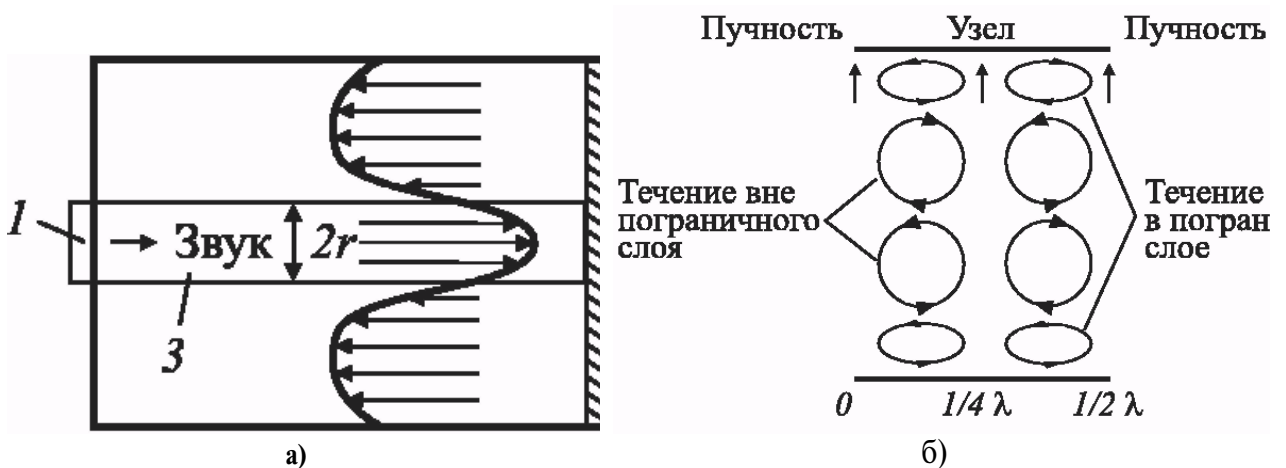


Рисунок 6.24 – Схемы акустических течений:

а – схема течения жидкости под действием ограниченного пучка звука; 1 – излучатель звука; 2 – поглотитель звука; 3 – звуковой пучок; б – схема течения жидкости в стоячих волнах и пограничном слое

6.6.4 Виды загрязнений

Разрушение слабо связанных загрязнений происходит в основном под действием пульсирующих (незахлопывающихся) кавитационных пузырьков (рисунок 6.25). Звукокапиллярный эффект способствует проникновению моющего раствора в микropоры, неровности и глухие каналы. Акустические течения осуществляют ускоренное удаление загрязнений с поверхности.

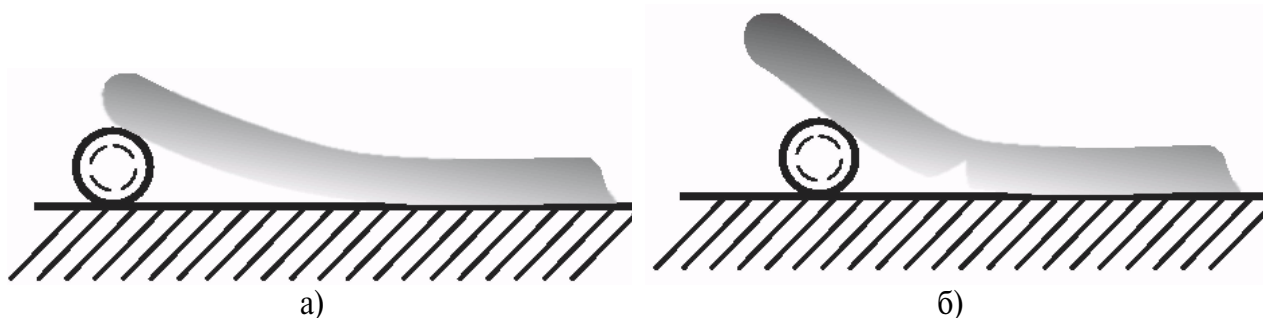


Рисунок 6.25 – Схема разрушения пленки загрязнения пульсирующими кавитационными пузырьками:
а – начальный момент; б – момент разрушения

Когда загрязнения прочно связаны с поверхностью, для их разрушения и удаления с нее необходимо наличие захлопывающихся кавитационных пузырьков, создающих микроударное воздействие на очищаемую поверхность.

Наиболее часто встречающимися видами поверхностных загрязнений являются:

- жировые пленки, которые слабо связаны с очищаемой поверхностью и химически взаимодействуют с водными растворами, но устойчивы по отношению к кавитации;
- лаковые пленки и краски, которые кавитационно стойки, и прочно связаны с поверхностью;
- окалина и окисные пленки, которые кавитационно стойки и прочно связаны с поверхностью;
- продукты коррозии, которые также прочно связаны с поверхностью, но являются кавитационно нестойкими;
- металлическая пыль и шлам после травления, которые слабо связаны с очищаемой поверхностью и являются кавитационно нестойкими.

6.6.5 Влияние физико-химических свойств моющей жидкости

При выборе состава моющей жидкости необходимо, чтобы она химически взаимодействовала только с загрязнениями, но не вступала в химические реакции с материалом деталей. Когда кавитационная стойкость загрязнений выше кавитационной стойкости материала детали, применять ультразвуковую очистку не следует.

Повышение упругости пара внутри пузырьков снижает интенсивность кавитации. Поэтому применение для ультразвуковой очистки водных растворов более эффективно, чем использование органических растворителей.

На эффективность очистки оказывает влияние поверхностное натяжение жидкости, воздействующая в конечной стадии сжатия пузырьков на скорость их захлопывания и повышающая микроударное действие кавитации. Но с возрастанием поверхностного натяжения повышается порог кавитации и ухудшаются процессы смачивания поверхности очищаемых деталей. Поэтому стремятся уменьшить величину поверхностного натяжения моющих растворов с помощью поверхностно-активных веществ.

В ультразвуковых полях малой интенсивности с ростом вязкости увеличиваются потери акустической энергии, а при большой интенсивности ультразвука в вязких жидкостях усиливается кавитационное воздействие, так как силы вязкого трения препятствуют расширению кавитационного пузырька после наступления стадии сжатия в звуковой волне. Поэтому начальная стадия сжатия кавитационного пузырька наступает раньше, за счет чего возрастает скорость и сокращается время его захлопывания, повышая микроударное воздействие.

Увеличение содержания газа в пузырьке вызывает снижение эрозионной активности жидкости, но сокращает число центров кавитации, что снижает эффективность ультразвуковой очистки.

Для каждой жидкости существует определенный температурный интервал, в котором обеспечивается наивысшая эффективность очистки. Для водных растворов оптимальная температура 40-50°C. При более низкой температуре снижается химическая активность раствора. С ростом температуры растет упругость пара в образовавшейся полости, что снижает кинетическую энергию кавитационных и пульсирующих пузырьков.

Наиболее приемлемыми из органических растворителей для ультразвуковой очистки являются фреоновые композиции, обладающие высокой растворяющей способностью, малой токсичностью, взрывобезопасностью и возможностью регенерации.

Водные щелочные растворы по сравнению с органическими растворителями обладают рядом преимуществ: дешевизной, нетоксичностью, пожаробезопасностью. Их применяют для очистки деталей от смазок, полировочных паст, металлической пыли, абразивов.

Когда необходимо снять окалину и нагар, пользуются травильными растворами серной, соляной, азотной кислот.

6.6.6 Влияние параметров ультразвукового поля

Увеличение частоты приводит к сокращению времени роста и уменьшению максимального радиуса кавитационной полости, что способствует повышению давления парогазовой смеси в пузырьке к началу захлопывания и уменьшает интенсивность ударных микроволн. Кроме того, с ростом частоты колебаний возрастает поглощение акустической энергии. Снижение частоты колебаний приводит к резкому возрастанию шума установок, а также увеличению резонансных размеров излучателя. Большинство установок для ультразвуковой очистки работает в диапазоне частот от 18 до 44 кГц.

Существует предельное значение интенсивности колебаний, превышение которого приводит к увеличению амплитудного значения давления, и кавитационный пузырек вырождается в пульсирующий. Кроме того, при большой интенсивности происходит экранирование ультразвукового поля кавитационным облаком вблизи излучателя, что увеличивает расход энергии. Интервал интенсивностей колебаний при ультразвуковой очистке составляет от 0,5 до 10 Вт/см².

6.6.7 Технология ультразвуковой очистки

Подготовку загрязненной поверхности к ультразвуковой очистке осуществляют путем замачивания деталей в воде, моющем растворе или органических растворителях.

Выбор метода очистки определяется конструкцией детали, а также требованиями к состоянию их поверхностей. Наиболее распространены методы погружения, введения излучателя в полость очистки, контактный и непрерывно-последовательный.

При очистке **методом погружения** мелкие детали помещают в сетчатые корзины или барабаны и погружают в ультразвуковую ванну, располагая их как можно ближе к поверхности излучателей. При этом барабаны непрерывно вращаются, либо совершают качательные движения в ванне относительно излучателей. Детали в процессе очистки непрерывно поворачиваются, и все их участки оказываются в зоне ультразвукового воздействия.

Метод очистки детали введением излучателя в зону обработки применяется для деталей, имеющих глубокие глухие отверстия, канавки, карманы и другие полости. Очистка производится специальными волноводами продольных и изгибных колебаний. Для очистки внутренних поверхностей цилиндров большого диаметра применяются погружные полые излучатели радиальных колебаний.

Контактный метод применяют для очистки труднодоступных внутренних полостей тонкостенных изделий. Ультразвуковые колебания передаются стенкам очищаемых изделий и уже они работают как излучатель ультразвука. Однако необходимо иметь в виду, что:

- контакт с излучателем прецизионной поверхности детали может вызвать ее повреждение;
- возбуждение в детали знакопеременных напряжений может вызвать ухудшение ее геометрической формы.

Для ультразвуковой очистки крупногабаритных деталей, а также движущихся заготовок применяют **непрерывно – последовательный метод** (очищаемое изделие перемещается над поверхностью излучателей). Этот метод отличается высокой производительностью и степенью автоматизации. Он широко применяется на крупных металлургических предприятиях.

Как правило, после ультразвуковой очистки следуют операции удаления остатков моющего раствора, пассивации и сушки деталей.

6.7 Размерная ультразвуковая обработка свободным абразивом

6.7.1 Сущность процесса

Инструменту 1 (рисунок 6.26) сообщаются ультразвуковые колебания с частотой 18-44 кГц и амплитудой 10-60 мкм. Используются продольные колебания, но можно применять поперечные и крутильные. В состав колебательной системы входит магнитострикционный или пьезокерамический преобразователь 2 и стержневой концентратор 3 с коэффициентом усиления по амплитуде 5-20. Торец инструмента прижимается к поверхности обрабатываемой заготовки 4 с постоянной силой 20-200 Н.

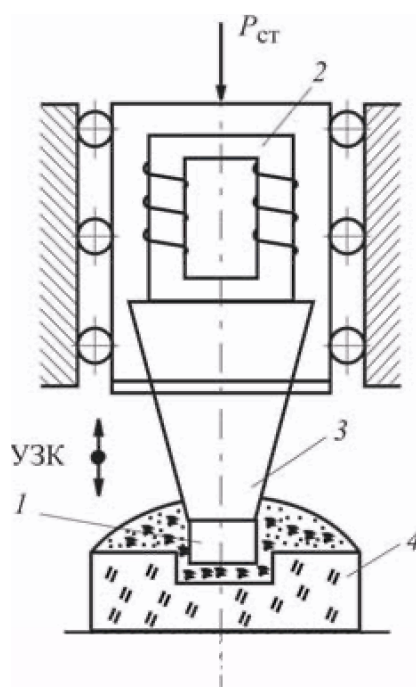


Рисунок 6.26 – Схема ультразвуковой размерной обработки:
1 – инструмент; 2 – ультразвуковой преобразователь; 3 – концентратор; 4 – обрабатываемая заготовка

В рабочую зону, т.е. в пространство между колеблющимся торцом инструмента и заготовкой, подается абразивная суспензия. Инструмент ударяет по зернам абразива и

выкалывает частички заготовки. Так как количество ударов велико, то при определенных условиях процесс протекает эффективно.

В основе ультразвуковой размерной обработки лежат два процесса:

- ударное внедрение абразивных зерен в материал заготовки и его выкалывание;
- циркуляция суспензии в рабочей зоне, приводящая к выносу из нее выколотых частиц и доставке свежих абразивных зерен.

При ультразвуковой размерной обработке одновременно происходит хрупкое разрушение обрабатываемого материала и вязкое разрушение стального инструмента. При ударе торца инструмента по наиболее выступающим абразивным зернам их вершины вдавливаются в поверхностные слои как детали, так и инструмента (рисунок 6.27).

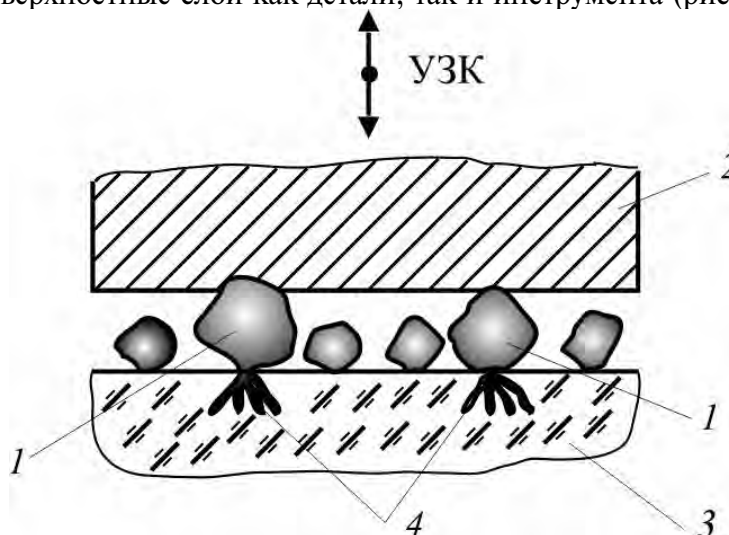


Рисунок 6.27 – Схема взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки и инструмента в процессе ультразвуковой размерной обработки:
1 – абразивные зерна; 2 – колеблющийся инструмент; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – зона предразрушения на поверхности заготовки

Главное резание осуществляется абразивными зернами, получающими энергию от рабочего торца инструмента. Побочное резание осуществляется зернами между боковыми поверхностями заготовки и инструмента. Оно возрастает по мере углубления инструмента в деталь. Для его уменьшения на инструментах делают обратную конусность, применяют внутреннюю подачу абразивной суспензии и т.д.

При ультразвуковой размерной обработке главное движение - колебание инструмента с ультразвуковой частотой. Его средняя скорость находится в пределах 0,6-6 м/с.

6.7.2 Влияние технологических и акустических параметров на показатели размерной обработки

Материал заготовки. При ультразвуковой обработке все материалы разделены на три группы. В основу положен критерий хрупкости t_x (отношение сопротивления материала сдвигу ϕ к сопротивлению на отрыв y).

Материалы первой группы - стекло, кварц, ситалл, керамика, кремний и другие имеют $t_x \geq 2$. В процессе ультразвуковой обработки они практически не подвергаются пластической деформации.

У второй группы $1 < t_x < 2$. Это твердые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, вольфрам, титановые сплавы. У них наряду с упругими

деформациями происходят и микропластические деформации, которые затрудняют диспергирование материала.

К материалам третьей группы относятся мягкие стали, свинец и другие, имеющие $t_x < 1$. В этом случае почти вся работа абразивных зерен расходуется на микроскопическую деформацию поверхностных слоев и разрушения материала почти не происходит.

Абразивная суспензия. Наиболее широко при ультразвуковой обработке применяют карбид бора, который хорошо смачивается и переносится водой. При обработке стекла, германия, кремния используются карбид кремния, электрокорунд. Применение добавок, оказывающих химическое действие на обрабатываемый материал, позволяет существенно повысить производительность.

С уменьшением размера абразивных зерен производительность снижается, особенно, если размер зерна меньше амплитуды колебаний. Однако, чем меньше абразивное зерно, тем выше точность обработки. В процессе работы происходит разрушение абразивных зерен, поэтому производительность в начале обработки больше, чем в конце.

Для оптимальной концентрации абразива необходимо, чтобы на обрабатываемой поверхности укладывался один слой зерен абразива. Иначе они в зоне обработки будут располагаться в несколько слоев, что увеличивает долю работы по диспергированию самих зерен и снижает производительности обработки.

Амплитуда и частота колебаний инструмента определяют скорость главного движения резания. Чем они больше, тем выше производительность обработки.

Однако при малых размерах зерна и при больших амплитудах колебаний ($\frac{2A_0}{d_a} > 1$) происходит не внедрение зерен в обрабатываемую поверхность, а их интенсивное дробление. Когда амплитуда колебаний мала, а зерна абразива крупные ($\frac{2A_0}{d_a} < 0,5$), импульс ударной силы, действующий на зерно, оказывается недостаточным для внедрения зерен в обрабатываемый материал и его разрушения.

Статическая нагрузка $P_{ст}$. Оказывает существенное влияние не только на значение ударных импульсов, сообщаемых абразивным зернам, но и на состояние зерен и их концентрацию под торцом инструмента.

Увеличение силы подачи до момента, пока не начнет проявляться демпфирование колебаний, приводят к увеличению импульса ударных сил и глубины внедрения зерен абразива, в результате чего возрастает производительность. Однако увеличение статической нагрузки уменьшает среднее расстояние между торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью заготовки, что ухудшает условия поступления в зону обработки свежего абразива и удаления из нее продуктов износа.

6.7.3 Точность размерной обработки

Факторы, которые влияют на точность ультразвуковой размерной обработки: размер зерен абразива, твердость обрабатываемого материала, форма инструмента и величина поперечных колебаний.

Минимальная погрешность ограничивается предельными изменениями размера бокового зазора. Обычно этот размер в 1,5 раза больше среднего размера d_a зерна абразива основной фракции. С уменьшением размера зерна точность размерной обработки возрастает.

На точность размеров сквозных отверстий основное влияние оказывают точность изготовления инструмента, точность копирования его формы и величина поперечных

колебаний инструмента. При получении глухих отверстий также влияет износ инструмента из-за ударов абразивных зерен, кавитации и истирания.

Поперечный износ происходит в результате того, что боковые стенки инструмента у рабочего торца дольше подвергаются воздействию абразивных зерен, чем участки более удаленные от торца инструмента.

Поэтому инструменты выполняют с обратной конусностью. При обработке труднообрабатываемых деталей на большую глубину кроме обратной конусности на конце инструмента изготавливают калибрующую ленточку. Также используют так называемый «грибковый» инструмент (рисунок 6.28). Разность диаметров $D_0 - D = 0,6 \div 1$ мм. Ширина направляющих ленточек $l = 1-3$ мм. Это позволяет снизить силу трения между инструментом и стенками обрабатываемого отверстия, улучшить циркуляцию абразивной суспензии и удаление продуктов разрушения, что повышает точность обработки.

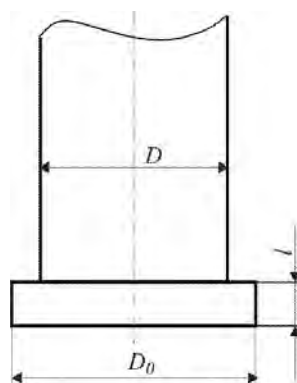


Рисунок 6.28 – Конструкция инструмента для обработки хрупких материалов на большую глубину

За счет поперечных колебаний инструмента происходит «разбивка» отверстия, т.е. его поперечные размеры оказываются больше соответствующих размеров инструмента. При точной выверке инструмента и заготовки некруглость отверстия, получаемых при чистовых операциях, не превышает 10 мкм.

Материалы с крупнозернистой или комковатой структурой (корунд, карбид кремния, ферриты) невозможно обработать с высокой точностью, в силу того, что при ударах они скалываются крупными частицами.

В общем случае при ультразвуковой размерной обработке погрешность изготовления обеспечивается в пределах 15-20 мкм.

6.7.4 Качество поверхности

Шероховатость обработанной поверхности пропорционально среднему размеру абразивных зерен, т.е. зернистости. В значительной степени на шероховатость оказывают влияние свойства обрабатываемого материала. При обработке материалов с крупной зернистой структурой из-за скалывания крупных частиц получить поверхность с высоким качеством не удастся.

По мере увеличения амплитуды колебаний шероховатость обработанной поверхности возрастает, так как возрастают силы, действующие на зерно и растет средняя глубина внедрения абразивных зерен.

Шероховатость обрабатываемой поверхности зависит и от состояния рабочих поверхностей инструмента, так как неровности на них копируются на поверхности заготовки. Формирование макро- и микронеровностей на поверхности инструмента происходит в результате кавитационной эрозии.

При чистовых операциях высота микронеровностей рабочих поверхностей инструмента должна быть в 2-3 раза меньше требуемой высоты микронеровностей детали.

6.7.5 Производительность размерной ультразвуковой обработки

Характеризуется скоростью съема материала заготовки и при постоянном поперечном сечении инструмента определяется скоростью подачи.

Производительность Q_s (мм/мин) можно рассчитать по эмпирической формуле

$$Q_s = \psi(A_0 P_{ст})^a f^b, \quad (6.23)$$

где ψ - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и абразивной жидкости;

$a = 0,5-1$ и $b = 0,5-1$ - показатели степени, зависящие от условий обработки;

A_0 - амплитуда колебаний, мкм;

$P_{ст}$ - сила подачи, Н;

f - частота, Гц.

При увеличении амплитуды колебаний A_0 инструмента увеличивается производительность обработки.

Размерную ультразвуковую обработку целесообразно применять только для хрупких материалов, имеющих $t_x > 1$. Чем выше твердость абразивных зерен и их размер, тем больше производительность, что также отражается в формуле коэффициентом ψ .

С повышением концентрации абразивной суспензии до определенного значения наблюдается рост производительности за счет возрастания количества зерен под инструментом. Оптимальные условия обеспечиваются при массовом отношении карбида бора к воде 1:1-1:2. При большей концентрации суспензия становится очень густой, и ухудшаются условия циркуляции абразива. Более того, зерна абразива располагаются в несколько слоев, в результате чего производительность процесса снижается, а износ инструмента возрастает.

При работе без статической нагрузки скорость процесса резко падает. Оптимальное значение силы подачи подбирается экспериментально и ее значение при размерной обработке составляет $P_{ст} = 20-200$ Н.

Производительность обработки зависит от глубины и площади обрабатываемого отверстия. По мере углубления инструмента в заготовку возрастает относительная доля побочного резания. Это увеличивает силы трения между инструментом и заготовкой и ухудшает условия поступления в зону главного резания свежей суспензии и удаление из нее продуктов разрушения, и это вызывает снижение производительности.

Из-за износа инструмента происходит изменение размеров колебательной системы, что вызывает снижение амплитуды колебаний.

При использовании инструмента с большой площадью поперечного сечения ухудшаются условия циркуляции абразива: большинство зерен располагаются у периферийной части инструмента, а в центральной области абразива очень мало. Это вызывает при обработке глухих отверстий выпуклости в центральной части.

Повысить производительность ультразвуковой размерной обработки можно несколькими способами:

1) улучшение условий циркуляции абразивной суспензии: периодический подъем и опускание инструмента, подвод абразивной суспензии через полый концентратор, применение инструмента специальной геометрии, прокачка абразивной суспензии под давлением, или наоборот, ее отсос. Это дает возможность увеличить глубину обработки без существенного снижения производительности;

2) увеличение скорости главного движения (продольных колебаний инструмента) повышает производительность процесса. Повысить предельно допустимую амплитуду колебаний инструмента и концентратора можно, используя материалы обладающие

высоким сопротивлением усталости: легированные стали с поверхностным упрочнением инструмента;

3) повысить производительность можно увеличивая частоту колебаний. Однако при низких частотах резонансные системы менее чувствительны к изменению размеров за счет износа инструмента;

4) увеличить производительность можно переводя металл в хрупкое состояние различными способами (например, понижая температуру). Однако реализация этого способа сложна и, кроме того, при низких температурах ухудшаются условия циркуляции абразива.

6.7.6 Основы технологии ультразвуковой размерной обработки

Преимущества перед обычными процессами резания:

- процесс высокопроизводителен при обработке твердых хрупких материалов;
- возможность копирования сложной формы инструмента и фасонной обработки;
- низкая сила резания.

Ультразвуковая размерная обработка применяется при изготовлении твердосплавных волоочильных фильер, пуансонов и матриц, обработки искусственных и естественных камней, включая алмазы.

6.7.6.1 Обработка деталей по наружному контуру

Чаще всего производят путем вырезания из плоских заготовок-пластин.

Применение ультразвуковой размерной обработки эффективно за счет сокращения числа операций при формообразовании прецизионных деталей сложного профиля из ферритов, кварца и керамики.

Инструменты для такой обработки выполняются сборной конструкции. К оправке с резьбовых хвостовиком припаивают профильную рабочую часть (рисунок 6.29). Точность размеров внутреннего контура составляет при этом 0,02 мм, материал инструмента - сталь 45.

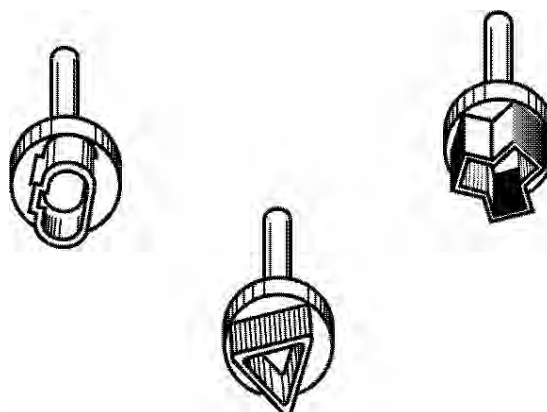


Рисунок 6.29 – Примеры ультразвуковых инструментов для вырезания деталей сложной формы

Погрешность размеров составляет 0,02-0,04 мм с шероховатостью $Ra = 1-1,8$ мкм. При вырезании круглых заготовок ей сообщают вращение, что позволяет повысить производительность операции и уменьшить погрешность до 0,01 мм.

Наиболее эффективной является обработка деталей групповым многоместным инструментом (рисунок 6.30).

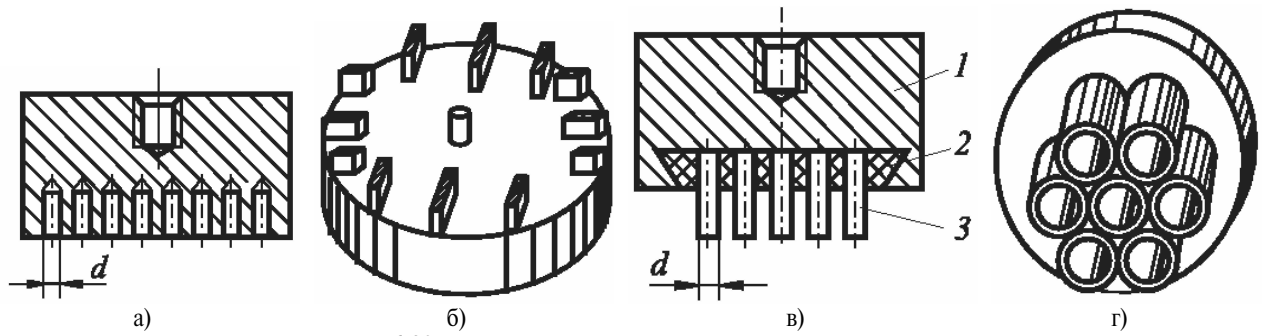


Рисунок 6.30 – Многоместные ультразвуковые инструменты:
1 – обойма; 2 – припой; 3 – инструмент

6.7.6.2 Разрезание заготовок и раскрой материала

Для разрезания и раскроя заготовок из кварца, кремния, феррита и рубина может применяться одиночные (рисунок 6.31а) и многоместный инструмент (рисунок 6.31б).

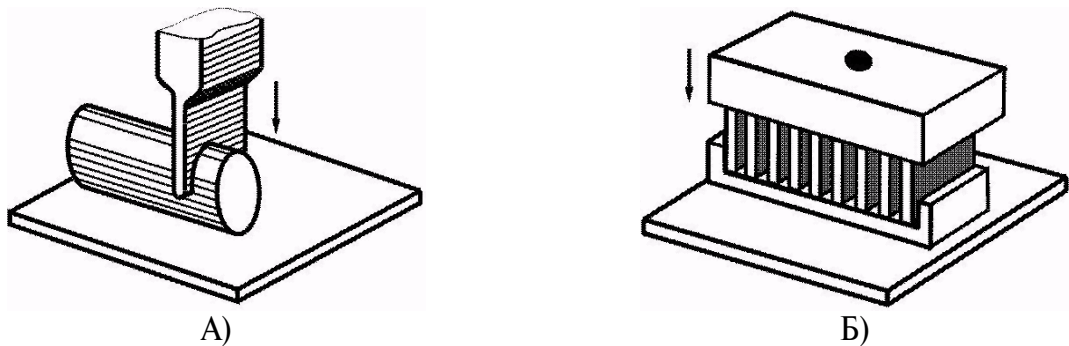


Рисунок 6.31 – Схема ультразвукового разрезания заготовок:
а – одиночным инструментом; б – многоместным инструментом

Обработку одиночным инструментом применяют в опытном производстве, а также при значительных размерах заготовок (диаметр более 20 мм и толщиной свыше 2 мм). Чтобы предотвратить сколы материала на выходе инструмента заготовку перед обработкой приклеивают мастикой к стеклянной подкладке, а также применяют следующую технологию (рисунок 6.32). Брусок разрезают на части. Затем его наклеивают на стеклянную прокладку 2 и алмазным кругом шлифуют перемычку, связывающую заготовку. Шлифование осуществляется вдоль стрелки А. После расклеивания получают сразу шесть пластин - заготовок 1.

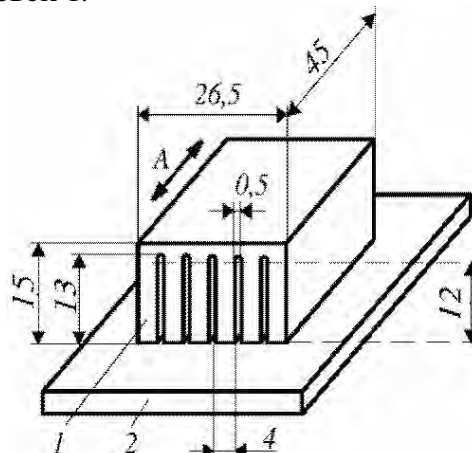


Рисунок 6.32 – Схема изготовления пьезодатчиков из кварца

Известен способ ультразвуковой обработки движущимся непрофилированным инструментом - тонкой проволокой. Для возбуждения в подвижном инструменте ультразвуковых колебаний используют три варианта акустических систем (рисунок 6.33).

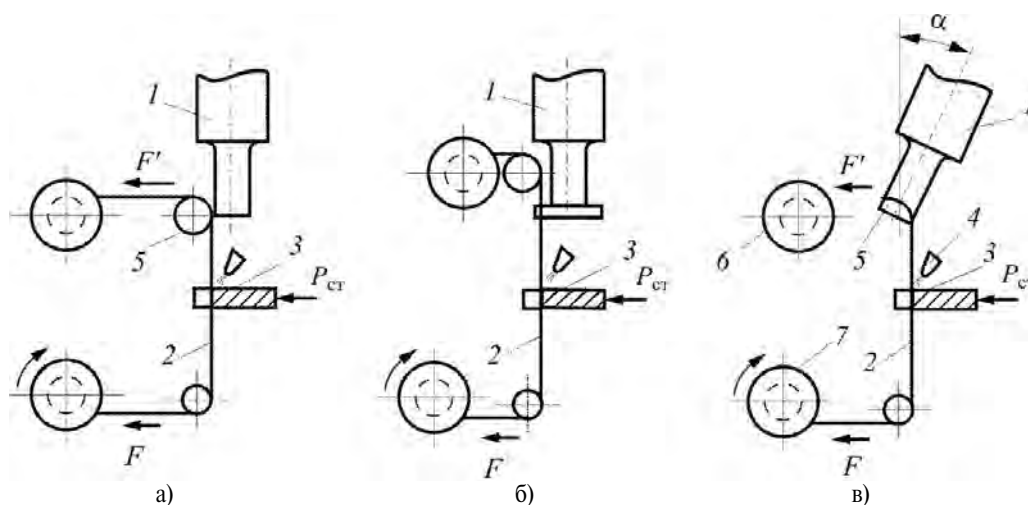


Рисунок 6.33 – Принципиальные схемы ультразвуковой размерной обработки непрофилированным инструментом

В первом случае (рисунок 6.33а) инструмент принимается к боковой поверхности концентратора подпружиненным роликом 5, и за счет сил трения в проволоке 2 возбуждаются ультразвуковые колебания. На рисунке 6.33б проволока 2 протягивается с небольшим натягом через фильеру, установленную в пучности колебаний концентратора. На рисунке 6.33в инструмент огибает концентратор 1 по радиусной канавке, а прижим проволоки 2 к концентратору осуществляется за счет ее противонатяжения.

Наилучшим является последний вариант, обеспечивающий стабильное протекание процесса при различных диаметрах инструмента.

Обработка по этой схеме осуществляется следующим образом. В натянутой между двух опор проволоке - инструменте 2 постоянно перематываемой с одной катушки 6 на другую катушку 7, возбуждаются ультразвуковые колебания от концентратора 1 с помощью шипа 5. Обрабатываемую заготовку 3 с небольшим усилием прижимают к инструменту, а в зону их контакта подается абразивная суспензия 4.

На производительность процесса и точность обработки влияют сила натяжения рабочего участка инструмента F и сила подачи $P_{ст}$ детали.

Увеличение силы F приводит к росту сил трения пары инструмент - волновод и росту периодических продольных сил в рабочей части инструмента. Если реализуются условия скользящего (безотрывного) акустического контакта, в инструменте возникают изгибные колебания.

6.7.6.3 Обработка отверстий

Так обрабатывают отверстия различной формы диаметром от 0,2 до 80 мм и глубиной более 20-30 мм. Обработку на глубине 15-20мм выполняют при прокатке под давлением или вакуумном отсосе суспензии.

Ультразвуковую обработку глубиной более 30 мм целесообразно осуществлять алмазным инструментом на металлической связке.

Для предотвращения сколов на выходе инструмента приклеивают защитные подкладки из стекла, ведут обработку пакетов заготовок, а также снижают статическую нагрузку в конце обработки.

На входе инструмента наблюдается скругление кромок на заготовке. Для устранения этого применяют защитные накладки или оставляют припуск по толщине, который после ультразвуковой обработки сошлифовывают. Применяют одиночные и многоместные инструменты.

В мелкосерийном производстве установку заготовки при ультразвуковой обработке отверстий одиночными инструментами производят при помощи специальных кондукторных втулок (рисунок 6.34).

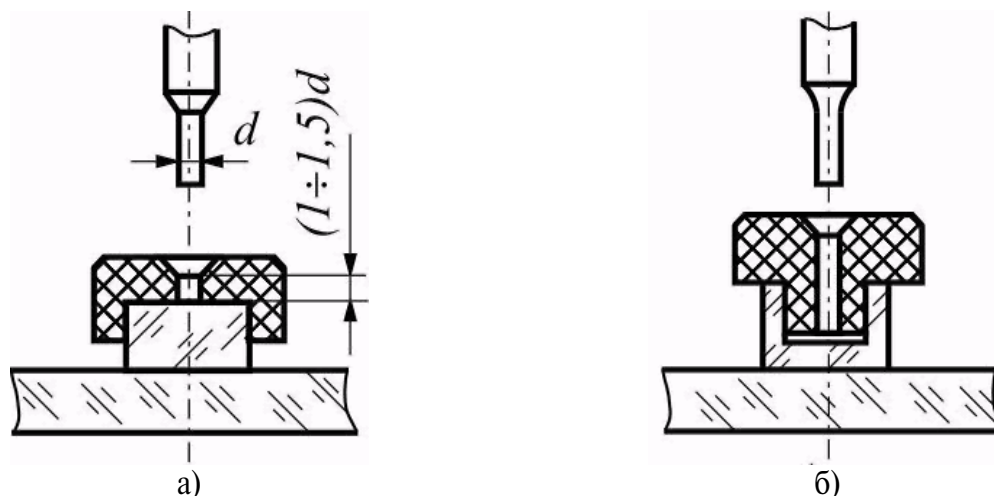


Рисунок 6.34 – Схемы ультразвуковой обработки отверстий по кондуктору:
а – с базированием по наружному контуру; б – с базированием по внутреннему контуру

Распространенным является применение ультразвука при изготовлении алмазных фильер (волокон). Черновая обработка (прошивание) отверстий в них осуществляется с помощью лазера, а чистовая – ультразвуковым методом. В качестве инструмента используются сменные иглы, имеющие соответствующую геометрию рабочей части, которые закрепляются на выходном торце ультразвукового преобразователя. Обработка осуществляется при относительном вращении заготовки и инструмента с подачей в зону обработки алмазной суспензии.

6.7.6.4 Гравирование

Ультразвуковое гравирование стеклянных изделий может реализовываться тремя способами:

рисунок образуют сочетанием неглубоких (0,2-0,4 мм) линий и участков, вырезанных ультразвуковым способом, с оставшимися нетронутыми участками полированной поверхности изделия;

линии рисунка наносят последовательно непрофилированным инструментом;

объемное ультразвуковое гравирование. В первом случае на торце инструмента имеется гравированный на глубину 0,5-1,5 мм рисунок, который отпечатывается сразу по всей поверхности за несколько секунд. Недостатком этого способа является ограниченный размер рисунка (не более 100-120 мм) и высокая стоимость изготовления инструмента при сравнительно не высокой его стойкости (одним инструментом можно выполнить 100-300 отпечатков). Во втором случае рисунок выполняют вручную или по трафарету тонким инструментом с помощью ручной акустической головки. В третьем случае ультразвуковой метод применяют для изготовления сувениров и других художественных изделий.

При ультразвуковом гравировании надписей в качестве инструмента используют закаленную стальную проволоку, а для графирования прямых линий отрезки плоских спиральных пружин. Амплитуда колебаний инструмента порядка 20-25 мкм. В качестве абразива применяют карбид бора и карбид кремния зернистостью M28, с весовой концентрацией в воде 1:10.

6.8 Оборудование для ультразвуковой размерной обработки материалов

Ультразвуковое оборудование для механической обработки может быть стационарным (станки) и переносным. Переносные устройства имеют мощность до 20-50 Вт и применяются для ультразвукового клеймения, гравирования, сверления отверстий малого диаметра.

Стационарные станки делятся на универсальные, специальные и модернизированные металлорежущие. На универсальных и специализированных станках можно выполнять несколько операций. Оборудование для выполнения одной технологической операции создают на базе универсальных металлорежущих станков. Механизмы станка осуществляют все основные перемещения детали.

На рисунке 6.35 приведена схема ультразвукового станка. Он содержит станину 1, координатный стол 2 для закрепления заготовки 3, акустическую головку 5, включающую ультразвуковой преобразователь 6 и рабочий инструмент 4, механизм 8 подачи акустической головки и создания статической нагрузки инструмента на заготовку, источник питания (ультразвуковой генератор) 7, систему 9 принудительной подачи и сброса абразивной суспензии.

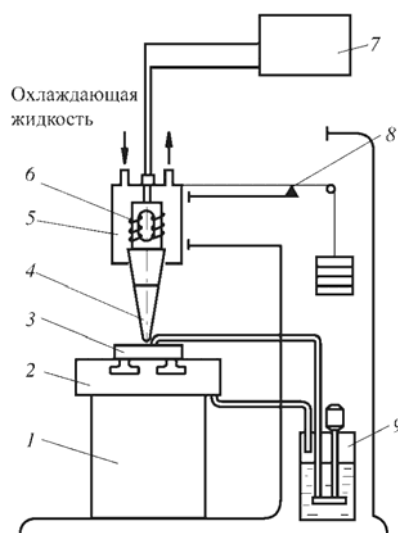


Рисунок 6.35 – Принципиальная схема ультразвукового станка

6.8.1 Механизм подачи

Механизм подачи колебательной системы в ультразвуковых станках служит для создания статической нагрузки инструмента на заготовку и для поддержания этой нагрузки при обработке. Небольшая сила трения и высокая точность определяют качество механизма подачи. Механизм подачи должен также обеспечивать безударный подвод инструмента к заготовке и возможность регулирования силы подачи.

Наиболее совершенными являются механизм подачи с электродвигателем, работающим в заторможенном режиме, и соленоидный регулятор.

На рисунке 6.36 показана кинематическая схема ультразвукового станка, в котором использован регулятор подачи с электродвигателем. Акустическая система 1 установлена на ползущке 3 каретки. С помощью асинхронного двигателя 8, шестерен 7 и 5 и зубчатой рейки 6, каретка перемещается вертикально.

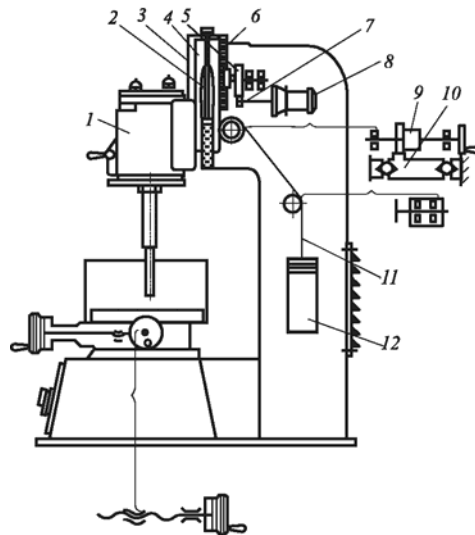


Рисунок 6.36 – Кинематическая схема ультразвукового станка с регулятором подачи с электродвигателем

Чтобы уменьшить усилия при перемещении, вес ползушки 3 и акустической головки 1 скомпенсирован противовесом 12, подвешенным на ленте 11. Противовес расположен в полости вертикальной части станины. Каретку можно перемещать также вручную, вращая колесо 9, находящееся в зацеплении с рейкой 10. Двигатель 8 может длительное время находиться в заторможенном состоянии, т.е. при неподвижном вале он продолжает развивать вращающий момент, прижимающий инструмент к заготовке. Момент зависит от подаваемого на двигатель напряжения, регулируемого потенциометром. Двигатель обеспечивает как быстрые установочные перемещения, так и требуемую силу подачи. В схему включено реле периодического подъема и опускания инструмента. Чтобы инструмент плавно подходил к заготовке применен гидравлический демпфер, цилиндр 2 которого прикреплен к корпусу каретки, а шток 4 к ползушке.

На рисунке 6.37 приведена схема подачи с соленоидным регулятором. Колебательная система 1 расположена в шпинделе 5, выполненном в виде полого цилиндра. Шпиндель 5 перемещается вертикально по шариковым направляющим, вес шпинделя через рычаг 7 скомпенсирован противовесом 8. Высокая чувствительность механизма подачи обеспечена применением ножевых опор 6 рычага 7. Для быстрого отвода шпинделя и регулирования усилия подачи служит соленоид 9, сердечник которого является деталью противовеса 8. Изменяя силу тока через соленоид, можно менять усилие подачи по заданной программе.

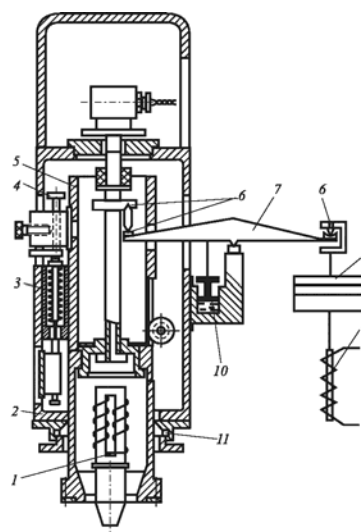


Рисунок 6.37 – Принципиальная схема механизма подачи ультразвукового станка с соленоидным регулятором

Цанговый зажим 11 шпинделя 5 в корпусе 2 устраняет передачу крутящего усилия инструмента на шариковые направляющие. Чтобы исключить возможность резкого изменения подачи при ходе шпинделя вниз, применен масляный демпфер 10 одностороннего действия.

Для уменьшения силы подачи при обработке сквозных отверстий использовано специальное устройство: вместе со шпинделем 5 опускается жестко связанный с ним стержень 4. Он сжимает пружину 3, что приводит к снижению силы подачи.

6.8.2 Универсальные ультразвуковые станки

Универсальные ультразвуковые станки имеют одну рабочую позицию с вертикальным расположением акустической головки. По выходной мощности генератора станки разделяются на

- 1) станки малой мощности (0,03-0,3кВт);
- 2) станки средней мощности (0,25-1,5кВт);
- 3) станки большой мощности (до 4 кВт).

Станки первой группы применяются для обработки неглубоких отверстий диаметром 0,15-10 мм и в таких станках обычно используются преобразователи из пьезокерамики или феррита.

Наиболее распространены станки средней мощности.

На рисунке 6.38 показан настольный станок мощностью 0,4 кВт, который может работать с абразивной суспензией и с алмазным инструментом.

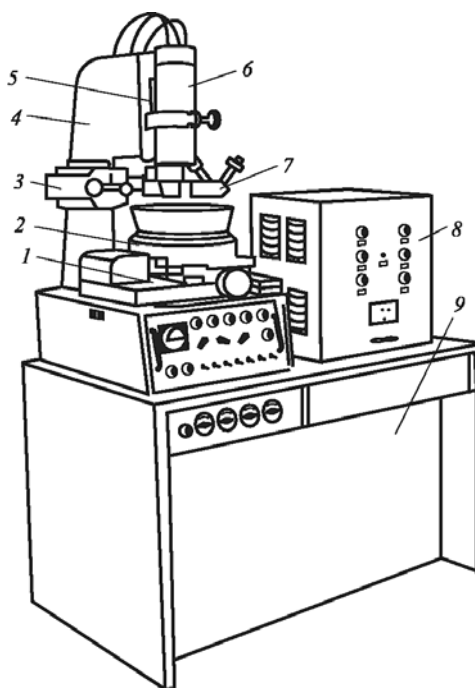


Рисунок 6.38 – Общий вид настольного ультразвукового станка мощностью 0,4 кВт

На массивной станине 4 расположен стол 2 для закрепления заготовок. Стол оснащен механизмами 1 для перемещения заготовки в двух взаимно перпендикулярных направлениях и ее поворота. В верхней части станины расположена каретка 5 с акустической головкой 6.

Колебательная система закреплена в полем стакане и вращается вокруг оси. Вертикальная подача при постоянной силе осуществляется электродвигателем с регулируемым вращающим моментом. Предусмотрены грубая и точная регулировка подачи, можно работать с периодическим отводом инструмента.

Для контроля амплитуды колебаний и износа инструмента станок снабжен микроскопом 7. Имеется устройство 3 для правки инструмента.

Генератор 8 станка выполняется в виде отдельного блока. Насос для подачи рабочей жидкости и система охлаждения магнитно-стрикционного преобразователя смонтированы в тумбе 9 стола.

На рисунке 6.39 представлена вторая базовая модель с мощностью генератора 1,6 кВт.

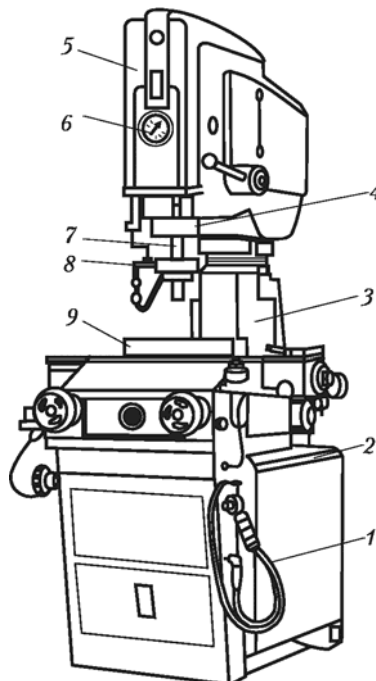


Рисунок 6.39 – Общий вид ультразвукового станка мощностью 1,6 кВт

На литой станине 2 расположен координатно-поворотный стол 9. В станине на опорах качения смонтирована колонна 3, которая может перемещаться в вертикальном направлении по направляющим станины с помощью электродвигателя и редуктора. С колонной 3 жестко связана шпиндельная головка 5, а в ней на опорах качения установлен шпиндель 4. В полости шпинделя закреплена колебательная система 7. В полости станины расположены бак с абразивной суспензией, помпа для ее подачи под давлением. Подача суспензии может осуществляться поливом через кольцо 8. Для промывки заготовок и стола от остатков суспензии станок имеет душевое устройство 1. Контроль глубины осуществляется по индикатору 6.

6.8.3 Акустические головки

При изготовлении деталей небольшими партиями целесообразно применять акустические головки, которые устанавливаются на металлорежущих станках. Головки бывают вращающимися и не вращающимися, с автономным двигателем и без него.

Вращающаяся головка для ультразвукового сверления с магнитострикционным преобразователем (рисунок 6.40) состоит из преобразователя 1, концентратора 2 и рабочего инструмента 3. Инструмент соединяется с концентратором с помощью резьбового соединения.

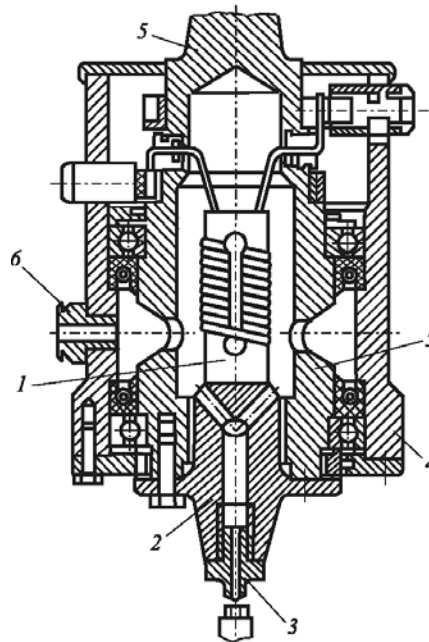


Рисунок 6.40 – Устройство вращающейся акустической головки с магнитострикционным преобразователем

На стержне преобразователя размещена обмотка, к которой подводится питание генератора. Внутри неподвижного корпуса 4 на шариковых подшипниках вращается подвижный корпус 5 который для снижения массы выполнен из титанового сплава. Охлаждающая жидкость через штуцер 6 поступает во внутреннюю полость алмазного сверла, охлаждая зону резания и вымывая шлак.

На рисунке 6.41 показана схема вращающейся головки с пьезокерамическим преобразователем. Преобразователь состоит из двух пластин 1, соединенных резьбовой шпилькой 2. Корпус инструмента 3 с алмазосной частью закрепляется в излучающей накладке с помощью резьбового соединения. Питание к пластинам подводится через медные кольца и графитовые щетки. Головка имеет подвижный 4 и неподвижный 5 корпуса. Пьезокерамический преобразователь не требует водяного охлаждения.

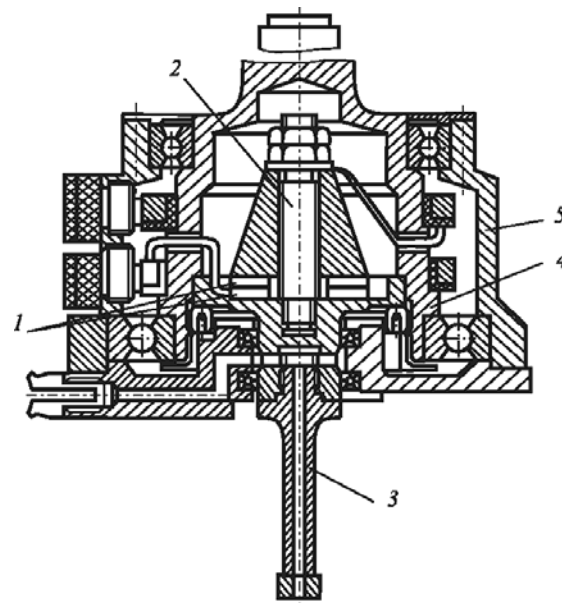


Рисунок 6.41 – Устройство вращающейся акустической головки с пьезокерамическим преобразователем

6.9 Ультразвуковая сварка (УЗС) металлов

Благодаря возможности соединения разнородных и разнотолщинных металлов без удаления оксидных плёнок, УЗС нашла широкое применение. Она обладает незначительным термическим влиянием на свариваемый материал по сравнению со сваркой плавлением и быстрее диффузионной сварки.

6.9.1 Основные сведения о механизме процесса ультразвуковой сварки металлов

На рисунке 6.42 приведена схема ультразвуковой сварки металлов. Соединяемые детали 2 и 3, расположенные между опорой 1 и сварочным наконечником 4, сжимаются силой $P_{св}$, действующей нормально к поверхности их соприкосновения. От преобразователя 6, возбуждаемого генератором 7, через концентратор 5 продольные ультразвуковые колебания сообщаются сварочному наконечнику 4, а от него свариваемым деталям. При этом деталь, контактирующая со сварочным наконечником, имеет большую амплитуду, чем вторая деталь.

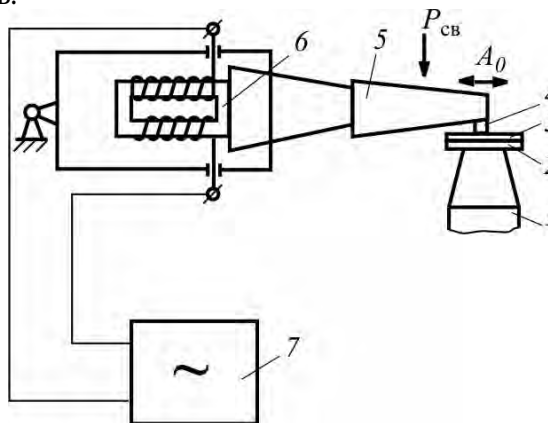


Рисунок 6.42 – Схема установки для ультразвуковой сварки с продольными колебаниями:
1 – опора; 2 и 3 – свариваемые детали; 4 – сварочный наконечник; 5 – концентратор; 6 – магнитострикционный преобразователь; 7 – ультразвуковой генератор

Формирование ультразвукового соединения металлов зависит от амплитуды колебаний сварочного наконечника A_0 и силы $P_{св}$, сжимающей детали (рисунок 6.43). Свариваемые детали 2 и 3 в виде тонких пластин зажимаются с усилием $P_{св}$ между цилиндрическим сварочным наконечником 1 и плоской опорой 4. Колебания наконечника происходят в плоскости, совпадающей с поверхностью верхней детали. Из-за периодического изменения напряжений в пластине 2 наконечник погружается в нее.

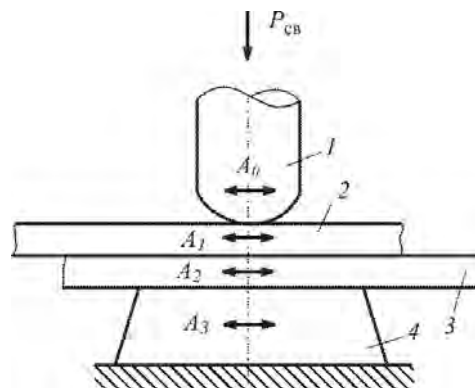


Рисунок 6.43 – Схема ультразвуковой сварки металлов:
1 – сварочный наконечник; 2 и 3 – свариваемые детали; 4 – опора

Колебания сварочного наконечника вызывают колебания пластин и опоры с амплитудами A_0, A_1, A_2, A_3 уменьшение которых происходит из-за поглощения энергии колебаний в контактных областях. На пластину со стороны наконечника действует сосредоточенная сила $F_x \sin \omega t$.

Введем сосредоточенную силу $F'_x \sin \omega t$ при условии $F'_x < F_x$. Эта сила вызывает касательные колебательные смещения верхней пластины с амплитудой A_1 в зоне сварки.

В процессе сварки между этими силами существует соотношение

$$F'_x \leq \mu N, \quad (6.24)$$

где μ - коэффициент сухого трения ($\mu \leq 1$);

μN - сила трения.

Пока выдерживается неравенство $F'_x < \mu N$, обе пластины будут колебаться без проскальзывания. Когда $F'_x = \mu N$, возникает проскальзывание пластин.

При $F'_x > \mu N$ в зоне сварки имеют место процессы, связанные с сухим трением скольжения: происходит схватывание вершин контактирующих микронеровностей соединяемых поверхностей и затем разрушение вблизи узла схватывания. Этот процесс повторяется многократно. Со временем число узлов схватывания растет, а металл вблизи них находится в высокопластичном состоянии, что способствует образованию сплошного соединения. В таком соединении структура металла искажена, в сравнении с первоначальной, и имеют место значительные остаточные напряжения, снижающие его прочность.

Когда $F'_x \leq \mu N$, то вершины соприкасающихся микронеровностей деформируются при отсутствии относительного скольжения. Под совместным действием нормальных и тангенциальных напряжений происходит лишь пластическое растекание вершин контактирующих микронеровностей, сближение соединяемых поверхностей и затем диффузионное "сращивание" зерен металла обеих деталей. В этом случае структура зоны соединения практически не отличается от исходного металла.

Исследования тепловых процессов показали, что выделение тепла вначале обусловлено потерями при деформировании микронеровностей. Затем добавляется рассеивание энергии ультразвуковых деформаций в зонах схватывания. При этом максимальная температура при сварке не более 0,4-0,5 температуры плавления, а скорости протекания процессов, обуславливающих соединение, велики.

6.9.2 Акустические колебательные системы для сварки металлов

В состав колебательной системы входит резонансный магнитострикционный или пьезокерамический преобразователь 1 и концентратор полуволновой или волновой длины 2 со сварочным наконечником 3. Длина опоры 4 в сварочных установках с изгибными и крутильными колебаниями выбирается близкой к нечетному числу $\lambda / 4$, где λ - длина волны выбранной моды изгибных или крутильных колебаний в материале опоры.

Для сварочного оборудования характерно ограниченное число компоновочных схем (рисунок 6.44).

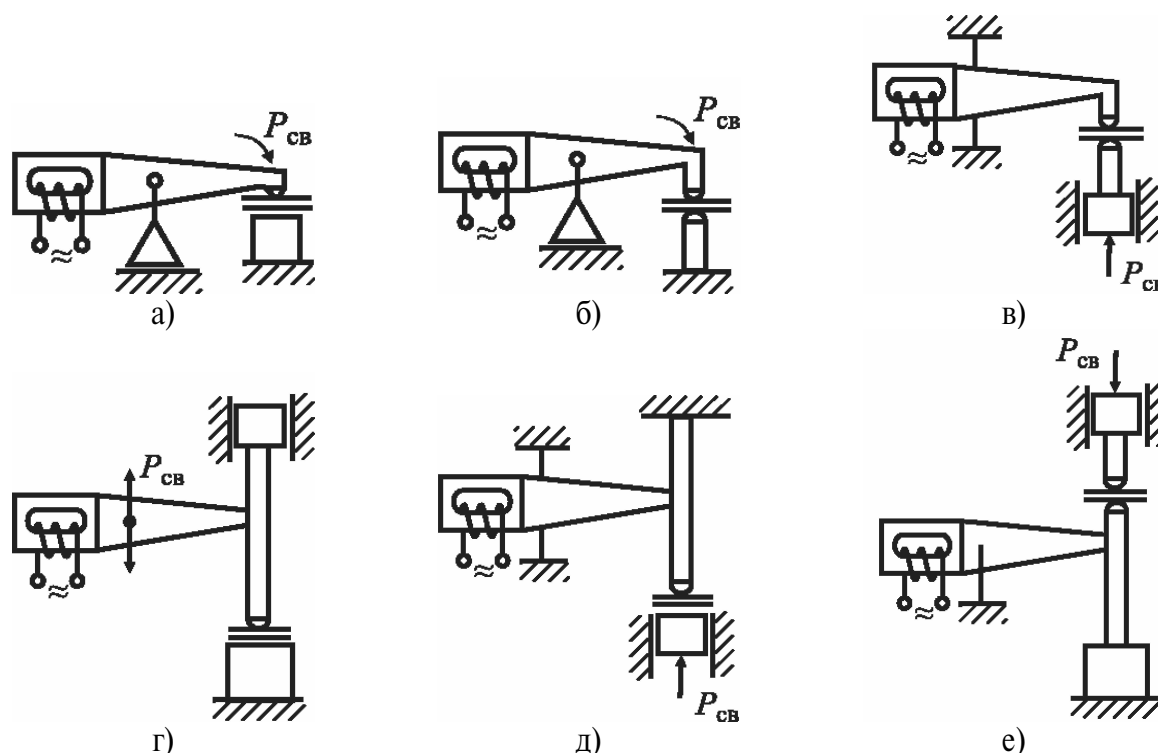


Рисунок 6.44 – Принципиальные кинематические схемы машин для ультразвуковой сварки металлов

Применение машин для сварки металлов с продольной системой (рисунок 6.44а) позволяет значительно уменьшить габариты сварочного устройства. Однако такие системы имеют крайне ограниченную зону доступа к сварочному наконечнику. Более широкими технологическими возможностями обладают машины, использующие резонансные стержни, работающие в режиме изгибных колебаний (рисунок 6.44б, в, г, д, ж).

В зависимости от принятой кинематической схемы расположения акустической колебательной системы относительно привода давления машины для ультразвуковой сварки металлов можно разделить на две основные группы:

- машины, в которых акустическая колебательная система использована в качестве исполнительного элемента привода давления (рисунок 6.44а, б, г);
- машины, в которых акустическая колебательная система закреплена неподвижно и используется в качестве упорного или опорного элемента (рисунок 6.44в, д, ж).

Машины первого типа более распространены. Вся колебательная система, т.е. преобразователь, концентратор, стержень совершает поступательное движение вниз-вверх. Недостатки - необходимость подъема и опускания значительной массы акустической колебательной системы, сложность ее конструкции. Для обеспечения горизонтального положения концентратора необходимо регулировать положение опоры при изменении суммарной толщины свариваемых металлов.

Преимущества машины при закреплении акустической колебательной системы: простота конструкции, большая надежность в работе, так как исключено радиальное или поступательное движение колебательной системы. Недостаток таких машин: детали не могут занять строго фиксированного положения перед сваркой, так как при движении опоры они будут перемещаться.

Ограниченный доступ к сварочному наконечнику является одним из недостатков, свойственных машинам для ультразвуковой сварки (рисунок 6.45а).

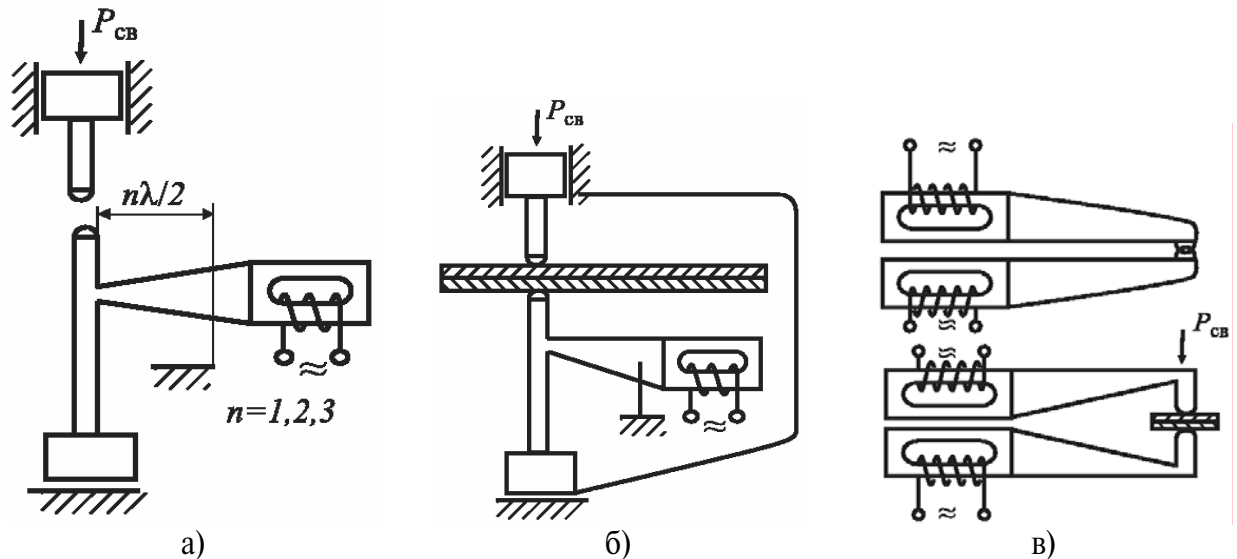


Рисунок 6.45 – Модификация акустических колебательных систем – волноводов и кинематических схем ультразвуковых сварочных головок

По условиям ввода энергии в стержень точку ее ввода рационально разместить возможно ближе к сварочному наконечнику, однако в силу симметричности концентратора существенно сокращается рабочая зона сварочного наконечника.

Применение асимметричных концентраторов, у которых одна из образующих плоскость параллельная продольной оси концентратора (рисунок 6.45б) позволяет увеличить зону доступа к сварочному наконечнику. Модификации кинематических схем сварочных головок с использованием асимметричных концентраторов приведены на рисунке 6.45в, в.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анищик, В.М. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками / В.М. Анищик, В.В. Углов. - Минск: БГУ, 2003. - 191 с.
2. Бахчисарайцыян, Н.Г. Практикум по прикладной электрохимии: учеб. пособие для вузов по специальности «Технология электрохимических производств» / Н.Г. Бахчисарайцыян [и др.]; Под ред. В.Н. Кудрявцева, В.Н. Воропаева. - Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1990. - 302 с.
3. Витлин, В.Б. Электрофизические методы обработки в металлургическом производстве / В.Б. Витлин, А.С. Давыдов. - М.: Металлургия, 1979. - 159 с.
4. Головачев, В.А. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы / В.А. Головачев [и др.]. - М.: Машиностроение, 1969. - 199 с.
5. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес; под ред. П.М. Вячеславова. - Л.: Машиностроение, 1983. - 101 с.
6. Золотых, Б.Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. - М.: Машиностроение, 1977. - 43 с.
7. Косевич, Ю.А. Нетрадиционные методы обработки материалов: учебное пособие для вузов / Ю.А. Косевич. - Москва: Станкин, 1997. - 55с.
8. Круглов, Г.А. Специальные технологические процессы: учеб. пособие для вузов / Г.А. Круглов. - Москва : Станкин, 1997. - 187 с.
9. Орлов, В.Ф. Электрохимическое формообразование / В.Ф. Орлов, Б.И. Чугунов. - М.: Машиностроение, 1990. - 239 с.
10. Попилов, Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов / Л.Я. Попилов. - Л.: Машиностроение, 1971. - 544 с.
11. Рогов, В.А. Основы высоких технологий: учеб. пособие для вузов / В.А. Рогов, Л.А. Ушомирская, А.Д. Чудаков. - Москва: Вуз. Кн., 2001. - 256 с.
12. Рыжкин, А.А. Лазерное упрочнение металлообрабатывающего инструмента: учеб. пособие для вузов / А.А. Рыжкин, Г.И. Бровер, В.Н. Пустовойт. - Ростов-на-Дону: Изд. Центр ДГТУ, 1998. - 126 с.
13. Смоленцев, В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом / В.П. Смоленцев. - М.: Машиностроение, 1967. - 159 с.
14. Смоленцев, В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей / В.П. Смоленцев. - М.: Машиностроение, 1978. - 176 с.
15. Шипко, А.А. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А.А. Шипко, И.Л. Поболь, И.Г. Урбан. - Мн.: Навука і тэхніка, 1995. - 279 с.
16. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: В 2 т. / Б.А. Артамонов [и др.]; Под ред. В.П. Смоленцева. - М.: Высшая школа, 1983. - 2 т.