

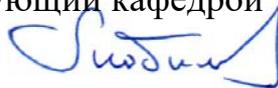
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *Политехнический*
Кафедра «Электро- и нанотехнологии»

Утверждено на заседании кафедры
«Электро- и нанотехнологий»
«19» января 2021 г., протокол №5

Заведующий кафедрой



В.В. Любимов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических занятий
по дисциплине
«Физико-химические процессы высоких технологий»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
15.03.01 Машиностроение
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»

с направленностью (профилем)
Машины и технологии высокоэффективных процессов
обработки материалов
«Машины и технология литейного производства»
«Машины и технология обработки металлов давлением»
«Оборудование и технология сварочного производства»
«Машины и аппараты пищевых производств»;

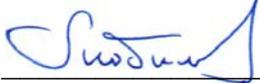
Форма обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы:
150301-01-21, 150301-02-21, 150301-03-21, 150301-04-21, 150302-02-21

Тула 2021 год

Разработчик методических указаний

Любимов В.В., профессор, докт.техн.наук, профессор
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**1.1. Цель и задачи практических занятий**

Цель занятий – приобретение практических знаний по сущности физико-химических воздействий на различные материалы, осуществляемых с целью формообразования, изменения качества поверхности и др.

1.2. Процессы воздействий на технологические объекты

В качестве процессов в ходе занятий рассматриваются в основном высокоэнергетические физико-химические процессы, имеющие место при разрушении или синтезе материалов.

1.3. Задание на практическое занятие:

- провести анализ моделей разрушения или синтеза материалов деталей при различных физико-химических процессах;
- обосновать основные факторы, влияющие на процесс разрушения или синтеза для рассматриваемого механизма обработки;
- используя предложенную технологическую схему обработки рассчитать скоростные или качественные показатели процесса воздействия;
- провести анализ результатов моделирования воздействий и полученных показателей обработки.

1.4. Порядок выполнения:

- ознакомиться с теоретическими сведениями к очередному занятию (см. раздел 2);
- ознакомиться с наиболее известными моделями рассматриваемых на данном занятии процессов;
- произвести анализ моделей воздействий и определить важнейшие факторы;
- составить технологическую схему воздействия;

- по предложенным методикам рассчитать параметры воздействия при заданных начальных и граничных условиях;
- выполнить анализ результатов расчетов;
- сформулировать выводы по работе.

1.5. Отчет о выполнении задания.

Отчет по каждому практическому занятию составляется в произвольной форме и должен содержать:

- указание цели занятия;
- краткое описание моделей воздействий для рассматриваемого процесса;
- результаты анализа и расчетов параметров;
- выводы.

1.6. Литература, рекомендуемая для практических занятий

1. Любимов В.В., Волгин В.М., Гнидина И.В., Иванов А.В., Могильников В.А. Высокие технологии в машиностроении: Учебное пособие, в 2 ч.- Тула: ТулГУ, 2011-284с.

2. Власов В.И., Григорьев С.Н. Электрофизическая и электрохимическая обработка- Библиотека технолога М.: Изд-во «ИТО», 2010.-108 с.: ил

3. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов/И.С.Куликов, С.В.Ващенко, А.Я.Каменев.-Минск: Беларус. навука, 2010.-232с.

Дополнительная литература

4. Намитокон К.К. Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456с

5. Мицкевич М.К., Бушик А.И., Бакуто И.А. Электроэрозионная обработка металлов. - Минск: Наука и техника, 1988. – 216с.

6. Воздействие лазерного излучения на материалы/ Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др.; Отв. ред. Е. П. Велихов. –М.: Наука, 1989. – 367 с. : ил.

7. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. М.: Машиностроение, 1975. 440 с.

8. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы. – М.: Наука, 1985. – 246с. 1.6.9. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. Пособие. М.: Высш. шк., 1983.-247 с., ил.

10. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304с.

11. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. М.: Машиностроение, 1999. – 309с.

12. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация: Пер. с нем. В.В. Климова, В.Н. Пальянова./ Под ред. М.И. Гусевой. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 360с.

13. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекаев, В.В. Белашенко и др. – М.: Наука, 1990. – 408с.

14. Рыкалин Н.Н. и др. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239с.

15. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. – М.: Мир, 1977.- 463 с.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Общие положения. Анализ характеристик физико-химических воздействий на материалы.

Физико-химические воздействия анализируются с точки зрения моделирования и определения условий и параметров процесса разрушения или синтеза материалов.

1. Модели процессов анализируются с точки зрения обеспечения требуемого распределения энергии по поверхности воздействия для создания заданного геометрического и качественного облика формируемой поверхности.

2. Условия процесса и его параметры определяются для прогноза качества технологического воздействия..

Поскольку каждый метод воздействия на обрабатываемую поверхность обладает специфическими особенностями, требуется анализ электрических, тепловых и других полей для определения возможности и эффективности конкретного вида воздействия на материалы.

С помощью выбранного метода расчета параметров процесса по принятой модели в зависимости от вида воздействия определяются:

Общий ток;

Скорость течения рабочей жидкости;

Распределение плотностей токов по поверхности воздействия;

Плотность энергии;

Скорость удаления(осаждения) материала;

Температура в зоне воздействия и др. параметры.

Решение задач выбора и расчета параметров воздействий обеспечивается, во-первых, наличием баз данных, содержащих информацию о материалах, обрабатываемых физико-химическими методами, о рабочих средах, оборудовании и оснастке, а, во-вторых, математическими моделями, детально описывающими процессы электрофизико-химической обработки для каждого кон-

кретного метода.

2.1. К занятию №1 Анализ энергетических характеристик физико-химических воздействий на материалы. Модели механического разрушения материалов.

На практическом занятии №1 осуществляется сравнение и анализ энергетических характеристик физико-химических воздействий на материалы.

В машиностроительном производстве используются такие технологические операции как волочение, антикоррозионное покрытие металла, сварка взрывом. Перед выполнением этих операций необходимо предварительно подготовить обрабатываемую поверхность, т.е. удалить окалину, ржавчину, окислы, старую краску, грубые загрязнения, продукты обугливания, остатки песка и шлака. Многочисленные методы подготовки поверхности под выполнение этих операций можно разделить на механические и химические. К химическим методам относятся травление серной или соляной кислотой. К механическим относятся такие как, обработка щётками, шарошками, абразивными кругами, дробеструйная и т.д. Перспективным методом очистки металла за наибольшую простоту, дешевизну и экологичность по отношению к перечисленным методам считается иглофрезерование. В качестве инструмента при иглофрезеровании используется иглофреза – режущий инструмент с несколькими сотнями тысяч режущих элементов, собранный в виде тела вращения из прямых и равных по длине отрезков высокоуглеродистой стальной проволоки – игл с твёрдостью НВ 500, с плотностью упаковки на рабочей поверхности 65...85%. Каждая проволока (игла) представляет собой микрорезец с отрицательным передним углом резания – γ . Обязательным условием работоспособности инструмента является упругость каждой иглы и всей совокупности игл, участвующих в контакте с обрабатываемым материалом. Процесс осуществляется при вращении режущего инструмента, который, будучи прижатым к поверхности движущегося изделия (либо двигаясь сам) обрабатывает последнее рис. 1.

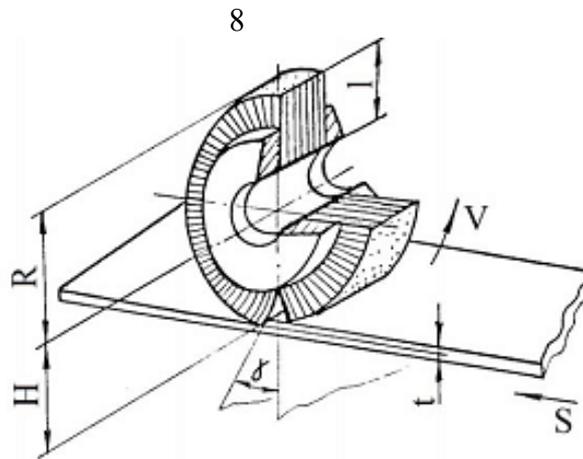


Рис.1. Схема иглофрезы и процесса иглофрезерования

Основными показателями, характеризующими процесс иглофрезерования,

являются:

- скорость резания;
- скорость подачи обрабатываемого материала;
- усилие прижима иглофрезы к поверхности обрабатываемого материала;
- натяг (величина деформации упругой системы игл);
- объём удаляемого в единицу времени материала;
- качество поверхности;
- стойкость инструмента;
- размеры и форма микростружек.

Скорость резания (V) зависит в основном от физико-механических свойств и теплостойкости материала игл. Скорость резания может возрастать с уменьшением твёрдости обрабатываемых материалов. В практике удобно подразделять обрабатываемые иглофрезами материалы условно на три весьма обширные группы по твёрдости, измеренной по Бринеллю:

- материалы, твёрдость которых не превышает НБ 100...110;
- материалы, твёрдость которых не превышает НБ 150...170;

- материалы, твёрдость которых не превышает HB 250...270.

Обрабатываемость различных материалов характеризуется коэффициентом K_0

$$K_0 = \frac{HB_u}{HB_m}$$

где HB_u – твёрдость игл;

HB_m – твёрдость обрабатываемого материала.

K_0 должен быть больше 1, следовательно, при максимальной твёрдости игл HB 500 иглофрезами могут обрабатываться материалы с твёрдостью, не превышающей HB 250...270.

Скорость подачи (S) может меняться в широких пределах также в зависимости от обрабатываемых материалов и от целей обработки, т.к. она существенно влияет на производительность, качество поверхности, размеры и форму стружек. Величина S может иметь значение 0,2...200 м/мин. Объём удаляемого материала в единицу времени (Q) – производительность, зависит от глубины резания, ширины обработки, скорости подачи и от целей обработки. При незначительных по величине глубинах резания до 0,05мм и ширине обработки, когда удаляемый в единицу времени объём зависит от скорости подачи, то подача определяет производительность процесса. Усилия прижима (N) влияет на величину деформации иглофрезы и образующийся при этом отрицательный передний угол резания γ . Усилие прижима зависит от жёсткости упругой части инструмента и ширины его рабочей поверхности. Величина деформации иглофрезы (σ) определяет толщину срезаемого слоя t , которая сильно зависит от свойств обрабатываемых материалов и скорости подачи. Определяется по формуле $\sigma = R - H$.

Задание

1. Изучить физические основы процесса микрорезания.
2. Рассмотреть особенности иглофрезерования.

- 3 Рассчитать обрабатываемость с помощью метода иглофрезерования различных материалов
4. Оформить отчет.

2.2. К занятию №2 Изучение условий технологического электроэрозионного разрушения материалов.

На практическом занятии №2 осуществляется расчет характеристик процесса электроэрозионной обработки.

Производительность электроискровой обработки, шероховатость обработанной поверхности и точность выполнения технологических процессов определяются многими факторами. Важнейшими из них являются параметры электрической схемы, определяющие режим работы; материал обоих электродов; среда, окружающая электроды, а также взаимное расположение, форма и размеры электродов.

Размеры лунки в зависимости от энергии и длительности разрядов приведены в таблице 1.1. Форма лунки, образовавшейся от энергии разряда и его длительности, представлена на рисунке 1.1.

Энергия импульса $E_{и}$ как работа электрического тока зависит от произведения силы тока I на напряжение U за время $\tau_{и}$ протекания импульса:

$$E_{и} = \int_0^{\tau_{и}} I u d\tau_{и}. \quad (1.1)$$

В первом приближении энергию $E_{и}$ можно рассчитать по средним значениям тока и напряжения:

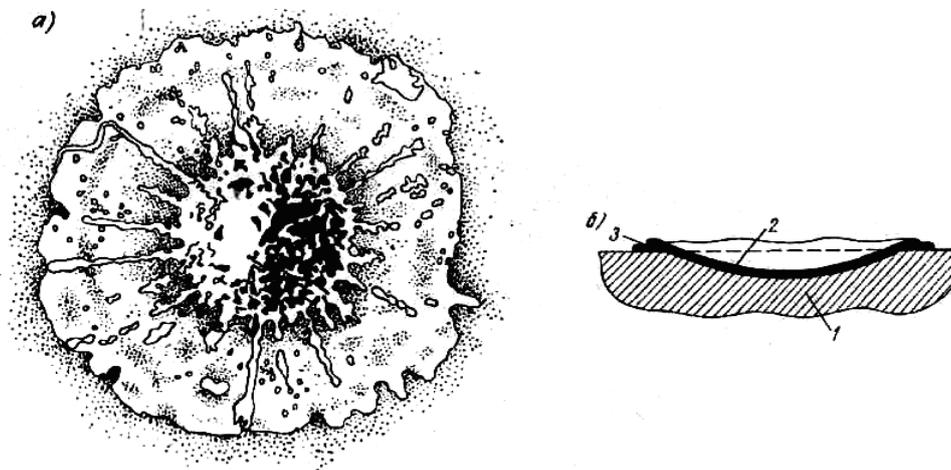
$$E_{и} = I_{ср} U_{ср} \tau_{и}.$$

Отношение диаметра лунки к ее глубине, как это видно из табл. 1.1, увеличивается с возрастанием длительности разряда. Изменяя энергию и скважность разряда, можно изменить геометрию образующейся лунки. Так, например, при той же энергии разряда, но меньшей длительности импульсов лунки получаются более глубокими и менее расплывчатой формы. Наибольший эффект эрозии получается при определенном соотношении энергии и длительности разряда. Чем короче разряд по времени, тем большая энергия сконцентри-

рована в объеме разряда и выше образующаяся при разряде температура и интенсивность съема металла.

Таблица 1.1 – Размеры лунки в стальном электроде в зависимости от энергии и длительности разрядов

Энергия разрядов $E_{и}$, Вт·с	Длительность разряда $\tau_{и}$, мкс	Глубина лунки Н	Диаметр лунки d	$k_1=d/H$	Объем лунки V , мм ³
		мм			
0,001	3	0,015	0,1	6,67	0,0000788
0,004	5	0,018	0,15	8,34	0,000218
0,008	12	0,020	0,22	11,00	0,000507
0,03	20	0,022	0,45	20,45	0,002325
0,1	40	0,025	0,75	30,00	0,00736
0,2	110	0,028	0,95	33,80	0,01322
0,4	200	0,033	1,20	36,40	0,0249
0,6	300	0,037	1,40	37,80	0,0379
0,8	450	0,040	1,55	38,70	0,0505
1,00	600	0,042	1,65	39,30	0,0598
2,00	1500	0,050	2,00	40,00	0,1046



а – внешний вид с увеличением; б – разрез лунки: 1 – основной металл; 2 – слой металла, застывший на дне лунки; 3 – валик застывшего металла по краям лунки

Рисунок 1.1 – Лунка

Температура разрядного канала достигает 40000 C^0 и при коротких импульсах большой энергии может превысить указанный предел.

Б.И. Ставицкий предложил эмпирические формулы для определения геометрических размеров лунок: диаметра, глубины и объема в зависимости от энергии импульса. *Диаметр лунки* определяется по формуле

$$D_{л} = n_1 E_{и}^{1/3}, \quad (1.2)$$

где $D_{л}$ — диаметр лунки, мкм;

$E_{и}$ — запас энергии импульсов, мкм·Дж;

n_1 — коэффициент диаметра лунки, зависящий от материала электродов и состава межэлектродной среды; для медных электродов при обработке в керосине $n_1 = 4$.

Глубина лунки определяется по формуле

$$H_{л} = n_2 E_{и}^{1/3}, \quad (1.3)$$

где $H_{л}$ — глубина лунки, мкм;

n_2 — коэффициент глубины лунки, зависящий от материала электродов и состава межэлектродной среды; для медных электродов при обработке в керосине $n_2 = 0,45$.

Объем лунки, равный объему металла, выбрасываемого за один импульс, определяется по формуле

$$V_{л} = \pi/6 \cdot H_{л}^3 (3R_{л}^2 + H_{л}^2), \quad (1.4)$$

где $R_{л}$ — радиус лунки, или по формуле

$$V_{л} = \pi/6 \cdot n_2 (3/4 k_1^2 + k_2^2) E_{и}, \quad (1.5)$$

Коэффициент k_1 зависит от формы электродов и расстояния между ними, а также от параметров электрического разряда. Значения k_1 , полученные из опыта, лежат в пределах 4...40.

Коэффициент k_2 зависит от параметров электрического разряда и изменяется от 0,11 до 0,15. Обе величины, k_1 и k_2 , от полярности электродов практически не зависят.

Средняя величина максимальной высоты неровностей h_{\max} , получающихся в результате воздействия на поверхность металла серии импульсов тока, определяется по формуле

$$h_{\max} = H_{\text{л}}/3 = n_2 E_{\text{и}}^{1/3}/3. \quad (1.6)$$

Среднее квадратичное отклонение неровностей $h_{\text{с.к}}$ от средней линии профиля определяется по формуле

$$h_{\text{с.к}} = n_3 E_{\text{и}}^{1/3}, \quad (1.7)$$

где n_3 — коэффициент, для медных электродов при обработке керосина равный 0,04.

Задание

- 1 Найти энергию импульса (по данным варианта задания, табл. 1.2).
- 2 Найти диаметр лунки от энергии одного импульса (при условии, что применяется медный электрод и рабочая жидкость – керосин).
- 3 Найти глубину лунки (от энергии одного импульса).
- 4 Найти объем лунки (от энергии одного импульса).
- 5 Найти производительность ЭЭО (мм³/мин).
- 6 Найти среднюю величину максимальной высоты неровностей при воздействии серии импульсов на поверхность заготовки.
- 7 Найти среднее квадратичное отклонение неровностей от средней линии профиля.

Таблица 1.2 – Варианты задания

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$U_{\text{ср}}, \text{В}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_{\text{ср}}, \text{А}$	90	80	70	60	50	45	40	30	25	20	10	3,5	2,5	2
$f_{\text{и}}, \text{кГц}$	8	2	8	6	8	10	12	44	2	1	2	3	2	1
q	5	6,5	6	5,5	5	3	4	3	2,5	2	2,5	3	3,5	4
№ вар	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$U_{\text{ср}}, \text{В}$	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145
$I_{\text{ср}}, \text{А}$	85	75	65	55	45	35	25	15	7,5	5	2	3,5	2,5	4,5
$f_{\text{и}}, \text{кГц}$	6	4	5	2	6	10	6	8	1	1	2	1	4	2
q	5	6,5	6	5,5	5	2	4	3	5	2	2,5	3	2,5	2

Материал заготовки – сталь конструкционная, материал электрода-инструмента – медь.

Контрольные вопросы

- 1 Какова физическая сущность процесса ЭЭО?
- 2 Какова последовательность построения технологического процесса?
- 3 От чего и как зависит энергия импульса?
- 4 Какие режимы применяются в ЭЭО?
- 5 Как зависит от длительности импульса глубина получаемой лунки?
- 6 От чего зависит объем лунки, получаемой в результате импульса?
- 7 Что влияет на точность ЭЭО?
- 8 От чего зависит шероховатость обрабатываемой поверхности при ЭЭО?
- 9 От чего зависит производительность процесса ЭЭО?
- 10 Что влияет на обрабатываемость заготовки при ЭЭО?

2.3. К занятию №3 Изучение закона Фарадея для различных условий осуществления анодного растворения Изучение влияния течения электролита на электрохимические процессы.

На практическом занятии №3 осуществляется расчета характеристик процесса электрохимического травления.

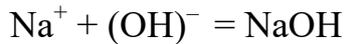
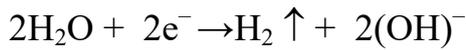
Одним из методов электрохимической обработки является электрохимическое травление (ЭХТ), технологические особенности которого рассматриваются в данной работе.

ЭХТ может быть использовано для изготовления рельефных шкал, таблиц, фирменных знаков; для получения на металле сложных изображений со значительной глубиной рельефа вплоть до получения сквозных отверстий сложного профиля.

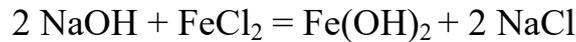
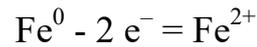
В основе ЭХТ лежит анодное растворение металла в среде электролита при прохождении через электролит постоянного электрического тока. При этом методе обработки заготовка является анодом. Ниже представлена полная схема электролиза в технологической системе «электролит – электроды». Электролитом здесь является водный раствор хлорида натрия NaCl , а анод-заготовка изготовлен из железа.



Катод: Na^+ , H_2O



Анод (Fe): Fe, Cl^- , H_2O



Таким образом, на поверхности заготовки, обращенной к катоду, в результате окислительной реакции происходит растворение металла. Для защиты тех частей заготовки, которые не должны подвергаться формоизменению, используются изолирующие маски, наносимые на поверхности фотохимическим или другими способами.

Интенсивность анодного растворения описывается первым законом Фарадея:

$$m = k_{\text{эx}} I \tau, \quad (2.1)$$

где m — масса металла, растворенного на аноде, кг;

$k_{\text{эx}}$ — электрохимический эквивалент материала анода, кг/Кл;

I — сила тока, А;

τ — время протекания процесса, с.

На практике масса растворенного на аноде вещества $m_{\text{ф}}$ оказывается меньше массы, рассчитанной по закону Фарадея. Эту особенность процесса учитывают введением в формулу (2.1) коэффициента k_{η} , называемого коэффициентом *выхода по току*. Фактическую массу металла, растворенного на аноде, рассчитывают по формуле

$$m_{\text{ф}} = k_{\eta} k_{\text{эx}} I \tau. \quad (2.2)$$

Ввиду большого числа факторов, влияющих на коэффициент k_{η} , найти его значение теоретическим путем не удастся. Поэтому на практике *выход по току* определяют экспериментально через отношение

$$k_{\eta} = \frac{m_{\text{ф}}}{m} = \frac{\rho_m S \Delta h}{k_{\text{эx}} I \tau}, \quad (2.3)$$

где ρ_m — плотность материала анода, кг/м³;

S — площадь анода, подлежащая травлению, м²;

Δh — толщина слоя, растворенного на аноде, м.

Линейная скорость растворения \mathcal{Q}_p , м/с, может быть определена следующим образом:

$$\mathcal{Q}_p = \frac{\Delta h}{\tau} = \frac{k_{\text{эx}}}{\rho_m} \frac{I}{S} k_{\eta} = \frac{k_{\text{эx}}}{\rho_m} \rho_i k_{\eta}, \quad (2.4)$$

где ρ_i — плотность тока, А/м².

Расчеты по формуле (2.4) затруднены в связи с тем, что с увеличением плотности тока падает значение *выхода по току*. Это связано с явлением пассивации анода, т. е. с покрытием анода нерастворимой оксидной пленкой. Явление пассивации анодной поверхности приводит также к значительному увеличению удельной энергоемкости процесса, значение которой w_m , Дж/кг, рассчитывают по формуле

$$w_m = I \cdot U \cdot \tau / m_{\text{ф}}, \quad (2.5)$$

где U — напряжение на электродах, В.

Из формулы (2.5) следует, что удельная энергоемкость w_m процесса ЭХТ с возрастанием силы тока I увеличивается. Росту w_m способствует еще и то, что одновременно падает *выход по току*.

Задание

1 Согласно варианту задания, приведенному в таблице 2.4, с помощью таблиц 2.1, 2.2 и 2.3 назначить режимы электрохимического травления для детали, эскиз которой изображен в таблице 2.5.

2 Вычислить площадь S поверхности, объем материала и его массу, подлежащую электрохимической обработке.

3 Найти время протекания процесса, учитывая коэффициент выхода по току.

4 Найти линейную скорость растворения.

5 Рассчитать производительность по массе Π_m , кг/с, и удельную энергоемкость процесса обработки w_m , Дж/кг.

6 Определить силу тока I , обеспечивающую скорость анодного раство-

рения $\vartheta_p = 10^{-6}$ м/с, по формуле $I = \rho_i S$ и время обработки τ , приняв анодный выход по току $k_\eta = 1$.

Таблица 2.1 – Характеристика основных операций электрохимической обработки

Вид операции	Режим обработки					Технологические показатели		
	Плотность тока ρ_i , А/см ²	Напряжение U, В	Межэлектродный зазор z, мм	Скорость электролита ω , м/с	Температура t, °С	Скорость подачи, мм/мин	Точность, мм	Ra, мкм
Формообразование гравиюр штампов и пресс-форм	15...200	6...24	0,03...0,3	10...35	20...45	0,2...3,5	0,05...0,5	0,2...2,5
Прошивка	20...250	9...24	0,1...0,5	5...35	20...40	0,3...6,5	0,05...0,5	0,63...5,0
Калибровка и контурная обработка неподвижным катодом	8...60	6...18	$\geq 0,1$	15...30	20...30	-	0,05...0,35	0,32...2,5
Удаление заусенцев	2...25	6...30	0,2...2	0,2...0,8	20...40	4...100 мм/сек	-	1,25...2,5

Таблица 2.2 – Коэффициент выхода по току

Материал заготовки	k_η (хлорид натрия)	k_η (нитрат натрия)
Конструкционные и низколегированные стали	0,80...0,85	0,6...0,7
Жаропрочные сплавы	0,85...0,93	0,6...0,7
Титановые сплавы	0,83...0,85	-
Алюминиевые сплавы	-	1,1...1,35

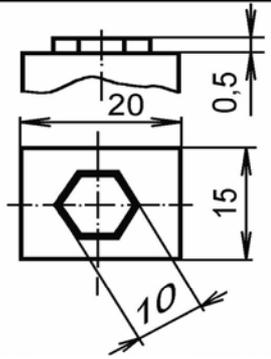
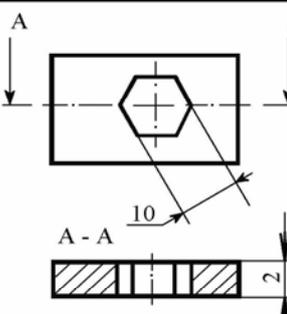
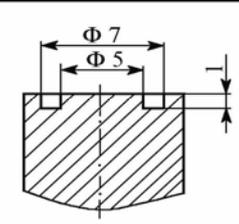
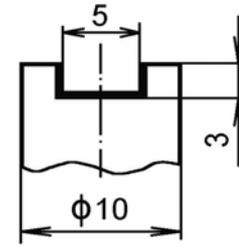
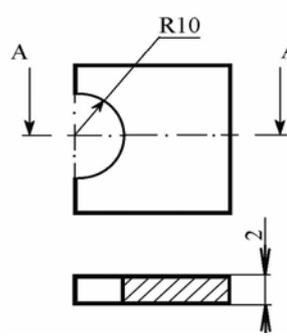
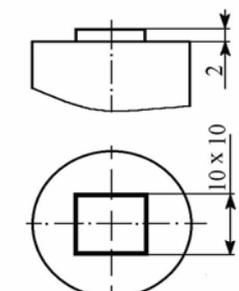
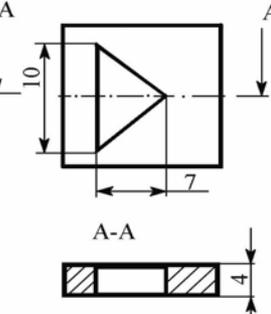
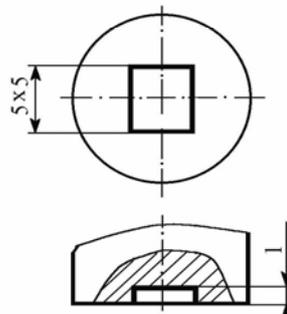
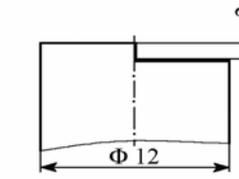
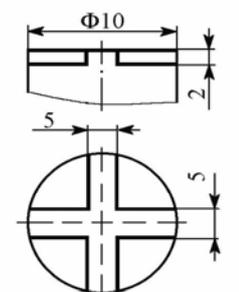
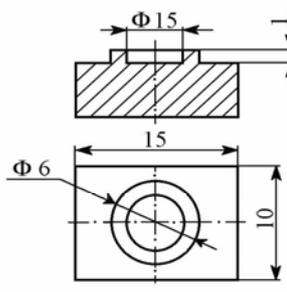
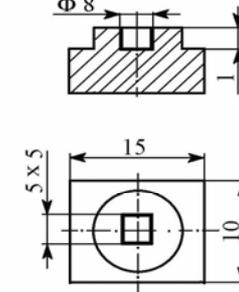
Таблица 2.3 – Плотность и электрохимические эквиваленты
некоторых сплавов

№	Материал	ρ_m , кг/м ³	$k_{эx}$, кг/Кл
1	2X13	7750	$2,58 \cdot 10^{-7}$
2	X18H9T	7900	$2,76 \cdot 10^{-7}$
3	5XHM	7800	$2,86 \cdot 10^{-7}$
4	BK8	14350	$3,10 \cdot 10^{-7}$
5	T15K6	11000	$2,75 \cdot 10^{-7}$
6	T5K10	12200	$3,05 \cdot 10^{-7}$
7	30XГСА	7850	$2,88 \cdot 10^{-7}$
8	38XHMЮА	7710	$2,83 \cdot 10^{-7}$
9	Д1	2800	$0,93 \cdot 10^{-7}$
10	BT16	4680	$1,79 \cdot 10^{-7}$
11	BT22	4500	$1,72 \cdot 10^{-7}$
12	ЭИ-893	8800	$2,64 \cdot 10^{-7}$
13	Сталь 45	7800	$2,23 \cdot 10^{-7}$
14	12X18H9T	7900	$1,65 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2.4- Варианты задания

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Эскиз №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
Ма-тери-ал	2X13	X18H9T	5XHM	BK8	T15 K6	T5K 10	30XГСА	38XHMЮА	Д1	BT16	BT22	ЭИ-893	Сталь 45	12X18 H9T
№ вар	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Эскиз №	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
Ма-тери-ал	2X13	X18H9T	5XHM	BK8	T15 K6	T5K 10	30XГСА	38XHMЮА	Д1	BT16	BT22	ЭИ-893	Сталь 45	12X18 H9T

Таблица 2.5 - Варианты операционных эскизов

№ пп	Операционный эскиз	№ пп	Операционный эскиз	№ пп	Операционный эскиз
1		5		9	
2		6		10	
3		7		11	
4		8		12	

Контрольные вопросы

- 1 Какие классические законы используют при описании процесса ЭХО?
- 2 Как следует выбирать электролит?
- 3 Как выбрать напряжение на электродах?
- 4 Какова последовательность построения технологического процесса?
- 5 Назовите основные технологические показатели процесса ЭХО и их взаимосвязь.
- 6 Какие материалы используются для изготовления рабочей части электрода-инструмента?
- 7 Какова сущность явления пассивации?
- 8 От чего и как зависит линейная скорость растворения при ЭХТ?
- 9 От чего и как зависит удельная энергоёмкость процесса?
- 10 От чего и как зависит производительность процесса ЭХТ?
- 11 От чего и как зависит точность при процессе ЭХТ?
- 12 От чего и как зависит шероховатость при процессе ЭХТ?

2.4. К занятию №4 Изучение процессов лазерных воздействий на материалы при использовании твердотельных и газовых лазеров

На практическом занятии №4 осуществляется определение плотности мощности лазерного излучения, необходимой для нагревания различным материалов до температуры кипения и испарения.

Большинство лазерных технологий основаны на тепловом действии излучения. При падении пучка лазерного излучения на поверхность материала часть излучения отражается от нее, а часть проходит вглубь материала, поглощаясь в нем.

Распространение излучения в веществе, как правило, описываются законом Бугера:

$$q(x) = q_0(1-R)\exp(-\alpha x),$$

где $q(x)$ - плотность мощности излучения в веществе на расстоянии x от его поверхности, q_0 - плотность мощности падающего излучения, R - коэффициент отражения поверхности, α — показатель ослабления света в веществе.

При поглощении излучения вещество нагревается. Различают режимы нагревания материала, соответствующие сильному (поверхностному) и слабому (объемному) поглощению излучения. Для большинства технологических процессов используется лазерное излучение длин волн, находящихся в спектральной области сильного поглощения вещества, так как это обеспечивает локальность воздействия и большую эффективность использования энергии.

Сильное поглощение света имеет место в металлах, в полупроводниках при их «металлизации» достаточно мощным излучением, а также в полупроводниках и диэлектриках, когда длина волны излучения лежит в области их фундаментального поглощения. При этом глубина проникновения излучения обычно много меньше характерного размера теплопроводности. Тепловой источник в материале в таких условиях является практически поверхностным. Математически при решении уравнения теплопроводности это учитывается в граничном условии на поверхности. Толщина прогретого слоя в материале определяется характерным размером теплопроводности $\sqrt{\alpha t}$, t – время воздействия, α – температуропроводность материала.

Режимы облучения, обеспечивающие объемное поглощение излучения, $\frac{1}{\alpha} > \sqrt{\alpha t}$, используют при необходимости создания в обрабатываемом материале объемного теплового источника или при фокусировке излучения (и локальной обработке) внутри объема.

Для решения уравнений теплопроводности существуют различные математические методы, среди которых наиболее употребительны методы интегральных преобразований (в том числе преобразование Лапласа), метод Фурье (разделения переменных) и метод источников. Заметим, что при нагревании материала его оптические и теплофизические свойства изменяются, в особенности коэффициент отражения R . Кроме того, большое влияние на процесс нагревания оказывает временная и пространственная структура излучения. Эти факторы иногда необходимо учитывать для точного определения временного хода температуры нагреваемого излучением тела и пространственного распределения температуры.

При нагревании тела лазерным излучением в нем активируются различные процессы. К их числу относятся эмиссионные процессы (эмиссия электронов, ионов, нейтральных молекул), поверхностные и объемные химические реакции, структурные превращения, тепловое расширение и термомеханические процессы, плавление, испарение и т.п. Эти изменения могут быть положены в основу того или иного технологического процесса — например, испарение и плавление при резке и сверлении отверстий, плавление при сварке, структурные превращения при термоупрочнении материалов и т.д.

При определении основных параметров процесса на практике в большинстве случаев не требуется точного решения тепловой задачи, а достаточно оценить пороговую плотность мощности излучения q_n (или пороговую мощность P_n , пороговую энергию W_n). Пороговая плотность мощности излучения — это такое ее значение, при котором в облучаемом материале начинают происходить заданные изменения. Теоретически величина q_n определяется как такое значение плотности мощности падающего излучения q_0 , при котором максимальная температура обрабатываемого материала достигает значения T^* , соответствующего началу данного процесса (например, для испарения материала это температура его кипения). Пороговые характеристики могут быть определены из выражения, определяющего температуру на поверхности тела в центре облученной области в виде круга радиусом r_0 в момент окончания воздействия.

Для облучения в режиме объемного поглощения

$$T = \frac{q_0(1-R)t}{\rho c \delta} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4\alpha t}\right) - \frac{r_0^2}{4\alpha t} Ei\left(-\frac{r_0^2}{4\alpha t}\right) \right\} + T_n, \quad (1)$$

где δ — глубина проникновения света в вещество (при поглощении по Бугеру $\delta = 1/a$), $Ei(u)$ — интегральная показательная функция. T_n — начальная температура.

Выражение (1) имеет два частных случая :

а) при $r_0 \gg \sqrt{\alpha t}$:

$$T = \frac{q_0(1-R)t}{\rho c \delta} + T_n$$

б) при $r_0 \ll \sqrt{\alpha t}$:

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0^2}{4k\delta} \ln\left(19.4 \frac{\alpha t}{r_0^2}\right) + T_n,$$

где k — теплопроводность материала.

Другим важным параметром лазерной обработки является скорость активируемого в облучаемом материале процесса. Для большинства термически активируемых процессов, таких как испарение, различные термохимические реакции, скорость процесса V экспоненциально зависит от температуры T , что в наиболее общем виде характеризуется формулой Френкеля:

$$V(T) = c_0 \exp\left(-\frac{L^m \mu}{R_\Gamma T}\right),$$

где L^m — энергия активации соответствующего процесса в расчете на единицу массы (теплота испарения и т.п.), c_0 — скорость звука в твердом теле, R_Γ — универсальная газовая постоянная, μ — молярная (атомная) масса обрабатываемого материала.

Определение температуры материала, облучаемого лазерным излучением, и основанный на нем расчет скорости испарения дают возможность получить интегральные характеристики процесса обработки и определить необходимые параметры режима обработки.

В некоторых случаях тепловая модель воздействия излучения оказывается недостаточной для корректного рассмотрения процессов лазерных технологий. Например, при сверлении глубоких отверстий нельзя не учитывать поглощения излучения в парах в образующемся канале и т.п. В настоящем пособии эти вопросы не рассматриваются.

Существуют лазерные технологии, основанные на быстром тепловом расширении вещества при нагреве лазерным излучением. Технология сухой ла-

зерной очистки поверхности твердого тела от загрязняющих частиц основана на быстром нагреве и тепловом расширении поглощающих излучение частиц и/или приповерхностного слоя основного материала импульсом лазерного излучения. После окончания импульса под действием инерционных сил происходит отрыв частиц от поверхности и их удаление.

Оценить плотность мощности лазерного излучения, необходимую для нагревания алюминия, меди, вольфрама, железа до температуры плавления и температуры кипения излучением лазера с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм при длительности импульса излучения $t = 10^{-3}$ с, $T = 10^{-7}$ с.

2.4.1 Прядок выполнения работы

При импульсном воздействии лазерного излучения на металлы температура поверхности определяется следующим выражением:

$$T = T_n + \frac{2q_0 A \sqrt{at}}{k \sqrt{\pi}},$$

где $A = 1 - R$ — поглощательная способность материала; R — коэффициент отражения материала.

Отсюда получаем выражение для плотности мощности:

$$q_0 = \frac{(T - T_n) k \sqrt{\pi}}{2(1 - R) \sqrt{at}}$$

Результаты вычислений сведены в таблицу (плотность мощности излучения в таблице выражена в Вт/см²):

2.5. К занятию №5 Изучение критериев разрушения при ультра-звуковом и комбинированных воздействиях

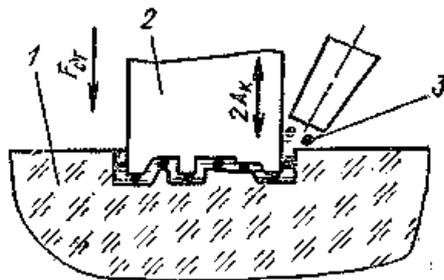
На практическом занятии №5 осуществляется расчет производительности процесса размерной ультразвуковой обработки свободным абразивом.

Ультразвуковая обработка (УЗО) охватывает большую группу технологических процессов и операций различного назначения, осуществляемых различными методами (химическими, механическими и др.) и выполняемых при обязательном воздействии на обрабатываемую заготовку, обрабатывающий инструмент или среду, в которой ведется обработка, механических колебаний ультразвуковой частоты (свыше 16 кГц). Характер этого воздействия различен для различных технологических процессов. В одних – ультразвуковые колебания (УЗК) передают в рабочую зону энергию, необходимую для выполнения технологических операций непосредственно, например, при ультразвуковой абразивной обработке (УЗАО) твердых хрупких материалов. В других – УЗК используют как средство интенсификации технологических операций, выполняемых традиционными методами, например механической обработкой резанием. И тогда УЗК являются дополнительным источником энергии.

К преимуществам УЗО относят: возможность преобразования электрической энергии в акустическую при небольших затратах; сравнительно простые способы введения УЗК в рабочую зону; относительно несложное и во многих случаях традиционное конструктивное решение средств механизации и автоматизации операций и др.

Недостатками УЗО являются необходимость применения специальных генераторов тока, которые занимают определенную производственную площадь и требуют ухода специально подготовленным персоналом, а также более высокая стоимость акустической энергии по сравнению с другими ее видами.

Ультразвуковая абразивная обработка (УЗАО) объединяет операции, при выполнении которых съем материала осуществляется множеством свободных (не закрепленных на инструменте) абразивных зерен или абразивными (алмазными, эльборными) инструментами при вибрации инструмента или заготовок с ультразвуковой частотой (рис.3.1).



1 - заготовка; 2 - ультразвуковой инструмент; 3 - абразивная суспензия

Рисунок 3.1 – Схема УЗАО свободными абразивными зёрнами твердых хрупких материалов

УЗАО свободными абразивными зёрнами основана на хрупком выкалывании частиц обрабатываемого (хрупкого) материала под воздействием множества абразивных зёрн, по которым ударяет колеблющийся с ультразвуковой частотой инструмент.

Задание

Согласно варианту задания, приведенному в таблице 3.7 и с учетом сведений, представленных в таблицах 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 и на рисунках 3.2, 3.3 3.4 необходимо:

- 1 выбрать материал магнестрикционного преобразователя;
- 2 выбрать схему обработки;
- 3 выбрать материал, форму и длину волновода-концентратора;
- 4 выбрать абразивный материал и способ принудительной подачи в рабочую зону абразивной суспензии;
- 5 рассчитать производительность процесса обработки, дать рекомендации по увеличению производительности процесса.

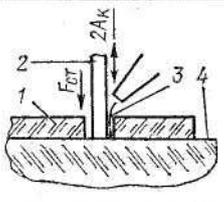
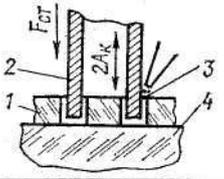
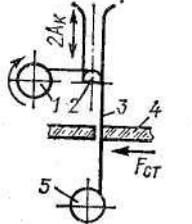
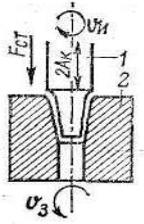
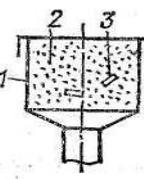
Таблица 3.1 – Основные характеристики материалов, применяемых для изготовления магнитоотрицательных преобразователей

Основные характеристики материала	Никель Н1 и Н2	Пермендюор		Альфер	
		К49Ф2	К65	Ю14	Ю12
Магнитоотрицательность λ_s	$35 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$
Магнитное насыщение, $гс$	6400	24000	22000	13400	15000
Начальная проницаемость μ_0	400	700	150	1000	400
Максимальная относительная проницаемость μ_{max}	2500	4500	1500	2800	1500
Коэрцитивная сила H_c , э	0,7	2,0	3,7	0,7	0,6
Потери ($вт/кг$) при $f=20000$ Гц	2800	800	2750	1175	–
	–	2750	10250	–	–
Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·см	$7 \cdot 10^{-6}$	$26 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-6}$
Модуль упругости $E_{Ю}$, кг/см ²	$2,1 \cdot 10^6$	$2,18 \cdot 10^6$	$2,24 \cdot 10^6$	$1,77 \cdot 10^6$	–
Плотность ρ , г/см ³	8,9	8,09	8,25	6,65	–
Прочность на разрыв σ , кг/см ²	47	45	67	79	–
Точка Кюри, °С	380	980	–	500	–
Скорость распространения упругой волны c , см/с	$4,76 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	–
Удельная допустимая мощность P , Вт/см ²	80	100..110		50...55	

Таблица 3.2 – Классификация УЗАО

Операция	Назначение	Кинематическая схема	Кинематические особенности	Технологические особенности	Область применения
Ультразвуковое объемное копирование (УЗОК)	Получение поверхностей, соответствующих форме рабочей части инструмента		Инструмент 2 совершает УЗК с амплитудой $2A_k$; рабочая подача осуществляется вертикальным перемещением инструмента или заготовки 1 с усилием $F_{ст}$	Абразивную суспензию 3 подают поливом. Рабочая часть инструмента копирует обрабатываемые элементы	Формообразование рельефных изображений и полостей любой (вогнутой или выпуклой) формы
Ультразвуковое прошивание (УЗПр)	Получение отверстия постоянного сечения		Инструмент 2 совершает УЗК с амплитудой $2A_k$ и прижимается к заготовке с усилием $F_{ст}$	Абразивную суспензию 3 подают поливом или вручную; заготовки приклеивают к стеклянным подкладкам 4	Формообразование отверстий различного контура
Ультразвуковое точение (УЗТ)	Получение поверхностей при вращении заготовки и поступательном перемещении инструмента		Заготовка 1 вращается со скоростью $v_{окр}$; инструмент 2 совершает УЗК с амплитудой $2A_k$ и прижимается к заготовке с усилием $F_{ст}$	Абразивную суспензию подают поливом; для удержания ее в зоне обработки под инструментом размещают ванну	Формообразование элементов деталей типа тел вращения небольших размеров

Продолжение табл.3.2

Операция	Назначение	Кинематическая схема	Кинематические особенности	Технологические особенности	Область применения
Ультразвуковая отрезка (УЗОг)	Отделение части заготовки по замкнутому контуру		Инструмент 2 совершает продольные УЗК с амплитудой A_k ; рабочая подача осуществляется вертикальным перемещением инструмента или заготовки 1 с усилием $F_{ст}$	Для исключения сколов на выходе лезвийного инструмента заготовку приклеивают к стеклянной подкладке 4; абразивную суспензию 3 подают вручную или поливом	Раскрой заготовок единичными или многоместными инструментами; отрезка пластин. Минимальная ширина реза 0,3—0,5 мм
Ультразвуковое вырезание (УЗВ)	Вырезание заготовок по замкнутому контуру		Инструмент 2 совершает продольные УЗК с амплитудой $2A_k$; рабочая подача осуществляется вертикальным перемещением инструмента или заготовки 1 с усилием $F_{ст}$	Для исключения сколов на выходе инструмента заготовку приклеивают к стеклянной подкладке 4; абразивную суспензию подают поливом или через полость инструмента	Формообразованные плоских заготовок толщиной до 6—10 мм по наружному контуру
			Непрофилированный инструмент — проволока 3 перематывается с катушки 5 и получает УЗК от концентратора 2; заготовка 4 прижимается к инструменту с усилием $F_{ст}$ и перемещается в горизонтальной плоскости по заданной траектории, соответствующей контуру вырезаемой заготовки	Абразивную суспензию подают поливом. Заданная траектория перемещения заготовки обеспечивается по увеличенному чертежу-шаблону или с помощью ЧПУ. Инструмент — стальная проволока	
Операция	Назначение	Кинематическая схема	Кинематические особенности	Технологические особенности	Область применения
Ультразвуковая доводка (УЗД)	Обработка, осуществляемая при сложном рабочем движении инструмента и (или) заготовки		Инструмент 1 колеблется в осевом направлении с амплитудой $2A_k$, вращается со скоростью ω_n и периодически поджимается к заготовке 2 с усилием $F_{ст}$. Заготовка имеет вращение со скоростью $\omega_з$ (встречное)	Заготовку крепят в оправке или цапговом зажиме. Порция абразивной суспензии заменяется при замене заготовок	Чистовая обработка поверхностей вращения деталей небольших размеров
Ультразвуковое удаление заусенцев (УЗУЗ)	Обработка в жидкой среде, при которой удаляются заусенцы заготовок		Дно (или стенка) ванны 1 получает УЗК и сообщает энергию абразивным зернам 2 и заготовкам 3. При этом скорость взаимного перемещения зерен и заготовки неодинакова: $v_з \neq v_а$	Порцию абразивной суспензии и партию заготовок погружают в ванну одновременно. Для интенсификации операции в ванне создают избыточное статическое давление (0,5—0,6 МПа)	Удаление заусенцев размером до 0,08 мм с мелких металлических заготовок массой до 10—15 г. Очистка от загрязнений, прочно связанных с заготовкой

Продолжение табл.3.2

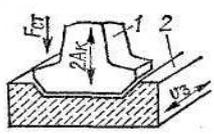
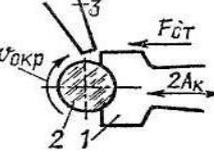
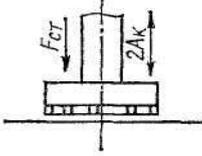
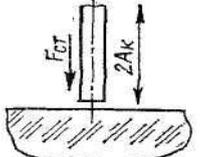
Операция	Назначение	Кинематическая схема	Кинематические особенности	Технологические особенности	Область применения
Ультразвуковое шлифование (УЗШ)	Обработка, при которой главное движение резания осуществляется за счет линейного перемещения заготовки		Инструмент 1 колеблется в осевом направлении с амплитудой $2A_k$ и прижимается к обрабатываемой поверхности с усилием $F_{ст}$. Заготовка 2 совершает возвратно-поступательное перемещение со скоростью $v_з$	Заготовку приклеивают к плоской подкладке для удобства крепления на столе станка. Абразивную суспензию подают в рабочую зону поливом	Чистовая обработка плоскостей
	Обработка, при которой главное движение резания осуществляется за счет вращения заготовки		Инструмент 1 колеблется в осевом направлении с амплитудой $2A_k$ и прижимается к обрабатываемой поверхности с усилием $F_{ст}$ и перемещается вдоль оси заготовки 2, которая вращается со скоростью $v_{окр}$	Заготовку крепят в центрах. Абразивную суспензию 3 подают в зону обработки поливом	Чистовая обработка поверхностей вращения
Операция	Назначение	Кинематическая схема	Кинематические особенности	Технологические особенности	Область применения
Ультразвуковое маркирование (УЗМ)	УЗОК, при котором на заготовку наносят изображение или знак за одну установку без перемещения заготовки в горизонтальной плоскости		Инструмент с профилированной рабочей частью колеблется в осевом направлении с амплитудой $2A_k$ и прижимается к поверхности заготовки с усилием $F_{ст}$	Рабочая часть инструмента отображает наносимое изображение. Абразивная суспензия подается в рабочую зону поливом или вручную	Нанесение плоских изображений, знаков и текста глубиной до 1—1,5 мм
Ультразвуковое гравирование (УЗГр)	Нанесение изображения или знака последовательным перемещением инструмента или заготовки в горизонтальной плоскости		Инструменту придают УЗК с амплитудой $2A_k$, прижимают к поверхности заготовки с усилием $F_{ст}$ и перемещают по заданной траектории после врезания в заготовку на нужную глубину. Перемещение по заданной траектории осуществляют и подачей заготовки. Целесообразно вращение инструмента	Инструмент — калиброванная проволока диаметром 0,5—1,5 мм. Абразивная суспензия подается в рабочую зону вручную. Рабочее перемещение инструмента обеспечивается пантографом по копире или посредством ЧПУ	Нанесение плоских изображений, знаков и текста глубиной 0,2—0,3 мм

Таблица 3.3 – Усталостная прочность материалов, применяемая для изготовления концентраторов

Материал	$\sigma_{-1p} \cdot 10^{-2}$, МПа	Материал	$\sigma_{-1p} \cdot 10^{-2}$, МПа	
Сталь 10	16...22	Сталь 18ХНВА	54...62	
Сталь 45	25...34	Сталь 30ХГСА	48...70	
Сталь 50Г	29...36	Сплавы:		
Сталь 45Г2	31...40			
Сталь 20Х	31...38		алюминиевый Д16Т	11,5
Сталь 40Х	32...38		магниевый МА5	13,0
Сталь 40ХНМА	50...70		титановый ВТ3-1	48,0

Концентраторы – трансформаторы упругих колебаний, осуществляющие передачу УЗК с увеличением значения A_k . По типу колебаний различают концентраторы продольных, крутильных и изгибных колебаний. По форме образующей концентраторы (рис.3.2) делятся на: ступенчатые, конические, экспоненциальные, ампульные (Фурье), катеноидальные.

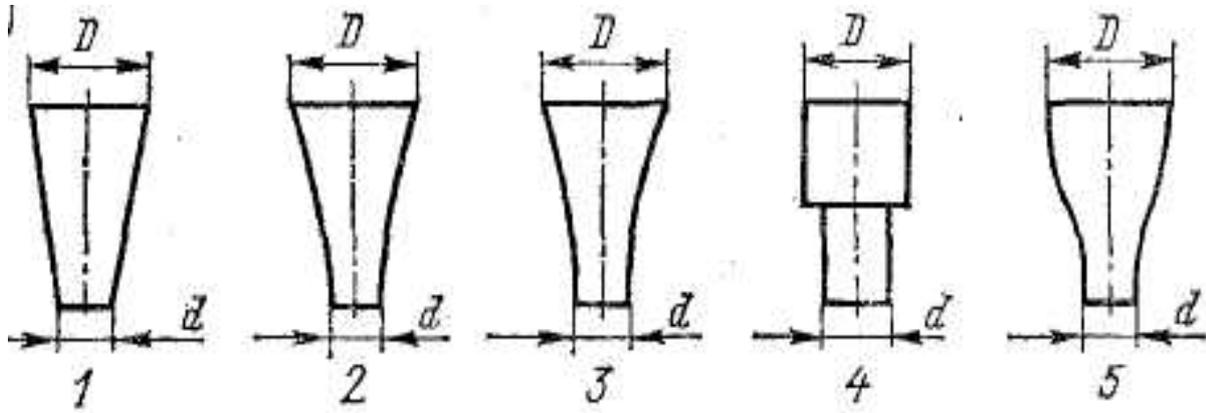


Рисунок 3.2 – Формы концентраторов: 1 – конический, 2 – экспоненциальный, 3 – катеноидальный, 4 – ступенчатый, 5 – ампельный (Фурье)

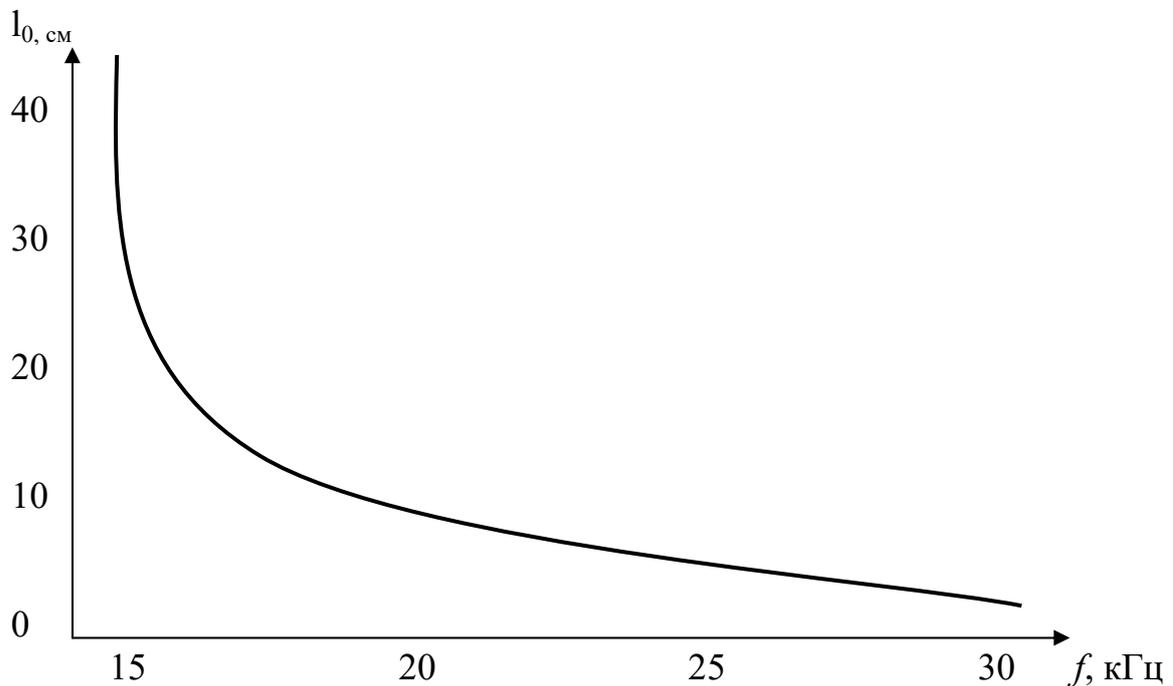


Рисунок 3.3 – Зависимость длины волновода-концентратора от частоты f , кГц

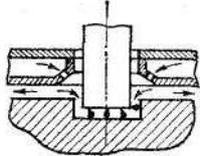
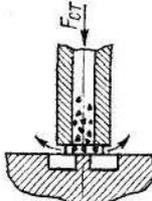
Максимально допустимые значения амплитуды колебаний выходного торца концентратора $2A_{\max}$ (мкм) не должны превышать $2A_{\max} \leq 0,8\sigma_{-1p}$ для ступенчатого концентратора; $2A_{\max} \leq 1,5\sigma_{-1p}$ для катеноидального концентратора; $2A_{\max} \leq 1,8\sigma_{-1p}$ для конического концентратора. Здесь σ_{-1p} – усталостная прочность материала концентратора.

Абразивная суспензия при УЗАО включает 20...40% абразивного материала (массовое содержание); остальное – вода и примерно 1...2% ингибитора коррозии – натрия азотистокислого (NaNO_2).

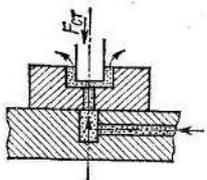
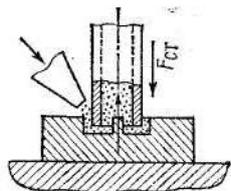
Таблица 3.4 – Материалы абразивные, применяемые при УЗАО свободными зёрнами

Материал	Состав (основной)	Относительная режущая способность	Твердость по шкале Мооса	Плотность ρ , г/м ³
Эльбор	BN	1,1	11	3,45
Порошки алмазные	C	1	10	3,5
Карбид бора	B ₄ C	0,5-0,6	9	2,5
Карбид кремния	SiC	0,25-0,45	9	3,2
Электрокорунд	AL ₂ O ₃	0,14-0,16	8	3,9

Таблица 3.5 – Способы принудительной подачи в рабочую зону абразивной суспензии

Способ и схема	Характеристика способа	Преимущества	Недостатки	Область применения
<p>Полив</p> 	<p>Подача суспензии через кольцо-спрейер (или сопло) от помпы; давление в системе 0,1—0,2 МПа</p>	<p>Простота осуществления; универсальность</p>	<p>Затрудненный доступ при глубине обработки свыше 15—20 мм</p>	<p>УЗОт, УЗВ, УЗОК, УЗПр, УЗТ, УЗШ, УЗД, УЗМ</p>
<p>Нагнетание</p> 	<p>Подача суспензии нагнетанием через полость инструмента; давление — 0,3—0,6 МПа</p>	<p>Повышенная производительность при увеличенной глубине обработки (50 мм и более)</p>	<p>Невозможность обработки глухих отверстий и полостей из-за наличия средней неудаляемой части</p>	<p>УЗВ, УЗПр, ЭХУЗО</p>

Продолжение табл.3.5

Способ и схема	Характеристика способа	Преимущества	Недостатки	Область применения
	Подача суспензии нагнетанием через предварительно выполненное отверстие заготовки; давление — 0,3—0,6 МПа	То же и возможность формообразования ступенчатых отверстий и полостей	Необходимость наличия предварительно выполненного отверстия в заготовке	УЗПр, ЭХУЗО
	Подача суспензии поливом; удаление отсосом (0,07—0,08 МПа) через отверстие в инструменте (или заготовке)	То же	Сложность реализации; невозможность обработки глухих отверстий и полостей из-за наличия средней неудаляемой части	УЗВ, УЗПр
<p>Примечания: 1. Расход абразивной суспензии при нагнетании составляет примерно 1—1,5 л/мин; при подаче поливом и вакуумным отсосом — 1—3 л/мин. 2. Оптимальная концентрация абразивного материала в воде составляет 35—45 % (массовое содержание) при подаче поливом и 20—30 % при отсосе и нагнетании.</p>				

Расчет производительности процесса УЗАО

Расчет коэффициента усиления амплитуды колебаний

$$k = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)^2}, \quad (3.1)$$

где l — длина волновода-концентратора,

λ — длина волны, распространяемой в волноводе-концентраторе.

Расчет линейной производительности УЗАО Q_l , мм/мин

$$Q_l = \varphi(A_r^2 F_{ce})^a f^b, \quad (3.2)$$

где φ — коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала;

A_r — амплитуда колебаний волновода-концентратора ($A_r = A_3 k$);

a и b — условия обработки;

F_{ce} — оптимальное усилие рабочей подачи, H ;

f — резонансная частота колебаний волновода-концентратора.

Расчет объемной производительности УЗАО Q_v , мм³/мин

$$Q_v = t S_0, \quad (3.3)$$

где t — глубина обработки, мм;

S_0 — площадь обрабатываемой поверхности, мм².

Таблица 3.6 – Относительная обрабатываемость некоторых твердых материалов УЗАО свободными зёрнами

Материал	Относительная обрабатываемость ϕ	Материал	Относительная обрабатываемость ϕ
Стекло	1	Керамика	0,4
Яшма	0,9	Агат	0,3
Ферриты	0,8	Минерало-керамика	0,2
Ситаллы	0,7	Твердый сплав	0,02-0,05
Кремний	0,4-0,7	Германий	0,3-0,6
Кварц	0,5	Алмаз	0,1

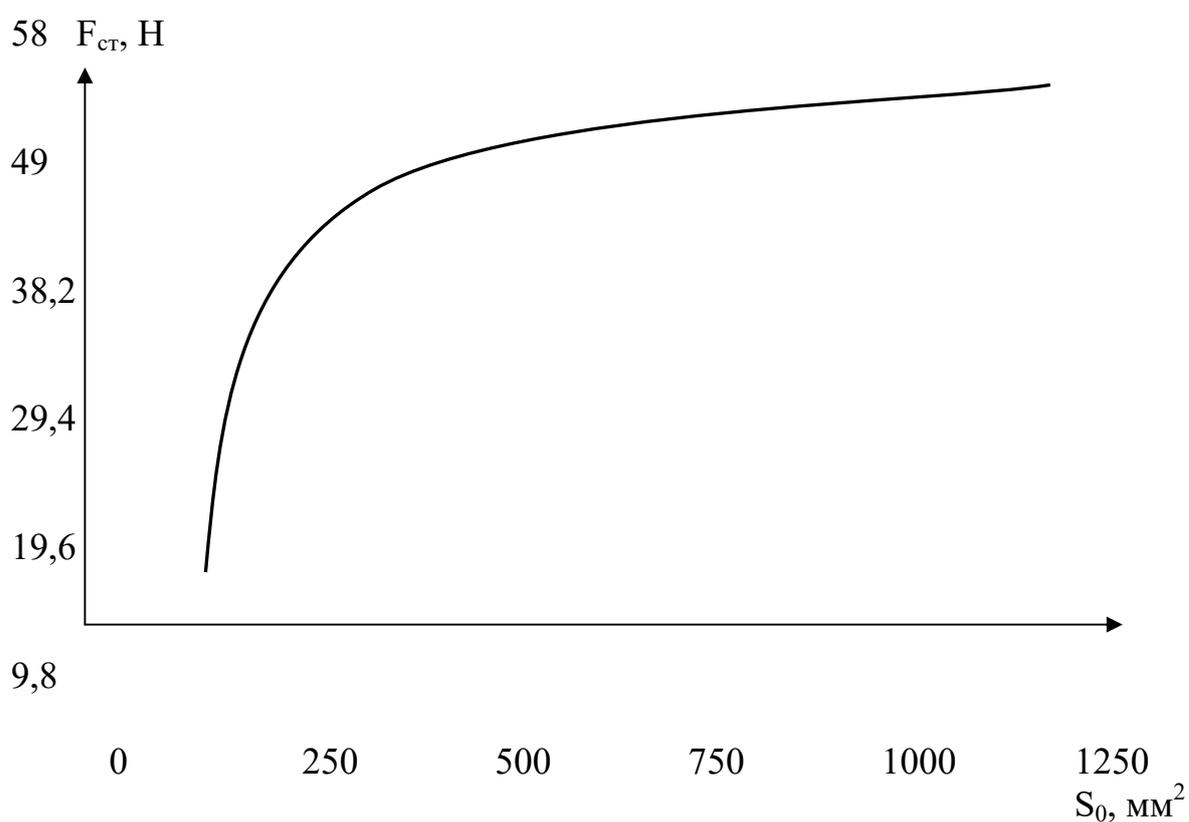


Рисунок 3.4 – Зависимость $F_{ст}$, Н, от площади обработки S_0 , мм²

Таблица 3.7 – Исходные данные

№	Обрабатываемая поверхность	Глубина обработки, t мм	Площадь обрабатываемой поверхности, S мм ²	Обрабатываемый материал	Резонансная частота, f, кГц	Длина волны λ, мм	Амплитуда колебаний Аз, мкм	a	б
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Формообразование полостей вогнутой формы	3	250	Стекло	18,00	3	5	0,5	0,5
2	Формообразование отверстий	8	270	Яшма	18,33	4	6	0,6	0,6
3	Формообразование элементов деталей типа тел вращения	1	290	Ферриты	18,66	5	7	0,7	0,7
4	Чистовая обработка плоскостей	0,02	300	Ситаллы	18,99	6	8	0,8	0,5
5	Чистовая обработка поверхностей вращения	0,03	350	Кремний	19,00	7	9	0,9	0,6
6	Нанесение плоских изображений, знаков, текста	1,4	400	Кварц	19,43	8	10	1,0	0,7
7	Чистовая обработка поверхностей вращения деталей небольших размеров	0,04	430	Керамика	19,56	9	5	0,5	0,8

Продолжение табл.3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	Формообразование полостей выпуклой формы	4	470	Агат	19,68	10	6	0,6	0,9
9	Формообразование рельефных изображений	1,2	500	Минерало-керамика	20,00	9	7	0,7	1,0
10	Нанесение плоских изображений, знаков, текста	1,3	520	Твердый сплав	20,30	8	8	0,8	0,5
11	Чистовая обработка поверхностей вращения	0,01	560	Германий	20,56	7	9	0,9	0,6
12	Чистовая обработка плоскостей	0,02	580	Алмаз	20,86	6	10	1,0	0,7
13	Чистовая обработка поверхностей вращения деталей небольших размеров	0,03	600	Стекло	21,00	5	5	0,5	0,8
14	Формообразование элементов деталей типа тел вращения	2	630	Яшма	21,33	4	6	0,6	0,9
15	Нанесение плоских изображений, знаков, текста	0,2	690	Ферриты	21,53	3	7	0,7	1,0
16	Формообразование рельефных изображений	0,1	720	Ситаллы	21,79	4	8	0,8	0,5
17	Нанесение плоских изображений, знаков, текста	1	740	Кремний	22,00	5	9	0,9	0,6
18	Чистовая обработка поверхностей вращения деталей небольших размеров	0,08	780	Кварц	22,30	6	10	1,0	0,7
19	Формообразование отверстий	6	810	Керамика	22,56	7	5	0,5	0,8
20	Удаление заусенцев	0,06	890	Агат	22,78	8	6	0,6	0,9
21	Нанесение плоских изображений, знаков, текста	1,5	900	Минерало-керамика	23,00	9	7	0,7	1,0

Продолжение табл.3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22	Чистовая обработка плоскостей	0,06	950	Твердый сплав	23,39	10	8	0,8	0,5
23	Формообразование плоских заготовок	2	990	Германий	23,50	9	9	0,9	0,6
24	Формообразование элементов деталей типа тел вращения	3	1000	Алмаз	23,87	8	10	1,0	0,7
25	Формообразование плоских заготовок	3	1100	Стекло	24,00	7	5	0,5	0,8
26	Чистовая обработка поверхностей вращения	0,02	1150	Яшма	24,31	6	6	0,6	0,9
27	Формообразование рельефных изображений	0,3	1200	Ферриты	24,58	5	7	0,7	1,0
28	Формообразование отверстий	5	1220	Ситаллы	24,77	4	8	0,8	0,5
29	Удаление заусенцев	0,08	1250	Минералокерамика	25,00	3	9	0,9	0,6
30	Формообразование плоских заготовок	2,5	250	Твердый сплав	25,39	4	10	1,0	0,7
31	Чистовая обработка поверхностей вращения	0,1	300	Германий	25,56	5	5	0,5	0,8
32	Нанесение текста	1,0	400	Алмаз	25,87	6	6	0,6	0,9
33	Чистовая обработка плоскостей	0,05	500	Кварц	26,00	7	7	0,7	1,0
34	Удаление заусенцев	0,04	600	Агат	26,25	8	8	0,8	0,5
35	Нанесение текста	0,3	700	Алмаз	30,00	9	9	0,9	0,6

Длительность импульса	Al		Cu		W		Fe	
	Q _{пл}	Q _{кип}						
t ₁ =10 ⁻³ с	6,2·10 ⁵	2,4·10 ⁶	1,2·10 ⁶	2,9·10 ⁶	6,3·10 ⁵	1,0·10 ⁶	1,9·10 ⁵	3,6·10 ⁵
t ₁ =10 ⁻⁷ с	6,2·10 ⁷	2,4·10 ⁸	1,2·10 ⁸	2,9·10 ⁸	6,2·10 ⁷	1,0·10 ⁸	1,9·10 ⁷	3,6·10 ⁷

Анализ энергетических характеристик физико-химических воздействий на материалы Модели механического разрушения материала
Изучение условий технологического электроэрозионного разрушения материалов
Изучение закона Фарадея для различных условий осуществления анодного растворения Изучение влияния течения электролита на электрохимические процессы
Изучение процессов лазерных воздействий на материалы при использовании твердотельных и газовых лазеров
Изучение критериев разрушения при ультра-звуковом и комбинированных воздействиях

