

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра машиностроения и транспорта

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

« _____ » декабря 2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ**

Б1.Б.25

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

**15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ
Технология машиностроения**

Программа прикладного бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ.....	4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	4
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	5
4.3 Лабораторные работы.....	20
4.4 Семинары / практические занятия.....	20
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	20
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	21
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	22
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	22
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	22
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	23
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ.....	23
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата	34
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	35
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	35
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	36
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	39
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	40
Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....	41

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является – освоение на практике и совершенствование технологий, систем и средств машиностроительных производств, включая участие в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий с учётом научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта в данных областях, разработка, эксплуатация и реорганизация машиностроительных производств.

Задачами изучения дисциплины является:

- развитие способности использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
ОПК-1	способность использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда	знать: - основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества; уметь: - разрабатывать процессы изготовления машиностроительных изделий требуемого качества; владеть: - навыками изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б.1.Б.25 Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки относится к базовой части.

Дисциплина Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как:

- Прогрессивные методы и технологии обработки металлов;
- Процессы и операции формообразования;
- Технологические процессы в машиностроении.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки представляет основу для выполнения учебно-исследовательской работы.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)		
			учебные занятия		самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	
1.	Общие сведения об электротехнологии	14	4	-	10
1.1	Общие положения	4	2	-	2
1.2	Классификация методов ЭФХКО	4,5	0,5	-	4
1.3	Области применения и эффективность методов ЭФХКО	5,5	1,5	-	4
2.	Отделочные процессы механической обработки деталей	14	4	-	10
2.1	Отделка поверхностей лезвийными инструментами	2,5	0,5	-	2
2.2	Доводка поверхностей абразивными инструментами	2,5	0,5	-	2
2.3	Отделочная обработка металлов давлением	3	1	-	2
2.4	Отделочная обработка поверхностей выглаживающим инструментом	3	1	-	2
2.5	Расчет времени обработки при отделочных операциях	3	1	-	2
3.	Основные методы и способы ЭФХКО	68	4	28	36
3.1	Методы, основанные на электрохимическом воздействии	45	1	20	24
3.2	Методы, основанные на использовании теплового действия электрического тока	9	1	4	4
3.3	Обработка, основанная на использовании механического действия тока или электромагнитного поля	9	1	4	4
3.4	Комбинированные методы обработки	5	1	-	4
4.	Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО	12	2	-	10
4.1	Оборудование для электроэрозионной обработки	4,5	0,5	-	4
4.2	Генераторы импульсов	2,5	0,5	-	2
4.3	Регуляторы межэлектродного промежутка	2,5	0,5	-	2
4.4	Типовая структура оборудования для ЭХО	2,5	0,5	-	2
	ИТОГО	108	14	28	66

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Введение

Сверхтвёрдые материалы, алмаз, история возникновения, область применения

Сегодня почти 90% всего количества добываемых природных алмазов расходуется на промышленные нужды. Чтобы добыть один карат алмазов необходимо переработать от 5 до 25 тонн породы. Ныне производство синтетических алмазов намного превосходит добычу природных, а темпы потребления рукотворного камня уже достигли 90...100 млн. каратов в год.

Каков же возраст алмаза?

Уральским алмазам, найденным в ордовикских отложениях, не меньше 420...450 млн. лет, бразильским и боливийским, обнаруженным в каменноугольных отложениях – 320 млн. лет, якутским алмазам – 200...270 млн. лет. А вообще находки алмазов отмечены как в древнейших породах (им 2 млрд. лет, так и в более молодых миллионнолетних).

Алмаз по праву считается «камнем номер один» среди всех драгоценных камней. Именно алмаз обладает:

- самой высокой твёрдостью;
- самым низким коэффициентом теплового расширения;
- наименьшей сжимаемостью;
- самым низким коэффициентом трения;
- высокими теплопроводностью и диэлектрическими свойствами;
- чрезвычайно высокой химической стойкостью;
- наконец, один из самых редких минералов в природе.

Для алмаза создана особая мера массы – карат. По одной версии наименование этой физической величины является производной от греческого слова «кератония», что означает «маленький рог», – так называлась акация, семена которой служили у греков своего рода

гирьками при взвешивании золота и драгоценных камней. По другой версии слово «карат» происходит от «куара» – так греки называли коралловое дерево. Масса семечек обоих деревьев одинакова и равна в среднем 205 миллиграммам.

В 1914 году был введён единый – метрический карат, равный 200 миллиграммам (в СССР он официально введён с 1922 года).

Всего с момента добычи природных алмазов из недр земли извлечено (не считая России) более 245 тонн камня, тогда как золота добыто более 50 тысяч тонн.

Какие же алмазы различают?

Ювелирные – гудз, шипс, иррегулерз, меле, клизедж, чипс, меклиз, флатс. Технические – борт, крешинг борт, карбонадо, баллас.

Природные алмазы находят либо в коренных месторождениях, либо в россыпях. Коренные месторождения алмазов – трубки, заполненные магnezиальной магмой, которая называется кимберлитом (по названию южно-африканского посёлка Кимберли, где впервые такая трубка была обнаружена). Учёные полагают, что колыбель алмазов находится на глубине 100...150 км.

Некоторые свойства алмаза

Например, известно, что алмаз сгорает в струе чистого кислорода при 800°C, а при нагревании до 2500°C без доступа воздуха превращается в графит.

Только сплав натриевой (либо калиевой) селитры с содой способен разрушить алмаз: в этом сплаве при нагревании он постепенно окисляется и разрушается.

Алмаз не только чрезвычайно твёрд (его плотность 3,48...3,52 г/см³), но и хрупок. В кристалле алмаза имеются плоскости спайности, по которым кристалл сравнительно легко раскалывается на мелкие кристаллики. В технике это свойство называется анизотропностью. Иными словами, крепость алмаза в различных направлениях неодинакова и меняется от 100 до 500 раз.

В 1913 году двое английских учёных проникли с помощью лучей Рентгена внутрь кристалла алмаза. Стоит направить пучок рентгеновских лучей на алмаз, как он (и только он) начинает светиться, излучая глубокое внутреннее сияние.

Известны алмазы всевозможных цветов и оттенков – от смоляно-чёрного до бесцветно-прозрачного. Установлено, что алмазы различных цветовых оттенков обладают различной плотностью, объяснить эту закономерность ещё не удалось.

Однако человек научился по своему желанию изменять цвет алмазов. Например, если его подвергнуть облучению ультрафиолетовыми лучами, то потом некоторое время алмаз светится красно-багровым цветом.

Этапы становления инструментальной промышленности

1855...1860 годы – изобретение стали-самокала (резцы из неё в 2...3 раза более стойкие).

1897 год – появление быстрорежущей стали (увеличение скорости резания в 5...10 раз).

1900 год – изобретён стеллит – сплав, отличающийся высокой красностойкостью (скорость резания ещё более возросла).

1926...1928 годы – началась эра твёрдых сплавов (в СССР изобретён «победит»), позволивших ещё в десятки раз повысить скорость резания и вдесятеро увеличить стойкость режущих инструментов.

Искусственные алмазы

15.02.1953 – одна из шведских фирм получила 40 мелких синтетических алмазов. В 1959 году получен первый искусственный алмаз в СССР.

Одним из условий синтеза алмазов является, как известно, сверхвысокое давление. Под огромным давлением коренным образом меняются физико-химические свойства многих материалов. Например, чугун, мрамор, каменная соль – становятся пластичными, их можно ковать под молотом. Лёд, обработанный сжатием при 40 тысячах атмосфер, расплавится только при 109°C.

В настоящее время процесс получения синтетического алмаза протекает при температурах 1,2...1,7 тысячи градусов и давлениях 48...50 тысяч атмосфер. Существует три метода получения синтетических алмазов:

– воздействием на исходный углеродосодержащий материал высоким давлением и температурой в присутствии металлического катализатора;

– воздействием на тот же исходный материал энергией взрывной волны – синтез осуществляется в миллионные доли секунды;

– при обычном атмосферном давлении (и ниже) и температуре 1,0...1,2 тысячи градусов путём физико-химического наращивания атомов углерода на алмазную заправку.

Семь марок отечественного синтетического алмаза:

АСО – (алмаз синтетический обычной прочности) – кристаллы с повышенной хрупкостью, но с весьма развитой поверхностью, т.е. с большим числом режущих кромок.

АСР – более прочные и менее хрупкие кристаллы.

АСВ – кристаллы высокой прочности.

АСК – крупнокристаллический.

АСС – кристаллы блочной формы, высокой прочности.

АСН – кристаллы с нормальной режущей способностью.

АСМ – монокристаллы с повышенной режущей способностью.

Однако СА очень мелки, а для изготовления лезвийных режущих инструментов необходимы более крупные кристаллы.

В 1967 году в Институте физики высоких давлений АН СССР из порошков СА был получен новый сверхтвёрдый поликристаллический материал «**баллас**» (тёмный цвет, масса 0,4...0,8 карата). Изготавливают режущие пластины, волокна.

Годом позже там же создали поликристаллический синтетический «**карбонадо**». Резцы из него обрабатывают ситаллы, рубин, стеклопластики, фарфор, германий, керамику.

Почему поликристаллические? Потому что состоят из множества мельчайших алмазных кристалликов, глубоко проросших, внедрившихся один в другой.

Появился и алмаз, синтезированный с помощью спекания при давлении смеси порошков синтетического и природного алмазов «**СВ**». Гораздо более прочен, чем природные алмазы.

Выглаживание

«Утюгом» служит кристалл алмаза (баллас, карбонадо) массой 0,2...1,0 карата. Его рабочая поверхность тщательно отшлифована в виде полусферы. Чистота – не ниже 14-го класса. Вектор твёрдости кристалла перпендикулярен обрабатываемой поверхности.

Пример: обрабатываемую деталь, изготовленную из титанового сплава, предварительно заморозили, погрузив на некоторое время в жидкий азот. После того как деталь охладилась до температуры минус сто градусов, её подвергли выглаживанию. Так появилось криогенно-алмазное выглаживание.

Волока

Алмазная волока – это пластиночка натурального или СА (от 0,8 до 2,2 карата обязательно высокого качества), надёжно закреплённая в массивной стальной или латунной оправе. В алмазе просверлено отверстие для протягивания (волочения) проволоки (диаметром от 3 миллиметров до 12 микрон). Канал в волоке имеет сложную геометрическую форму. Он состоит из входной части (распушки), смазочного и рабочего конусов, калибрующей зоны, обратного конуса и выходной распушки.

Способы получения отверстий в волоке:

– алмазное сверло;

– электрическая искра – не обеспечивает высокую точность, операция длится 20...30 минут;

– с помощью ультразвука;

– с помощью пучка электронов – иногда происходит раскол алмазного кристалла;

– лазером – световым лучом прожигают в алмазе отверстие диаметром от 0,005 до 0,2 мм, за 1/5000 секунды, температура 50000°C (на Солнце – 6000°C).

Так родилось совершенно новое прогрессивное направление в промышленной практике – светотехнология

В заключение: на изготовление алмазных волок ежегодно расходуется около 3...3,5 млн. каратов «балласа».

Славутич – спеченная под высоким давлением смесь порошка твёрдого сплава, например марки ВК6, и крупного порошка СА (размер зерна 400...5000 микрон). Получен в 1967 году в Украинском институте синтетических сверхтвёрдых материалов и инструмента. Применяется для бурового инструмента.

Семья КНБ

В 1842 году английский химик Бальмен получил рыхлое порошкообразное вещество, которое назвал **гексагональный нитрид бора** (белый графит). И только в 1926 году было высказано предположение о том, что ГНБ можно превратить в сверхтвёрдый материал.

В 1957 году американский учёный Венторф синтезировал **кубический нитрид бора** (КНБ). Он нагрел ГНБ до 1,7...1,9 тысячи градусов одновременно подвергнув его давлению в 40...60 тысяч атмосфер. При давлении 63...67 тысяч атмосфер и температуре 1,8...2 тысячи градусов начинается рост кристаллов КНБ и синтезируется новый сверхтвёрдый материал **«боразон»**.

В СССР синтез КНБ был осуществлён в 1960 году академиком Верещагиным. Позднее в Украинском ИССМИ синтезировали другую разновидность КНБ – **кубонит**.

В настоящее время известны четыре способа синтеза КНБ:

- при высоком постоянном давлении либо при воздействии на ГНБ ударной волны;
- при давлениях, близких к нормальному и ниже;
- при сверхвысоких давлениях;
- при высоких давлениях и температурах в присутствии катализатора.

Ныне нитрид бора различают: гексагональный (альфа-BN), кубический (бета-BN) и гексагональный плотноупакованный вюрцитоподобный (гамма-BN).

Гексанит-Р – 1972 год, Украина. Сверхтвёрдый поликристаллический материал в виде цилиндров диаметром 8 и высотой 2,5...3 мм и массой 0,3...1,5 карата. Резцы, фрезы при чистовой и получистовой обработке твёрдых закалённых сталей, сплавов и чугунов.

Белбор – (белорусский нитрид бора) высокая твёрдость, теплостойкость, обработка резанием закалённых сталей и твёрдых сплавов.

Исмит – Украина, пластинки из исмита применяются для изготовления режущих вставок к резцам и фрезам.

Дисмит – (от «диамант» – алмаз и ИСМ – название института) получен спеканием мельчайших порошков СА (20...25%) и КНБ (75...80%) при высоком давлении в присутствии катализатора.

Кибор – Украина, не теряет своих высоких рабочих качеств при температурах до 1,4 тысячи градусов, на 20% прочнее СА.

Эльбор

Эльбор – (от Л (эль) – Ленинград) синтетический сверхтвёрдый материал, в состав которого входят КНБ (85...90%), окислы магния и кальция (5...2%) и тугоплавкие соединения (10...1%). Получают эльбор в виде порошка (размер зёрен не более 250 микрон).

В начале 60-х годов был синтезирован ещё один «сорт» эльбора – **эльбор-Р** (резцовый). Синтезируют в виде цилиндров диаметром 3,5...7 и высотой 4...6 мм.

Чтобы изготовить резец из природного алмаза, требуется: его аттестация, ориентация, заточка, доводка. У эльбора-Р только заточка и доводка. Всё остальное уже сделано при синтезе эльбора.

Узким местом алмазного реза является его крепление в державке. Перед пайкой кристалл подвергают металлизации, т.е. покрытию никелем, серебром и др., т.к. он обладает плохой адгезией к припоям. Механический способ крепления иногда приводит к образованию в кристалле трещин. Эльбор-Р припаявается при помощи пайки сплавом, хорошо схватывающимся и с эльбором и со стальной державкой.

Применяется для чистовой и получистовой обработки деталей из чугуна, закалённых сталей и всех труднообрабатываемых материалов. После чистового точения эльбором отпадает необходимость в шлифовании поверхности.

Сколько зёрен содержится в одном карате СА или эльбора?

При зернистости 630/500 – 650; 500/400 – 1,2 тысячи; 100/80 – 34 тысячи; 50/40 – 600 тысяч; в субмикропорошках – до 10 млрд.

Применение алмаза, эльбора и других сверхтвёрдых материалов в современном производстве

Металлургия и машиностроение – производство деталей и машин, режущий инструмент, наконечники приборов для измерения твёрдости материалов, контакты для автоматического контроля и т.д.

Приборостроение, радиоэлектронная и оптико-механическая промышленность – опоры и подшипники для особо точных приборов, игольчатые свёрла, кристаллы алмазов для рентгеновской и радиационной техники, полупроводники и т.д.

Электротехническая промышленность – инструмент для обработки электромашин, выпрямителей, трансформаторов, магнитных систем, волоки, иглы для гравирования.

Горная и горнодобывающая промышленность – пилы, коронки и долота.

Строительная индустрия – абразивный инструмент, стеклорезы, шлифовальные круги больших диаметров для обработки бетонных покрытий дорог и взлётно-посадочных полос аэродромов, свёрла, пасты.

Промышленность медицинского оборудования – изготовление деталей оптической и рентгеновской аппаратуры, очков и оправ.

Лёгкая промышленность – инструмент для изготовления хрустальной, стеклянной посуды, бильярдных шаров, зеркал, волоки

Раздел 1. Общие сведения об электротехнологии

Тема 1.1. Общие положения

К ЭФХКО материалов относят методы изменения формы, размеров, шероховатости и свойств заготовок, происходящие под воздействием электрического тока, электромагнитного поля, плазменной струи, а так же высокоэнергетических импульсов. Отличительной особенностью этих методов является использование электрической энергии непосредственно для технологических целей без промежуточного преобразования ее в другие виды энергии.

Большинство процессов и операций электрофизической, электрохимической и комбинированной обработки сопровождается удалением с обрабатываемых поверхностей заготовок припуска. Такие процессы и операции относят к размерной обработке. Некоторые процессы осуществляют без снятия припуска с обрабатываемых поверхностей; эти процессы относят к безразмерной обработке.

Каждый из методов обладает уникальными технологическими возможностями, но все они более энергоёмки и менее производительны в сравнении с методами механообработки. Поэтому использование этих методов оправдано только в следующих случаях:

1. Для обработки конструкционных материалов, имеющих низкую обрабатываемость лезвийным и абразивными инструментами, в том числе высоколегированных сталей, твёрдых сплавов, ферритов, керамики, полупроводников, ситалла и др.

2. Для обработки деталей сложной геометрической формы из труднообрабатываемых материалов (пресс-формы, детали лопаток турбин и т. п.).

3. Для обработки миниатюрных тонкостенных нежестких деталей, а также деталей сложной формы с пазами и отверстиями.

Эффективность применения методов проявляется тем больше, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности детали, выше физико-механические свойства материала и чем большие трудности возникают при ее изготовлении методами механической обработки.

У электрохимикофизических и комбинированных методов обработки существует свой ряд преимуществ:

- большие технологические возможности изменения форм, размеров, шероховатости;
- получение сложных по форме поверхностей заготовок при сравнительно простой кинематике процессов;
- относительная простота, низкая себестоимость и высокая стойкость применяемого инструмента, а иногда и отсутствием его износа;

– возможность применения робототехнических средств и комплексной автоматизации операций и процессов;

– простая утилизация шлама.

Но также этим методам присущи и некоторые недостатки или ограничения, которые обусловлены их физической сущностью:

– повышенная энергоёмкость процессов;

– относительная громоздкость применяемого оборудования и оснастки;

– необходимость размещения оборудования в отдельных помещениях.

Общий признак ЭФХКО – тем большая их эффективность, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности заготовки, выше физико-механические свойства её материала (особенно твёрдость и вязкость) и большие технологические трудности, возникающие при выполнении операций традиционными методами, например механической обработки.

Тема 1.2. Классификация методов ЭФХКО

На рис.1.1 перечислены методы ЭФХКО, сгруппированные по характеру основных реализуемых электрохимических или электрофизических явлений с учетом некоторых принципиальных особенностей, отличающих их от традиционных технологических методов обработки материалов, использующих преимущественно механическое (силовое) воздействие на обрабатываемые материалы.

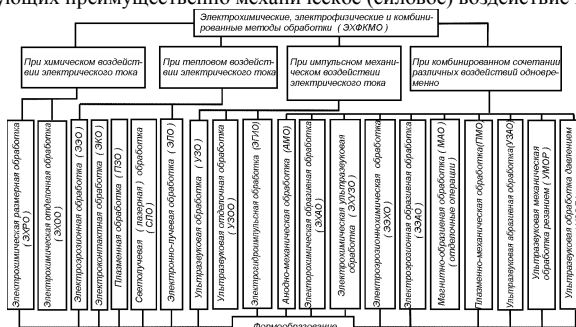


Рис. 1.1. Группы методов ЭФХКО

Тема 1.3. Области применения и эффективность методов ЭФХКО

ЭФХКО в зависимости от назначения и условий применения может иметь результатом формоизменение обрабатываемой заготовки или детали, изменение состояния их поверхности, а также придание им специальных свойств.

Соответственно, ЭФХКО находит применение во всех отраслях промышленности, обрабатывающих или перерабатывающих любые материалы – чаще всего металлы. Наиболее широко используется ЭФХКО на машиностроительных предприятиях всех видов, в приборостроении и точной механике, электротехнической и радиоэлектронной промышленности, инструментальном производстве.

Ниже даны условные оценочные характеристики типовых методов ЭФХКО по следующим показателям: выгодности применения по сравнению с обработкой резанием в зависимости от сложности формы и твердости изделия (табл. 1.); влиянию на структуру поверхности (табл. 2).

Таблица 1

Ориентировочное сопоставление выгодности ЭФХКО по сравнению с обработкой резанием

Метод (операция)	Геометрическая форма изделия							
	особо сложная		сложная		средней сложности		простая	
	вмсо-кля	виз-кля	вмсо-кля	виз-кля	вмсо-кля	виз-кля	вмсо-кля	виз-кля
АМР	3-5	2-3		2-3	3-4	2-3	3	2-3
УЗР				2		2	3-4	3
УЗМР				2-3	3			3
ЭАБО	3-4	3		3				3
ЭИМ электродом: профильным			3-4		2-4			
ЭИМ электродом: непрофильным					2-3		3-4	
ЭИС электродом: профильным	4-5	3-3		2-3		2-3		2-3
ЭИС электродом: непрофильным					3		3	
ЭКО	3-4		3		3			
ЭХП	4-5	3	3-6	3	3-4	3	3-4	
ЭХРО	3-4	3-4	3-4	2-3	3-4	2-3	3-4	
ЭХУЗ	3-4			2-3		2-3		

Примечание. Значения баллов оценки выгодности применения ЭФХКО вместо обработки резанием: 1 – совершенно нецелесообразно; 2 – недостаточно выгодно; 3 – несколько выгодно; 4 – безусловно выгодно; 5 – иначе нельзя сделать.

- Где АМР – анодно-механическое резание;
- УЗМР – механическое резание с вводом ультразвуковых колебаний;
- УЗР – ультразвуковое резание;
- ЭАБО – электроабразивная обработка;
- ЭИМ – электроимпульсная обработка (разновидность ЭЭО);
- ЭИС – электроискровая обработка (разновидность ЭЭО);
- ЭКО – электроконтактная обработка (разновидность ЭЭО);
- ЭХП – электрохимическое полирование;
- ЭХРО – электрохимическая размерная обработка;
- ЭХУЗ – электрохимико-ультразвуковая обработка.

Таблица 2

Приближённая оценка некоторых методов ЭФХКО по их влиянию на качество обработанной поверхности

Метод (операция)	Параметр шероховатости поверхности, мкм		Структурные изменения подповерхностного слоя	
	Ra	Rz	Оценочный балл качества	Глубина слоя, мкм
АМР: чистовая	0,63—1,25	30—40	2	20—200
АМР: черновая	—	20—160	1	200—500
УЗР	0,16—2,5	10—20	—	—
УЗМР	0,63—2,5	—	—	—
ЭАБО: чистовая	0,050—0,32	—	4	—
ЭАБО: черновая	0,32—2,5	—	—	—
ЭИМ электродом: профильным	1,25—2,5	10—40	2	100—200
ЭИМ электродом: непрофильным	—	40—320	1-2	800—1500
ЭИС электродом: профильным	1,25—2,5	10—40	—	60—100
ЭИС электродом: непрофильным	—	—	2-3	—
ЭКО: чистовая	0,63—2,5	—	—	20—50
ЭКО: черновая	—	40—160	2	200—300
ЭКО: непрофильная	0,32	10—20	3	20—30
ЭХП: чистовая	—	20—160	2	200—500
ЭХП: черновая	—	40—320	1	500—5000
ЭХРО	0,02—1,25	0,05—0,1	5	—
ЭХУЗ	0,32—2,5	10—20	4	—

Примечание. Значения оценочных баллов, характеризующих изменение структуры обрабатываемой поверхности: 1 – заметно ухудшается строение на некоторую глубину; 2 – ухудшаются единичные показатели; 3 – почти не изменяется строение, но возможны дефекты; 4 – остается практически неизменной или улучшается; 5 – улучшается большинство показателей.

Раздел 2. Отделочные процессы механической обработки деталей

Тема 2.1. Отделка поверхностей лезвийными инструментами

Тонкое точение производится при малых глубинах резания - до 0,5 мм, малых подачах - 0,01...0,25 мм/об и при возможно больших скоростях резания - 100 м/мин и больше. Тонкое точение применяется для обработки поверхностей из закалённой и незакалённой стали, серых, ковких и легированных чугунов, цветных металлов и сплавов, различных пластмасс вместо шлифования. Режущий инструмент при тонком точении оснащается пластинками кубического нитрида бора (эльбора, гексанида и др.), природного и синтетического алмаза, из металлокерамического твёрдого сплава металломинералокерамики, минералокерамики. При этом на обычных токарных и токарно-винторезных станках, находящихся в хорошем состоянии, можно получить шероховатость $Ra = 1,25...0,63$ мкм и точность по 7-8-му квалитетам, а на особо точных (прецизионных) станках - точность 5-го квалитета.

Тонкое фрезерование чаще всего производят при малой глубине резания, до 3 мм, небольших подачах 0,02...0,2 мм/об фрезы и при возможно больших скоростях резания - 150 м/мин и выше. Фрезы оснащаются пластинками из эльбора-Р, гексанида-Р, естественных и синтетических алмазов, из металлокерамических твёрдых сплавов, металломинералокерамики и минералокерамики. На обычных фрезерных станках, находящихся в хорошем состоянии, возможно получение шероховатости поверхности $Ra \square \square = 1,25...0,32$ мкм и точности обработки 6-8-го квалитетов, а на особо точных (прецизионных) станках - шероховатости Ra 0,32 мкм и точности 5-6-го квалитетов.

Плоское фрезерование применяется для обработки плоскостей и тел вращения.

Разновидностями тонкого фрезерования являются «бреющее» фрезерование тел вращения и фрезерование плоскостей однозубыми фрезами с широким лезвием. «Бреющее» фрезерование тел вращения осуществляется чаще всего мелкозубыми быстрорежущими фрезами, при обработке незакалённой стали вместо шлифования, производительность труда при этом в 2-3 раза выше, чем при шлифовании. В этом случае заготовка устанавливается в центрах и вращается (круговая подача), а режущий инструмент (фреза с мелкими зубьями) вращается с большой встречной скоростью и с периодически осуществляемой поперечной подачей на заготовку.

Фрезерование плоскостей возможно однозубыми торцевыми фрезами с широким лезвием, оснащённым пластинкой из металлокерамического твёрдого сплава.

Тема 2.2. Доводка поверхностей абразивными инструментами

Хонингование внутренних (рис. 2.1) и наружных поверхностей производится с помощью головки (хона) с абразивными брусками. При этом заготовка закрепляется на столе хонинговального станка, а хон устанавливается на шпиндель станка, вращается со скоростью \square и одновременно совершает поступательно-возвратное движение $\square \square$, а радиальное перемещение - за счёт пружин Н.

Чаще всего хонингованием обрабатываются цилиндрические отверстия как гладкие, так и прерывистые, сравнительно редко - конусные и эллипсные отверстия. Хонингование применяют также для обработки наружных цилиндрических поверхностей. Разновидностью хонингования поверхностей является охватывающее алмазное хонингование при обработке наружных цилиндрических поверхностей, поршней, поршневых колец. Используют хонингование и для обработки зубчатых колёс. При этом хон представляет собой абразивное зубчатое колесо соответствующего модуля, косозубое - для зубохонингования прямозубых колёс и прямозубое - для косозубых.

Хонингованием обрабатываются заготовки из различных материалов: серого, легированного и закалённого чугуна; незакалённой и закалённой углеродистой и легированной сталей; медных, алюминиевых, магниевых и других сплавов и т.д. На ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта хонингуются внутренние поверхности цилиндрических втулок двигателей тепловозов.

Хонингованием достигается повышение точности формы, размеров и снижение шероховатости поверхностей различных заготовок. Применяется хонингование после тонкого растачивания и обтачивания, шлифования, зенкерования, развёртывания, протягивания. Хонингованием поверхностей абразивными брусками можно получить точность размеров отверстия в пределах 5-7-го квалитетов и шероховатость $Ra = 0,32...0,04$ мкм. При хонинговании используются алмазные, эльборовые и абразивные бруски.

Алмазные бруски применяют из натуральных (А) и синтетических (АС) алмазных порошков различных марок (АСР, АСВ, АСК, САМ, АСМ) на металлической, чаще всего керамической и реже органической связках. Брусок (ГОСТ 16606-71) состоит из алмазonoсного слоя и корпуса, изготовленного из мягких сталей или металлокерамики, скреплённых пайкой или клеенных эпоксидной смолой с отвердителями, очень редко с механическим креплением. Суммарная ширина брусков берётся от 0,15 до 0,35 длины окружности обрабатываемого отверстия, возможно большей ширины, так как при этом получается более интенсивный съём металла и устраняется исходная погрешность детали. Длина бруска принимается равной 0,7...1 длины обрабатываемого отверстия, а если отверстие очень длинное ($L/d > 3$), то длину брусков не связывают с длиной обрабатываемого отверстия. Концентрация алмазов в бруске 100-150 %.

Эльборовые хонинговальные бруски (ЛБХ) применяются для обработки закалённых деталей. При этом себестоимость операции, по сравнению с применением алмазных брусков, можно снизить примерно вдвое.

При хонинговании сталей и ковких чугунов преимущественно применяют бруски из электрокорунда, а для серых чугунов, алюминиевых сплавов, латуней, бронз - из карбида кремния. Чаще всего применяют керамическую связку, и только для обработки медных и алюминиевых сплавов наряду с керамической используют и бакелитовую связку.

Хонинговальные станки обычно имеют скорости не больше 20 м/мин. На окончательных операциях скорость назначается на 20-50 % меньше чем на предварительных.

Суперфинишное - доводка поверхностей абразивными мелкозернистыми колеблющимися брусками с малыми удельными давлениями - производится при обработке наружных и внутренних поверхностей (рис.2.2) для достижения высокой точности и очень малой шероховатости.

При суперфинишном обрабатываемая деталь вращается со скоростью, а суперфинишная головка совершает колебательное движение со средней скоростью $\square \square \square \square$ и получает продольную подачу S вдоль детали или относительнооповки. Абразивные бруски пружинами прижимаются к поверхности детали с определённым удельным давлением P .

Короткие поверхности (ступени, буртики) обрабатываются методом врезания (рис. 2.2, б). При обработке плоских торцевых и сферических поверхностей применяются вместо абразивных брусков шлифовальные мелкозернистые круги чашечной формы, которые вращаются со скоростью и получают колебательное (рис.2.2, ж) или планетарное (рис.2.2, д) движение.

Зёрна абразивных брусков производят микрорезание со снятием тончайших стружек (0,1...0,5 мкм) и трение с пластическим отеснением металлов. При микрорезании исправляется погрешность формы обрабатываемой поверхности и удаляется дефектный слой. При трении брусок выглаживает, полирует обрабатываемую поверхность, придавая ей зеркальный блеск. Суперфинишное - эффективный вид отделочной обработки поверхности различных деталей: коленчатых и распределительных валов, клапанов поршневых пальцев, поршней двигателей внутреннего сгорания, плунжерных пар топливных насосов, шпинделей станков, калибров и др.

Перед суперфинишным термообрабатываемые поверхности деталей обрабатываются тонким шлифованием, а незакалённые - тонким точением или тонким фрезерованием.

Для суперфинишного применяются как специальные суперфинишные станки в массовом и серийном производстве, так и универсальные станки, оборудованные суперфинишными головками - вибраторами, в условиях мелкосерийного и индивидуального производства.

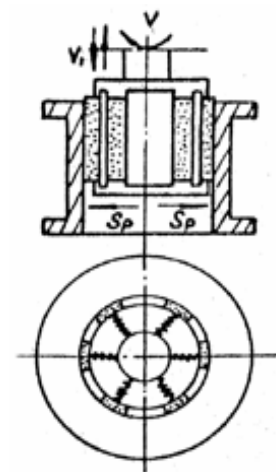


Рис. 2.1. Схема хонингования поверхности отверстия

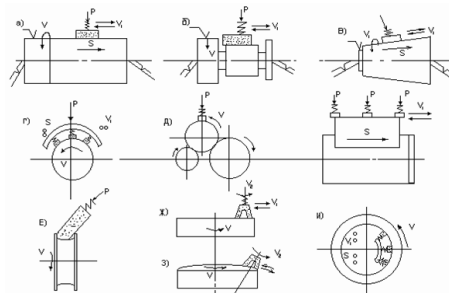


Рис. 2.2. Схемы суперфиниширования различных поверхностей:
а - цилиндрических с продольной подачей; б - цилиндрических с врезанием;
в - конических с продольной подачей; г - цилиндрических с продольной
подачей (вид сбоку); д - цилиндрических - бесцентровое;
е - тороидальных поверхностей (желоб кольца подшипника);
ж - торцевых плоских; з - торцевых сферических;
и - цилиндрических внутренних с продольной подачей

При обработке легированных сталей высокой твердостью эльборовые брусочки обеспечивают большую производительность, чем брусочки из карбида кремния, и имеют значительно более высокую стойкость.

Твердость брусочков так же, как и при абразивном шлифовании зависит от твердости обрабатываемого материала, и выбирается по правилу: чем тверже обрабатываемый материал, тем мягче брусочек и наоборот. Критерием правильности выбора брусочка по твердости являются его быстрая прирабатываемость к обрабатываемой поверхности.

В процессе суперфиниширования используют смазочно-охлаждающие жидкости, подаваемые обильной струей на входную кромку брусочка, с учетом направления движения детали. Так, при суперфинишировании закаленных сталей применяется смесь керосина (85-90 %) и машинного или индустриального масла (15-10%) с добавлением олеиновой кислоты (3-5 %) при обработке незакаленных сталей и пластичных сплавов содержание масла в СОЖ увеличивается до 70-80 % или даже используется только масло или смесь легких масел с добавлением олеиновой кислоты.

Доводка (лаппингование) - технологический процесс отделочной обработки до высокой точности и очень малой шероховатости различных поверхностей (плоских, фасонных отверстий небольшого диаметра, цилиндрических наружных поверхностей шариков и роликов для подшипников и др.), используется для притирки деталей, работающих в паре (плунжеров и гильз топливных насосов, корпусов и игл форсунок, клапанов двигателей внутреннего сгорания, деталей гидроаппаратуры и др.).

При доводке точность геометрических форм и размеров достигает десятых долей микрона (0,1...0,5 мкм), а среднее арифметическое отклонение $Ra \square \square = 0,01$ мкм.

Сущность доводки заключается на первом этапе в микрорезании (резании, царапании), когда исправляется форма и изменяются размеры обрабатываемой поверхности, а на втором этапе происходит трение с пластическим оттеснением материала, при котором уменьшается высота неровностей, «выглаживается» обрабатываемая поверхность.

В процессе доводки на обрабатываемой поверхности образуются окисные пленки и адсорбированные слои, которые снижают прочность поверхностного слоя и уменьшают их сопротивляемость разрушению. Если при этом вводить в абразивные пасты или суспензии, применяемые при доводке, химически активные жидкости (олеиновая кислота, стеарин и др.), то процесс доводки ускорится.

Наиболее совершенной и экономичной является доводка абразивными кругами с нанесенной смазкой. В зависимости от зернистости абразивных материалов и кругов можно производить грубую, чистовую и тонкую доводку.

Для доводки используют микропорошки (М40...М1) из различных абразивных материалов: электрокорунда (25А, 24А, 23А, 22А, 16А, 15А, 14А, 13А, 12А), карбида кремния зеленого (КЗ), карбида бора (В4С), окиси алюминия (глинозем Al_2O_3), прокаленной при различных температурах, окиси хрома, алмазов (А, АС), эльбора (Л).

Кроме абразивных порошков в доводочные пасты включают олеиновую кислоту, парафин, стеарин, говяжий жир, керосин, различные масла (вазелиновое, касторовое, костное и др.). Пасты ГОИ бывают: на основе окиси хрома с добавлением олеиновой кислоты, стеарина или парафина, селикагеля, жира.

В качестве притирочных при доводке чаще всего применяют чугуны, так как они хорошо сохраняют точность формы, а структура позволяет шаржировать их абразивными зёрнами.

Доводку цветных металлов, сплавов и им подобных мягких материалов производят притирами, изготавливаемыми из олова, свинца и других материалов, а точных отверстий небольшого диаметра (например, гильз топливных насосов дизелей) – разрезными притирами из мягкой стали.

Полирование применяют для декоративной отделки поверхностей и подготовки деталей под гальванические покрытия (хромирование, никелирование и др.). Производят вручную и механически на токарных, сверлильных и других станках с помощью абразивных шкурков и мягких кругов из войлока, ткани, прессованной бумаги и др. Размерное полирование выполняют абразивными шкурками и лентами, на которые наклеивается или наносится в виде паст абразивный порошок (алмазный, эльборовый, корундовый, карборундовый и др.). Шероховатость поверхности при полировании достигает $Ra \square \square = 1,6 \dots 0,1$ мкм. Точность детали не изменяется и остается такой же, какая была до полирования.

На металлообрабатывающих предприятиях находит применение **гидрополирование**, заключающееся в том, что струя рабочей жидкости (чаще воды) вместе с абразивным порошком под давлением 4...6 кг/мм² с большой скоростью (50...70 м/с) направляется на обрабатываемую поверхность и полирует ее. Размеры детали почти не меняются, а поверхность получается матовой с шероховатостью $Ra = 2,5 \dots 0,32$ мкм и наклепанной, благодаря чему деталь становится более надежной и долговечной в эксплуатации.

Тема 2.3. Отделочная обработка металлов давлением

Обработка давлением заключается в пластическом деформировании поверхностного слоя. При этом появляются наклеп и остаточные сжимающие напряжения, уменьшается шероховатость обработанной поверхности до $Ra = 0,63 \dots 0,04$ мкм, повышается точность до 5-8-го квалитетов, увеличивается прочность и, прежде всего - усталостная прочность, коррозионная стойкость. Применяется большое разнообразие методов отделочно-упрочняющей обработки.

На предприятиях находят применение накатка роликами и шариками и др. Одним роликом (для жестких деталей), двумя или тремя роликами (для деталей малой жесткости) производят накатку наружных поверхностей, галтелей (шеек осей подвижного состава и валов), радиусных канавок (валов, поршней), плоских поверхностей (деталей со сварными швами, клиньев, направляющих и т.д.), раскатывание цилиндрических, конусных и фасонных отверстий (отверстий цилиндров, маховиков, шестерен, гильз и др.).

Шариковыми накатками обрабатывают торцевые поверхности вращения различных корпусных деталей, плоскости (ползуны, направляющие станков), наружные цилиндрические, конусные и криволинейные поверхности (валы, оси, коленчатые валы, цапфы и т.д.), радиусные канавки и галтели цилиндрических поверхностей (деталей осей, цапфы), цилиндрические, конические и фасонные отверстия, радиусные канавки в отверстиях (гидравлические и пневматические цилиндры, гильзы двигателей внутреннего сгорания). При этом достигаются 7-8-й квалитеты точности и шероховатость $Ra = 0,63 \dots 0,16$ мкм.

При накатке применяются разные по форме рабочего профиля ролики. Рабочий профиль всех накатных роликов отделяется до малой шероховатости $Ra = 0,08 \dots 0,04$ мкм. Для обкатки поверхностей применяются чаще всего однороликовые обкатки и шариковые с диаметром шариков от 1,6 до 40 мм от стандартных подшипников качения, в зависимости от радиусов галтелей. При обработке отверстий диаметром от 20 мм и больше применяются преимущественно двух-, трехшариковые раскатки.

Тема 2.4. Отделочная обработка поверхностей выглаживающим инструментом

В металлообработке получает все большее распространение процесс отделочно-упрочняющей обработки с помощью кристаллов алмаза или других сверхтвердых материалов. При этом производится пластическое деформирование обрабатываемой поверхности на глубину 0,20...0,30 мм.

Выглаживающий инструмент, имеющий рабочую часть в виде выпуклой криволинейной поверхности (цилиндрической, сферической, конусной, тороидальной) скользит по обрабатываемой поверхности и снимает неровности, уменьшая шероховатость поверхности и упрочняя поверхностный слой металла. В результате выглаживания уменьшается шероховатость, упрочняется поверхностный слой, повышаются износостойкость, контактная выносливость, усталостная прочность и долговечность обработанной детали по сравнению с другими методами обработки.

При отделочно-упрочняющей обработке значительно уменьшается шероховатость поверхности (для незакаленной стали с $Ra = 2,5$ мкм до $Ra = 0,32$ мкм, а закаленной – с $Ra = 0,32$ мкм до $Ra = 0,08$ мкм, а для некоторых сталей до $Ra = 0,04$ мкм), изменяется микроструктура (зерна дробятся и вытягиваются в направлении деформации), упрочняется на 20-35 % поверхностный слой.

В качестве выглаживающего инструмента применяют натуральные, синтетические алмазы (баллас, карбонадо), синтетический корунд (рубин, лейкосапфир), минералокерамику и твердые сплавы (Т15К6, Т30К4). Возможно применение также кубического нитрида бора (эльбор-Р, гексанит-Р, исмит).

Наибольшую износостойкость при выглаживании имеет инструмент из натуральных алмазов.

Перед отделочно-упрочняющей обработкой производят чистовое или тонкое точение, чистовое или тонкое шлифование, развертывание, хонингование и другие методы обработки, которые обеспечивают требуемую шероховатость и точность размеров и формы. При износе рабочей поверхности выглаживающего алмазного инструмента образуется площадка износа, на которой наблюдаются риски или отдельные сколы и микровыглаживания.

Как и наружные, внутренние поверхности выглаживаются на универсальных сверлильных и расточных станках.

Чаще всего выглаживание производят за один проход. Но нужно учитывать, что очень малые подачи (менее 0,01 мм/об) и большое число проходов могут ухудшить качество поверхности вследствие ее перенаклепа. Скорость обработки при выглаживании можно изменять в значительных пределах 25...185 м/мин и даже больше. При увеличении скорости выглаживания более 300...350 м/мин на поверхности появляются цвета побежалости, что говорит о высоких контактных температурах.

Тема 2.5. Расчет времени обработки при отделочных операциях

Время обработки при отделочных операциях приводится для единичного и мелкосерийного производства.

Штучное время включает сумму времени: на установку и снятие детали - $T_{уст}$, и неполное штучное время на обработку поверхностей (одной или нескольких) - $T_{шт}$.

- при установке на станке одной детали:

$$T_{шт} = T_{уст} + T_{н.шт1} + T_{н.шт2} + \dots + T_{н.штn}, \text{ мин};$$

где $T_{н.шт1}, T_{н.шт2}$ и т.д. - соответственно для различных поверхностей одной детали.

- при установке на станке одновременно нескольких обрабатываемых деталей - n д (при лаппинговании и др.):

$$T_{шт} = (T_{уст} + T_{н.шт1} + T_{н.шт2} + \dots + T_{н.штn})/n_{д}, \square \square \square \text{ мин};$$

Время на установку и снятие детали (деталей) принимается в зависимости от типа станка с учетом способа установки и выверки.

Неполное штучное время на обработку поверхности (поверхностей) зависит от группы обрабатываемости материалов, состоит из основного технологического времени – $T_о$, вспомогательного времени, связанного с переходами - $T_{всп}$, времени на обслуживание рабочего места, личных надобностей и отдыха станочника – $T_{обсл}$:

$$T_{шт} = T_о + T_{всп} + T_{обсл}, \text{ мин.}$$

Основное технологическое время определяется по нормативам на режимы резания при отделочных операциях с учетом размеров детали, припуска на обработку, точности и шероховатости обработанной поверхности для условий единичного и мелкосерийного производства.

Время обработки заготовок при тонком точении, тонком строгании, тонком фрезеровании, отделочном развертывании, полировании, отделочно-упрочняющей обработке кристаллами алмаза определяется по формуле:

$$T_{шк} = T_{шт} + T_{нз}/n_{дмин},$$

где $n_{д} \square \square$ – количество деталей в партии.

В подготовительно-заключительное время включается время на получение и сдачу работы, чертежей, инструмента и приспособлений, на ознакомление с чертежом (включая инструктаж по работе), на наладку и настройку станка для выполнения данной работы. Подготовительно-заключительное время зависит от сложности работы, наладки и настройки и принимается на партию деталей, независимо от их количества в партии. Поэтому чем больше деталей в партии, тем меньше величина штучно-калькуляционного времени и тем выше производительность труда.

Раздел 3. Основные методы и способы эфхко

Тема 3.1. Методы, основанные на электрохимическом воздействии

Общие сведения

Методы электрохимической обработки материалов основаны на использовании явлений, вызываемых прохождением электрического тока через растворы проводящих ток жидкостей (электролитов). В процессе прохождения постоянного электрического тока через электролиты (в процессе электролиза), могут возникать различные физические и химические изменения в электролите и на поверхности проводников (электродов), погруженных в него (рис. 3.1.).

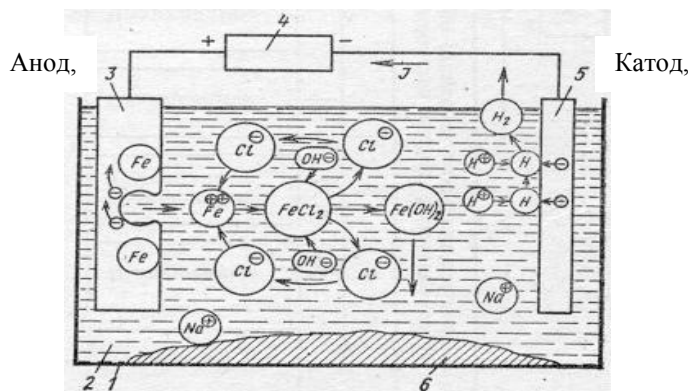


Рис. 3.1. Принципиальная схема электролитической ячейки и процесса электролиза (анодное растворение железа в растворе хлористого натрия):

1 – ванна; 2 – электролит, NaCl; 3 – анод, Fe; 4 – ИПТ; 5 – катод; 6 – иламп

Производительность процессов ЭХО зависит, в основном, от электрохимических свойств электролита, обрабатываемого токопроводящего материала и плотности тока.

Изменение МЭЗ вызывает изменение гидродинамических условий и перераспределение плотности тока и, как следствие, –

копирование профиля катода. Давление электролита контролируется манометрами.

Электрохимическая размерная обработка (ЭХО)

Размерная ЭХО заключается в получении деталей требуемой геометрической формы, размеров и качества поверхностей путем снятия с поверхности заготовок слоя металла припуска электрохимическим растворением.

Область эффективного применения электрохимической обработки обусловлена следующими технологическими особенностями:

- способ позволяет обрабатывать только электропроводные материалы;
- производительность способа не зависит от твердости и прочности обрабатываемых материалов и в несколько раз превосходит производительность обработки резанием заготовок из высокопрочных твердых сплавов, металлокерамики и сталей в закаленном состоянии;

- способ позволяет обрабатывать поверхности любой формы;
- в металле обработанной поверхности отсутствуют остаточные напряжения и наклеп.

Недостатком метода является ограничение его применения обработкой только таких электропроводных материалов, которые при растворении не образуют труднорастворимых пленок. Для этих материалов наряду с электрохимическим воздействием требуется механическое или электротермическое воздействие, удаляющее образующиеся оксидные пленки.

Рассмотрим схему процесса ЭХО на примере обработки заготовки из железа в электролите – водном растворе хлорида натрия. Заготовка подсоединяется к положительному полюсу источника питания и является анодом (+), а инструмент – к отрицательному полюсу и является катодом (-).

В электролите молекулы вещества диссоциируют на электрически заряженные ионы Na^+ и Cl^- , а ионы растворителя – на ионы H^+ и OH^- . Когда к металлическим электродам, погруженным в электролит, прикладывают разность потенциалов, положительно заряженные ионы (катионы) движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы (анионы) – к аноду, в результате электрическая цепь замыкается. При этом перенос электрических зарядов в металлических проводниках осуществляют электроны, а в электролите – ионы. Изменение носителей заряда в электрической цепи происходит на поверхности электродов, погруженных в электролит.

На аноде под действием электрического поля электроны перемещаются к источнику питания, «оттягиваясь» от поверхности анода внутрь металла, облегчая непосредственное взаимодействие молекул воды с положительными ионами решетки металла анода.

Это явление нарушает межатомные связи в приповерхностном слое металла и обуславливает переход положительных ионов металла в электролит – растворение анода. В электролите ионы металла анода образуют гидроксид металла $\text{Fe}(\text{OH})_2$, который выпадает в осадок в виде шлама и уносится движущимся электролитом со скоростью прокатки U .

Электролиты. Электрическая проводимость электролита зависит от его состава и происходящих в электролите явлений. Наиболее распространенными электролитами при ЭХО являются нейтральные водные растворы неорганических солей: хлориды, нитраты и сульфаты натрия и калия.

Концентрация электролита в процессе ЭХО может изменяться из-за образующегося шлама, нарушая при этом процесс ЭХО и снижая его производительность. Постоянство концентрации электролита обеспечивается технологически – его очисткой.

Точность размеров и формы деталей при ЭХО определяется точностью ЭИ и точностью его положения при обработке относительно оси его главного движения, неравномерностью ΔZ припуска заготовки и стабильностью всех параметров режима, ответственных за процесс электрохимического растворения.

В процессе обработки ЭИ не изнашивается, однако, находясь в электролите, он может коррелировать, поэтому рабочую часть электродов изготавливают из нержавеющей стали, а при изготовлении электродов сложной формы используют хорошо обрабатываемые коррозионностойкие медные сплавы – латунь и бронзу. Поверхность ЭИ обрабатывается с точностью, на два класса превышающей требуемую точность обрабатываемой заготовки.

Величина зазора (δ) оказывает влияние на точность обработки. Снижение величины зазора до минимально допустимого (0,02 мм) обеспечивает наибольшую точность.

Шероховатость поверхности и эксплуатационные свойства. Шероховатость обработанных ЭХО поверхностей определяется процессами растворения электрода, удаления шлама, исходной шероховатостью и фазовым составом материала заготовки.

Повышение анодной плотности тока, увеличение скорости прокатки электролита под большим давлением и снижение его температуры повышают чистоту обработанной поверхности.

Процесс ЭХО не оказывает на обрабатываемую поверхность ни температурного, ни силового воздействия, в поверхностных слоях отсутствуют остаточные напряжения и не происходят структурные изменения. Поэтому ЭХО обеспечивает высокое качество поверхностей с шероховатостью в диапазоне 0,4...1,6.

В качестве оборудования для размерной ЭХО используются станки, которые состоят из: источника тока в виде выпрямителя (ток 5000...30000 А); электрохимической ячейки, в которой происходит анодное растворение обрабатываемого материала; системы прокатки электролита с устройствами для термостабилизации и очистки; системы подачи катода, поддерживающей постоянным значением МЭП. В современных станках процессом обработки управляет система ЧПУ.

Формообразующие операции широко применяют при изготовлении деталей методами копирования, электрохимического точения и прошивания (рис.4.3, а, б, в).

Объемным копированием получают лопатки турбин из жаропрочных и титановых сплавов; рабочие элементы ковочных штампов и пресс-форм из высокопрочных инструментальных сталей; глухие полости, отверстия сложной формы из труднообрабатываемых металлов и сплавов (точность обработки $\pm 0,1$ мм).

Электрохимическое калибрование выполняют при подвижном и неподвижном ЭИ (рис. 3.2, г). Например, ЭХО после механической обработки шнеков, точность формы и размеров винтовых поверхностей возросла в 3...4 раза, а шероховатость снизилась до $Ra = 0,1$.

Отделочные операции – удаление заусенцев и полирование поверхностей – выполняют при неподвижных электродах. ЭХО позволяет удалять заусенцы в труднодоступных местах.

Электрохимическое полирование улучшает микрогеометрию деталей, снижая ее шероховатость на 2...3 класса, увеличивает прочностные характеристики обработанной поверхности, придает ей зеркальный блеск, получая шероховатость $Ra = 0,025$.

Процесс широко используется при изготовлении ответственных деталей, металлической оптики и подготовке поверхности для нанесения покрытий.

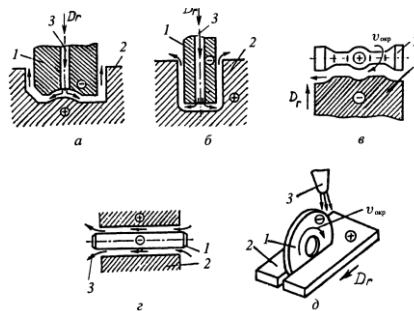


Рис. 3.2. Кинематическая схема операций ЭХО: а – объемное копирование, б – прошивание, в – отрезка, г – калибрование, д – вырезка; 1 – ЭИ, 2 – заготовка, 3 – подача электролита

Тема 3.2. Методы, основанные на использовании теплового действия электрического тока

Электроэрозионная размерная обработка (ЭЭО)

Электроэрозионная обработка основана на использовании явления электрической эрозии – разрушения материала электродов при электрическом пробое МЭП.

Размерная ЭЭО заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки путем съема материала припуска за счет управляемого процесса электрической эрозии.

На рис. 3.3 приведена условная схема процесса ЭЭО. Изолированный электрод-инструмент 1 (ЭИ) и обрабатываемая заготовка 2 погружены в рабочую диэлектрическую жидкость 8 и соединены с генератором электрических импульсов 3. Между электродом и деталью электрическим пробоем межэлектродного промежутка (МЭП) возбуждается импульсный разряд 4, который мгновенно нагревает микрочастицы электродов и контактирующую с ними жидкость. В результате в зоне разряда формируется газовый пузырь 5. В конце каждого импульса происходит схлопывание пузыря. При этом продукты эрозии – шлам – в виде гранул 6 удаляются из МЭП рабочей жидкостью 8, а на поверхности электрода-заготовки образуется эрозионная лунка 7. За время паузы происходит восстановление электрической прочности МЭП до исходного значения. Затем, при подаче следующего импульса напряжения, весь процесс повторяется, но пробой происходит уже там, где напряженность примет максимальное значение, – в зазоре между наиболее близкими микровыступами поверхности заготовки и инструмента. Процесс эрозии заготовки продолжается до полного удаления металла, находящегося на расстоянии электрического пробоя (0,01...0,15 мм).

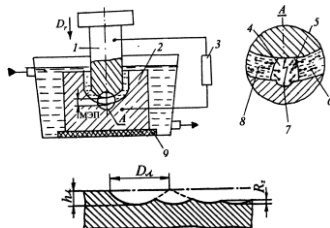


Рис. 3.3. Условная схема процесса ЭЭО:

1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая поверхность;
3 – генератор электрических импульсов; 4 – электрический разряд; 5 – газовый пузырь;
6 – продукты эрозии (шлам); 7 – эрозионная лунка; 8 – рабочая жидкость; 9 – изолятор

Обработанная поверхность представляет собой множество лунок глубиной h и диаметром D .

Профилированный ЭИ задает конфигурацию обрабатываемой поверхности детали. Материал ЭИ должен обладать высокой эрозионной стойкостью, прочностью, малым омическим сопротивлением и высокой обрабатываемостью методами резания. В качестве материала для электродов при обработке высокоуглеродистых инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе рекомендуются графит, медь и композиционный материал МНБ-3 (97% меди и 3% нитрида бора). Наименьшему износу подвержены медные или латунные диски и тонкая проволока диаметром 0,02...0,3 мм из меди, латуни, вольфрама и молибдена. В качестве рабочих жидкостей используют керосин, индустриальное масло И12А, трансформаторное масло и их смеси, воду, кремнийорганические жидкости и водные растворы двухатомных спиртов. Точность обработки, несоответствие формы деталей размерам ЭИ при ЭЭО обусловлено наличием межэлектродного зазора и изменением его размеров по ходу движения рабочей жидкости в МЭП. Двигаясь в МЭП, жидкость обогащается продуктами обработки и нагревается, изменяя свои свойства. В результате на этих участках происходит повышенный съем металла, вызывая конусность у обработанных поверхностей.

Процесс следует проводить за несколько проходов. При первом, черновом, проходе на жестком режиме снимается до 90% припуска, а последующие чистовые проходы на мягких и очень мягких режимах обеспечивают высокую точность, низкую шероховатость и высокое качество поверхности. Черновая и чистовая обработки ведутся сменным инструментом, точность чистового инструмента должна быть на 1...2 класса выше требуемой точности обработки детали.

При многообразии кинематических схем ЭЭО все схемы условно можно распределить на три группы.

1. Получение требуемой формы и точности поверхности заготовки копированием формы профилированного инструмента, представляющего собой обратное отображение формы детали. Операции, выполняемые по первой схеме, называются копировально-прошивочными (рис. 3.4, а, б, в).

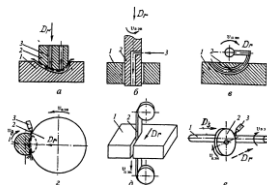


Рис. 3.4. Кинематические схемы процессов ЭЭО:

а – копирование; б – прошивание полостей с прямой осью; в – прошивание отверстий с криволинейной осью; г – отрезка вращающимся диском; д – отрезка проволокой (лентой); е – шлифование; 1 – обрабатываемая деталь; 2 – инструмент; 3 – подача рабочей жидкости

2. Заданная форма детали обеспечивается взаимным перемещением заготовки и непрофилированного инструмента (рис. 3.4, г, д).

3. Получение требуемой формы обеспечивается взаимным перемещением профилированного инструмента и заготовки. Используется для правки фасонных электроалмазных кругов, изготовления фигурных канавок и шлифования (рис. 3.4, е).

Заготовительные операции используют для получения заготовок из молибдена, вольфрама, никелевых сплавов, сплавов на основе титана, металлокерамики, нитинола и других труднообрабатываемых материалов.

Отрезку заготовок из проката и металлокерамики выполняют дисковыми ЭИ из меди, латуни. Разрезание точных малогабаритных заготовок выполняют на вырезных станках.

Прошивание отверстий на глубину до 20 диаметров выполняют стержневым ЭИ, до 40 диаметров – трубчатым ЭИ, при прошивке желательно вращать ЭИ (см. рис. 3.4, б).

Формирование рабочих полостей штампов, пресс-форм и вырубных штампов (см. рис. 3.4, а).

Обработка криволинейных каналов газовых турбин аэродинамического профиля осуществляют прошивкой с криволинейной осью (см. рис. 3.4, в).

Вырезание используют при изготовлении деталей электронной техники, вырубных штампов, шаблонов, лекал, фасонных резцов и т. д. Обработка ведется на вырезных станках проволокой (см. рис. 3.4, д).

Изготовление сеток, решеток и пазов проводят методом копирования групповым ЭИ (см. рис. 3.4, б), одновременно обрабатывая до 800 отверстий и более диаметром 0,2...2,0 мм, глубиной 2 мм с точностью $\pm 0,002$ мм.

Электроэрозионное шлифование применяют при чистовой обработке наружных и внутренних поверхностей труднообрабатываемых материалов, магнитных и твердых сплавов и т. п. (см. рис. 3.4, е). Точность и качество поверхности при обработке на чистовых и доводочных режимах соответствуют чистовым режимам, выполняемым шлифованием.

Основными разновидностями электроэрозионного метода являются электроискровая и электроимпульсная обработка.

Электроискровая обработка

Отличается широким диапазоном режимов обработки – от черновой, производительностью 1,5...10 мм³/с при шероховатости обработанной поверхности Rz = 160...40 мкм до отделочной, производительностью около 0,001 мм³/с при шероховатости поверхности Ra = 1,25...0,16 мкм.

Характерные черты этого процесса: сравнительно низкая производительность обработки, большой износ ЭИ, генерирование импульсов длительностью 10...200 мкс при частоте 2...5 кГц, использование прямой полярности, образование на обрабатываемой поверхности тонкого дефектного слоя толщиной 0,2...0,5 мм на черновых и 0,02...0,05 мм на чистовых режимах.

Применяется в машиностроении и инструментальном производстве при обработке заготовок небольших размеров, изготовлении твердосплавных матриц, штампов, обработке отверстий малого диаметра, шлифовании, растачивании профильными электрод-резцами. Инструмент является катодом, а обрабатываемая заготовка – анодом. Напряжение сети при обработке не превышает 250 В.

Особенностью процесса является значительный износ инструмента (износ катода соизмерим с износом анода).

Электроимпульсная обработка

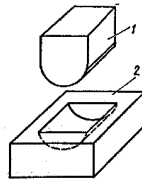


Рис. 3.5. Схема электроимпульсной обработки:

1 – ЭИ; 2 – обрабатываемая заготовка

Электроимпульсная обработка характеризуется: применением униполярных импульсов тока длительностью 0,5...1,0 мкс, скважностью 1...10; высокой производительностью: 100...300 мм³/с на грубых режимах с большой шероховатостью обрабатываемой поверхности и на более мягких режимах с шероховатостью поверхности Rz = 80...40 мкм; малым относительным износом ЭИ, составляющим для графита 0,1...0,5%; применением обратной полярности (присоединения ЭИ к положительному полюсу источника тока); применением в качестве источника тока преимущественно машинных генераторов импульсов низкой и средней частоты (400...3000 Гц); работой обычно с низким напряжением (25...30 В) и большой силой тока (50...5000 А).

Область применения – образование отверстий в деталях больших объемов, сложной формы с высокой шероховатостью поверхности и невысокой точностью в заготовках из обыкновенной и жаропрочной сталей (например, штампов, лопаток турбин, цельных роторов турбин, решеток и т. п.).

Электроконтактная обработка

Основана на механическом разрушении или деформации металлических поверхностей, производимом одновременно с нагревом или расплавлением этих поверхностей электрическим током (рис. 3.6). При этом методе в месте контакта двух токопроводящих поверхностей выделяется тепло ввиду повышенного сопротивления, а также электрического разряда.

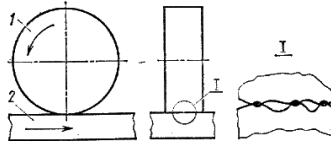


Рис. 3.6. Схема электроконтактной обработки:

1 – инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

Разрушение поверхности заготовки при обработке с напряжением свыше 10 В (до 20...22 В) происходит в значительной части или полностью в результате электродугового процесса – возникновения множества микро-дуг в месте контакта микронеровностей поверхностей электродов (инструмента и заготовки) (выноса I на рисунке).

Основной особенностью процесса является высокая производительность при низком качестве обработки. Производительность может достигать 3000 мм³/с при грубой поверхности и глубине измененного слоя в несколько миллиметров. Во всех случаях отмечаются наплывы на кромках обработанной поверхности.

Электроконтактная обработка может выполняться как в воздушной, так и в жидкой среде. Производительность обработки почти линейно растет с увеличением напряжения и мощности источника питания. Этот метод применяют в основном для обработки крупногабаритных изделий. Он может быть использован для зачистки литейных поверхностей и сварных швов.

Светолучевая (лазерная) обработка

Лазер или оптический квантовый генератор (ОКГ) является источником получения световых лучей, характеризующихся высокой плотностью энергии и когерентностью, т.е. параллельностью испускаемых лучей. Лазерное излучение можно получать как в импульсном, так и непрерывном режиме. Существует три вида лазеров: твердотельные, газообразные и жидкостные. Для технологических целей используют лазеры на твердом теле и жидкостные.

Каждый атом или молекула (частица) вещества может обладать различным, но вполне определенным значением энергии и находиться на ряде вполне определенных дискретных энергетических уровней. Если частица изменяет свое энергетическое состояние, то она переходит с одного уровня на другой. Для перехода на более высокий энергетический уровень частица должна поглотить квант света – фотон. При переходе на нижний энергетический уровень происходит испускание порции энергии или фотонов.

Частота поглощаемого или излучаемого света определяется физическими константами активного вещества лазера. Широко используется кристаллический лазер на основе синтетического рубина в форме стержня, служащего резонатором, в котором возникает и формируется луч, испускаемый лазером.

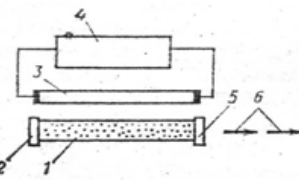


Рис. 3.7. Схема кристаллического лазера

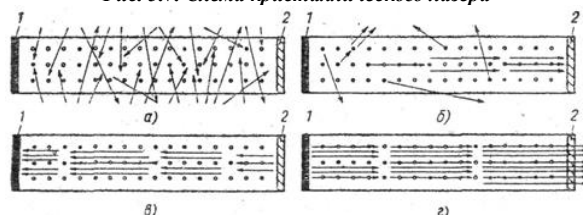


Рис. 3.8. Процесс образования лазерного луча

Простейшая схема кристаллического лазера показана на рис. 3.7. Рубиновый стержень 1 оснащается импульсной лампой 3, наполненной ксеноном и

вспыхивающей при импульсном разряде конденсатора источника питания 4 (источника энергии накачки). По торцам стержня установлены непрозрачная 2 (с коэффициентом отражения 1) и полупрозрачная (с коэффициентом отражения 0,5) пластины 5. Световой луч 6, возникающий в результате возбуждения атомов, выходит наружу через пластину 5. На рис. 3.8 показан процесс образования лазерного луча. Атомы хрома (черные точки), содержащиеся в рубине, находятся в невозбужденном состоянии (рис. 3.8, а). Под действием фотонов света от лампы атомы хрома переходят в возбужденное состояние. Часть излучаемой энергии рассеивается через стенки стержня и проявляется в форме люминесцентного свечения рубинового кристалла. Другая часть энергии, направленная параллельно оси стержня (рис. 3.8, б), по пути своего движения вызывает цепную реакцию образования новых фотонов (рис. 3.8, в). Фотоны, многократно отражаясь от пластин 1 и 2, лавинообразно нарастая при каждом отражении, в виде мощного светового луча вырывается из торца с полупрозрачным покрытием (рис. 3.8, г).

Рабочим телом твердотельных лазеров служит рубин, представляющий собой кристалл корунда с примесью хрома, иттриево-алюминиевый гранат (ИАГ), являющийся также кристаллом корунда с примесью неодима, стекло с примесью неодима. Рабочими частицами являются примеси хрома или неодима. ОКГ на рубине и стекле работают в импульсном режиме, на ИАГ могут работать как в импульсном режиме, так и в непрерывном.

Накачка ОКГ, работающих в импульсном режиме, осуществляется импульсными ксеноновыми лампами, которые питаются от батареи конденсаторов. Рабочее тело и лампу накачки помещают в отражателе с целью более полного и равномерного использования светового потока. При накачке не вся энергия, поглощенная рабочим телом, превращается в излучение. Значительная часть ее теряется на нагрев (для рубина около 50%). Для отвода тепла от рабочего тела в некоторых случаях предусматривают принудительное охлаждение воздухом, водой или жидким азотом.

Рабочим телом газовых лазеров могут быть чистые газы: ксенон, криптон, гелий, азот или смеси газов, например, углекислого газа с азотом и гелием. Накачка осуществляется, как правило, электронами при прохождении электрического тока через газ. При столкновении электрона, движущегося с большой скоростью, с атомом или молекулой газа электрон передает энергию атому и переводит его на более высокий энергетический уровень.

При взаимодействии с поверхностью среды лазерное излучение частично отражается, и частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и переходит в тепло. Повышение температуры приводит к расплавлению материала, его испарению, вытеканию расплава из зоны облучения и образованию лунки. Этот процесс сопровождается изменением оптических и теплофизических свойств, тепловым расширением, а также фазовыми переходами. Высокие скорости нагревания (до 10^{10} °C/c) и охлаждения (до 10^8 °C/c) и большие градиенты температур могут приводить и к другим механизмам разрушения.

Наибольшее применение в промышленности лазеры нашли при резке различных материалов, получении отверстий и сварке.

Освоено сверление отверстий диаметром 0,003...1 мм при отношении глубины к диаметру до 10. Производительность сверления 60...240 отверстий в минуту.

Производительность точечной сварки около 60 операций в минуту, шовной – в зависимости от материала от 0,5 до 4 м/мин при глубине проплавления в несколько миллиметров.

Электронно-лучевая обработка

Электронно-лучевыми называются методы, при которых для технологических целей используют острогофокусированный пучок электронов, движущихся с большой скоростью.

Метод электронно-лучевой обработки (плавки, сварки, резки) основан на использовании тепла, выделяющегося при столкновении потока электронов поверхностью обрабатываемой заготовки. При электронно-лучевой обработке деталь помещают в герметическую камеру, в которой благодаря непрерывной работе вакуумных насосов обеспечивается высокая степень разрежения (до 10^{-7} Па). Поскольку электроны не изменяют химических свойств твердого тела, то обработка ими в вакууме является существенным достоинством этого метода, так как при обработке не происходит химического загрязнения заготовки газами.

Существенной предпосылкой для использования в технике электронного луча как термического инструмента для обработки материалов является относительная простота получения большого количества свободных электронов. Если нагреть в вакууме металлическую, например, танталовую или вольфрамовую проволоку, то с поверхности последней эмитируются электроны (термоэлектронная эмиссия), число и скорость которых зависят от температуры нагрева. Кинематическая энергия этих электронов, беспорядочно движущихся в пространстве, окружающем эмиттер, сравнительно невелика. Ее можно существенно повысить путем ускорения движения электронов в определенном направлении воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между эмиттером, являющимся в данном случае катодом и анодом.

Для этого используют специальное устройство – электронную пушку, которая вместе с электронно-оптической системой создает острогофокусированный пучок электронов, эмитируемых катодом, ускоряемый в вакууме электрическим полем с разностью потенциалов до 150 кВ. Скорость электронов при этом может достигать 100000 км/с и более.

Установки для обработки материалов сфокусированным пучком электронов состоят из трех основных устройств: электронной пушки, фокусирующей системы и рабочей камеры.

Источником электронного луча является катод 1, представляющий вольфрамовую спираль, нагреваемую до температуры 2600...2800°C. При этом происходит интенсивная термоэлектронная эмиссия с катода. Электроны, эмитируемые катодом электронной пушки, формируются в пучок электродом 2, который расположен непосредственно за катодом. На электрод 2 подается отрицательное (относительно катода) напряжение смещения и электроны ускоряются под действием разности потенциалов между катодом и анодом 3. Затем с помощью воздействующих электродов 2 магнитных полей двух пар катушек 4 пучок электронов направляется в электронно-оптический центр магнитной фокусирующей системы 6. Между магнитными системами (4 и 6) установлена вольфрамовая диафрагма 5 с водяным охлаждением. Эта диафрагма служит для улавливания рассеянных электронов. Фокусное расстояние магнитной линзы 6 может изменяться при изменении тока, пропускаемого через обмотку, что используется для установки как рабочего режима (рабочей точки), так и необходимого поперечного сечения луча в месте встречи его с поверхностью обрабатываемой заготовки 9. Ниже фокусирующей системы расположены отклоняющие катушки 7, служащие для автоматического перемещения луча по заданному направлению. Заготовка помещается в рабочую камеру 8, в которой создается разрежение.

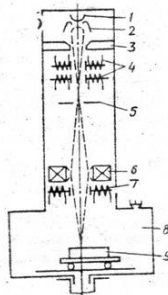


Рис. 3.9. Электронно-лучевой обработки

Область применения. Электронным лучом обрабатываются как электропроводные, так и неэлектропроводные материалы. Твердые труднообрабатываемые материалы, такие, как алмаз, вольфрам, титан, твердые и высоколегированные сплавы, ковар, инвар, кварц, керамика, рубин, кристаллы кремния, германия.

Пучки электронов диаметром 5 мкм позволяют производить прецизионную обработку с точностью ± 1 мкм. Пучком электронов на доводочных режимах можно получать поверхности с высотой микронеровностей до 1 мкм. Пучком электронов легко управлять, воздействуя на отклоняющие катушки 4. Резку по контуру можно осуществлять, используя механические перемещения стола с обрабатываемой заготовкой.

Недостатки электронно-лучевой обработки:

- необходимость ведения обработки в глубоком вакууме;
- необходимость защиты от рентгеновского излучения на установках с напряжением более 20 кВ;
- высокая стоимость оборудования.

Плазменная обработка

Сущность обработки состоит в том, что плазму, имеющую температуру 10000...30000 °С направляют на обрабатываемую поверхность заготовки.

Плазма – ионизированный газ, в котором концентрации положительно и отрицательно зарядов равны. Высокотемпературная плазма ($T = 10^6 \dots 10^8$ К) исследуется с целью осуществления термоядерного синтеза. Низкотемпературная плазма ($T \leq 10^5$ К) используется в различных газоразрядных приборах: газовых лазерах, ионных приборах, плазмотронах.

Обрабатывают заготовки из любых материалов, выполняя прошивание отверстий, вырезку заготовок из листовых материалов, строгание, точение.

Тема 3.3. Обработка, основанная на использовании механического действия тока или электромагнитного поля

Ультразвуковая размерная обработка

Физическая сущность всех разновидностей ультразвуковой обработки (УЗО) основана на использовании ультразвуковых колебаний материальных сред, совершаемая с частотами выше порога слышимости (> 16 кГц). Получение ультразвуковых колебаний основано на явлении магнитострикции, при котором происходит удлинение или укорочение некоторых материалов под действием внешнего магнитного поля. Магнитострикцией обладают все ферромагнитные материалы, но наилучшими из них являются никель, сплав кобальта с железом (пермендюр) и сплав алюминия с железом (альфер).

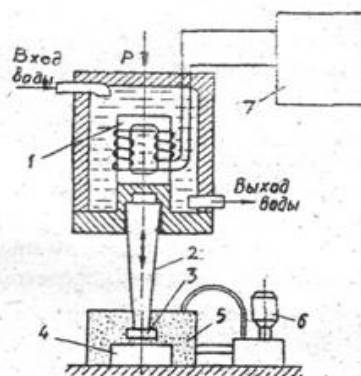


Рис. 3.10. Принципиальная схема установки для обработки материалов ультразвуковыми колебаниями абразивных зерен

Ультразвуковой метод размерной обработки предназначен для изготовления деталей машин и приборов из хрупких материалов. Механическая обработка деталей из таких материалов затруднительна из-за хрупкости, а также из-за низкой стойкости обрабатываемого инструмента.

Ультразвуковой метод преимущественно используется для обработки поверхностей сложной формы.

Сущность ультразвукового метода размерной обработки состоит в том, что материал обрабатываемой детали разрушается абразивными зёрнами под действием ударов инструмента, прижатого к ним малым статическим усилием и колеблющегося с ультразвуковой частотой. При этом инструмент углубляется в деталь, его форма копируется в ней.

Магнитострикционный преобразователь 1 связан с концентратором 2, к концу которого присоединен инструмент 3, воздействующий на абразивные частицы суспензии 5. В заготовке 4 обрабатывается отверстие, копирующее форму и размеры (в сечении) инструмента. Суспензию 5 подают в ванну насосом 6. Электрический высокочастотный ток к преобразователю подается от генератора 7. При работе установки преобразователь охлаждают проточной водой.

Недостатки УЗО: требуются специальные генераторы тока, высокая стоимость акустической энергии.

Ультразвуковая очистка осуществляется в моющей жидкости путем возбуждения в ней интенсивных упругих колебаний ультразвуковой частоты. Технологическое действие процесса определяется гидродинамическими эффектами, которые вызывает ультразвук в жидкости. Важная роль при этом принадлежит ультразвуковой кавитации. При прохождении волн высокой интенсивности в жидкости могут образовываться мелкие разрывы в виде пузырьков из-за больших растягивающих усилий. После полупериода растяжения следует полупериод сжатия, и пузырёк захлопывается, исчезает. Захлопывание сопровождается гидравлическим ударом, вследствие чего давление может достигать сотен атмосфер. Явление появления и схлопывания пузырьков называется **кавитацией**, а пузырьки - кавитационными. Но не все кавитационные пузырьки успевают захлопнуться. Часть их живет больше одного периода, иногда несколько десятков периодов, совершая колебания в такт с колебаниями ультразвукового поля. Ударные волны схлопывающихся кавитационных пузырьков способны разрушать поверхностную пленку любого вида загрязнения, отделять ее от очищенной поверхности, размельчать и смешивать с потоком жидкости. Незахлопывающиеся кавитационные пузырьки проникают в щели и зазоры между загрязнениями и очищенной поверхностью и своими пульсациями способствуют их отслаиванию.

Достоинствами ультразвуковой очистки являются высокое качество очистки от любых загрязнений, повышенная производительность, устранение из процесса органических и пожароопасных растворителей, благоприятные условия для механизации и автоматизации процесса.

Ультразвуковая сварка. Ультразвуковым методом можно сваривать почти все металлы и их сплавы, применяющиеся в промышленности. Лучше всего свариваются пластичные металлы, такие как медь, алюминий и их сплавы. Хорошие результаты получаются и при сварке тугоплавких и активных металлов: молибдена, циркония и его сплавов, титана, ниобия, тантала. Нержавеющие стали свариваются лучше малоуглеродистых сталей. Возможна сварка разнородных металлов. Алюминий, например, сваривается ультразвуком почти с любыми металлами, медь и железо друг с другом, а также с золотом, молибденом, никелем, платиной, серебром, титаном и цирконием.

Электрогидравлическая обработка

Метод основан на использовании ударной волны в жидкости, возникающей вокруг канала высоковольтного импульсного разряда в жидкой среде (электрогидравлический эффект).

При возникновении высоковольтного импульсного разряда малой длительности и с крутым фронтом между погружёнными в жидкость электродами вокруг канала разряда возникает импульсная ударная волна, создающая также высокие импульсные давления в некотором объёме жидкости.

Операции: дробление и измельчение, удаление с отливок пригара, штампование вытяжка, гибка, запрессовка труб, калибровка, ковка, резка.

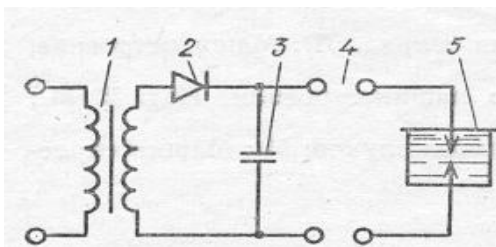


Рис. 3.2. Принципиальная схема получения электрогидравлического эффекта:
1 – повышающий трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – конденсатор; 4 – разрядник; 5 – рабочая ёмкость

Магнитно-импульсной (МИО) называют разновидность ЭФХКО, основанную на использовании импульсных магнитных полей большой силы для деформирования токопроводящих материалов. В проводящем обрабатываемом материале внешнее импульсное магнитное поле индуцирует соответствующий импульс тока, электромагнитное поле которого встречно взаимодействует с внешним магнитным полем. В результате этого создаются значительные механические усилия, используемые, в частности, для деформирования пластических материалов.

Тема 3.4. Комбинированные методы обработки

Общие сведения

Комбинированными (КМО) называют такие методы ЭФХКО, в которых процесс преобразования или удаления обрабатываемого материала происходит в результате одновременного протекания двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму.

Основной особенностью и преимуществом КМО является повышенная эффективность по сравнению с отдельно используемыми методами, составляющими данное сочетание.

Наиболее часто совмещение производят исходя из необходимости, в первую очередь повысить производительность, не преследуя целей резкого повышения качества поверхности или снижения износа инструмента. В таких случаях практически достигается возрастание этого показателя в несколько десятков раз.

Электрохимическая комбинированная обработка

Одной из наиболее широко используемой в промышленности группой КМО являются способы электрохимической комбинированной обработки (ЭХКО). Представим некоторые разновидности ЭХКО.

Электроабразивная и абразивно-электрохимическая обработка – анодное растворение поверхности обрабатываемой заготовки, сопровождающееся образованием труднорастворимых продуктов, непрерывное удаление которых производится с помощью перемещающегося относительно поверхности и контактирующего с ней под большим давлением токопроводящего абразивного инструмента (круга, диска) графитированного или на металлической связке.

Электроалмазная обработка – это метод, в котором анодное растворение поверхности сопровождается образованием труднорастворимых продуктов, непрерывно удаляемых с помощью алмазного инструмента (круга, диска) на токопроводящей металлической связке.

Электрохимическое алмазное хонингование и суперфиниширование. Также представляют собой анодное растворение поверхности обрабатываемой заготовки. Скорость съёма 10...20 мкм/мин при Ra = 0,08...0,09 мкм и относительном износе инструмента 10...20 %. Напряжение (при автономном катоде) до 24 В.

Анодно-абразивная обработка – разновидность ЭХКО, проводящаяся с помощью несвязанного абразива или абразивных тел.

Электрохимикоультразвуковая обработка – разновидность ЭХКО, в которой электрохимическое анодное растворение сочетается с механическим воздействием абразивных частиц, колеблющихся с ультразвуковой частотой.

Анодно-механическая обработка – это группа комбинированных методов. Их особенностью является широта диапазона выполняемых операций. В процессе АМО поверхность обрабатываемой заготовки является анодом, обрабатывающий инструмент – катодом.

Электроэрозионная комбинированная обработка

ЭЭКО – название группы способов ЭФХКО, проводимых при одновременном воздействии нескольких процессов, ведущим среди которых является электроэрозионный. Например, электроконтактно-ультразвуковая обработка проводится по схеме и режимам ЭКО, но с вводом ультразвуковых колебаний в зону обработки, что способствует стабилизации течения и повышению производительности процесса.

Плазменно-механическая обработка

Относительная новизна методов плазменной обработки материалов и специфика их не соответствует пока возникновению комбинированных методов на их основе. Основным видом плазменной комбинированной обработки является метод плазменно-механического резания, в котором совмещается плазменный нагрев поверхности заготовки с механическим срезанием нагретого слоя.

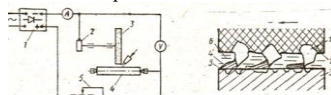
Основным оборудованием является установка ПМО, смонтированная на токарном станке мод.1682А.

Электрохимикомеханическая обработка

Наиболее распространенными способами являются электроалмазное и электроабразивное шлифование. Металл анода на этих операциях снимается токопроводящими алмазно-абразивными кругами в результате электрохимического растворения и абразивного шлифования.

На рис. 3.3 показана схема электроабразивного круглого шлифования. Токопроводящий абразивный круг 3 скользящим контактом 2 соединен с отрицательным полюсом источника 1 постоянного тока. Обрабатываемая заготовка 4 присоединяется к положительному полюсу. Резистор 5 позволяет регулировать силу тока в цепи. В зону обработки подается электролит, имеющий высокую локализацию процесса растворения, например NaNO₃ - 6%, NaNO₂ - 2%.

На рис. 3.4 показана схема процесса электроабразивной обработки. Электроабразивный круг состоит из абразивных зерен 1 и связки 2. В зазор 4, образуемый абразивными зернами, непрерывно подается рабочая жидкость 6. При прохождении электрического тока заготовка-анод 3 подвергается анодному растворению с образованием пленки 5 с высоким электрическим сопротивлением. При вращении круга абразивные зерна удаляют продукты анодного растворения с заготовки и увлекают частицы электролита, непрерывно обновляя его в рабочей зоне. Межэлектродный зазор между анодом и катодом обеспечивается абразивными (алмазными) диэлектрическими зернами. В зазор подается электролит, содержащий свободные ионы натрия, нитрата, гидроксиды и др. Под воздействием электрического тока усиливается диссоциация молекул электролита и химическое взаимодействие свободных ионов с анодом. В результате на катоде выделяется водород, а на деталях образуется пленка окислов и гидратов окислов металла - анода.



Наибольшее распространение данный метод шлифования получил при электроалмазном заточке режущей части инструментов с напаянными пластинами из твердого сплава (резцов, ножей торцовых и дисковых фрез и др.).

Электроалмазное хонингование и суперфиниширование

Применяют для повышения производительности (до 15 раз) при отделке плоских поверхностей и отверстий (хонингование) и круглых наружных поверхностей (суперфиниширование). Наибольшее распространение получили схемы обработки электронейтральными абразивными или алмазными брусками при подводке тока и электролита через дополнительный катод.

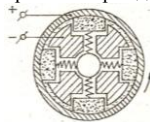


Рис. 3.5. Схема электроабразивного (электроалмазного) хонингования цилиндрического отверстия электронейтральными абразивными (алмазными) брусками

При электроалмазном хонинговании и суперфинишировании основной припуск удаляется за счет анодного растворения материала заготовки, а роль абразивных или алмазных зерен сводится к механической депассивации обрабатываемой поверхности. Поскольку в процессе депассивации режущие зерна практически не контактируют с основным материалом заготовки, использование алмазных брусков не приводит к их засаливанию, а стойкость их по сравнению с абразивными брусками возрастает многократно. Шероховатость поверхности после обработки составляет 76 0,04...0,16 мкм, а 0,8...2 мкм, отклонение от круглости и цилиндричности достигает.

Анодно-механическая обработка

Анодно-механическая обработка представляет собой такой комбинированный метод, при котором в рабочей зоне осуществляются электроэрозионные, электрохимические процессы, а также механическое трение инструмента с заготовкой. При этом совмещение процессов ЭЭО и ЭХО обуславливается величиной рабочего напряжения; с повышением напряжения и увеличением удельной мощности, подводимой в зону обработки, процесс смещается в сторону электроэрозионного, а при снижении напряжения и подводимой мощности - в сторону электрохимического.

Наибольшее распространение данный метод получил при резке заготовок из жаропрочных, титановых, кислото- и коррозионностойких сплавов, трудно поддающихся обработке резанием. Производительность анодно-механической резки превышает производительность резки механическим способом в 5...6 раз. В качестве ЭИ может применяться металлический диск или металлическая лента.

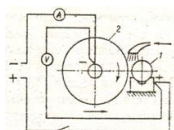


Рис. 3.6. Схема анодно-механической резки дисковым ЭИ

Разрезаемую заготовку 1 устанавливают на станке неподвижно, а дисковому электроду 2 сообщают главное движение - вращение диска и движение подачи. В процессе обработки обрабатываемая заготовка является анодом, а обрабатывающий инструмент катодом. В зону обработки поливом подают электролит, представляющий собой 20...30% водный раствор жидкого стекла Na_2SiO_3 , рабочее напряжение 23...25 вольт. Резка металла сопровождается интенсивным образованием искр, которые выбрасываются из зоны резания. Эти искры представляют собой частицы расплавленного механической резки металла в отличие в оболочке от обработки жидкого резанием стекла. При твердость анодно- и механические свойства обрабатываемого материала практически не влияют на интенсивность процесса обработки.

Алмазно-электролитическая обработка инструмента

После алмазно-электролитической заточки поверхность имеет меньшее количество царапин (рисок) от механического резания алмазными зёрнами, чем поверхность образца, заточенного алмазным методом. Это является следствием того, что съём части материала при заточке осуществлялся в результате электрохимического растворения. На поверхности имеется часть зёрен карбидов, не подвергшихся растворению, прочность сцепления которых с основной массой материала ослаблена вследствие электрохимического процесса преимущественного растворения кобальтовой фазы.

Раздел 4. Оборудование, инструмент, приспособления для эфко

Начавшийся в конце 80-х годов спад производства в машиностроении привел к тому, что в России прекратилось дальнейшее совершенствование выпускаемого оборудования, а производство устаревших станков свелось к их изготовлению в небольших количествах по отдельным заказам. В настоящее время в России остался практически единственный завод, способный изготавливать оборудование для электрофизической и электрохимической обработки – Троицкий станкостроительный завод.

Тема 4.1. Оборудование для электроэрозионной обработки

В настоящее время выпускается и применяется в основном два типа электроэрозионных станков:

- копировально-прошивочные станки для изготовления полостей профильным электродом-инструментом;
- вырезные станки для изготовления фасонных профилей непрофилированным электродом-проволокой.

Все типы копировально-прошивочных станков имеют примерно одинаковую компоновку и используются для обработки фасонных поверхностей при изготовлении ковочных, гибочных, вырубных, чеканочных штампов, пресс-форм, кокилей, фильер и других изделий из труднообрабатываемых сталей и твердых сплавов.

Точные станки снабжают оптической системой отсчета координат, выполняют с цифровой индикацией, с программным управлением, с управлением от ЭВМ. В крупных станках шкафы управления и генераторы электрических импульсов устанавливаются отдельно. Станки снабжают фильтрами рабочей жидкости, холодильниками для ее охлаждения и т.д.

В процессе обработки на электроэрозионных копировальнопрошивочных станках прямолинейным движением подачи электроинструмента в заготовке полностью копируется форма и размеры рабочей части инструмента. Для чистовой доводки вертикальных и наклонных поверхностей используют орбитальное движение ЭИ. При орбитальном движении все точки электрода совершают в плоскостях, перпендикулярных направлению подачи, движение по круговым траекториям с одинаковыми радиусами. Для этой цели используют специальные орбитальные головки, а также УЧПУ станков 4Л721Ф3 и 4Л723Ф3-01.

Электроэрозионные вырезные станки используют в качестве электрода непрофилированную проволоку диаметром 0,05...0,3 мм из меди, латуни или вольфрама. Получение заданного профиля вырезные станки могут обеспечивать за счет:

- металлического копира наклеиваемого на заготовку;
- фотокопировального устройства, когда функцию копира выполняет чертеж детали;
- применения устройства числового программного управления.

Тема 4.2. Генераторы импульсов

При расчете и выборе генератора импульсов исходят из условия получения формы и мощности импульса, необходимых для обеспечения требуемых технологических показателей процесса. Черновую и чистовую обработку обычно ведут от одного и того же генератора. В настоящее время в электроэрозионных станках используют релаксационные и полупроводниковые генераторы. Хронологически первым генератором был релаксационный РСгенератор, который предложили использовать изобретатели метода Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Такие генераторы успешно применяются до настоящего времени для обработки на электроискровых режимах.

В настоящее время все отечественные копировально-прошивочные и вырезные станки оснащены широкодиапазонными генераторами импульсов. Широкодиапазонные генераторы вырабатывают импульсы с частотой 1...880 кГц и выходным током 16...180 А, т.е. дают возможность работать на любых режимах электроэрозионной обработки. Кроме того, они вырабатывают импульсы такой формы, при которой износ электрод-инструмента становится минимальным.

Таблица 4.1

Основные характеристики	487236(1-01)	487236(3-01)	487244М
Размеры рабочей поверхности стола, мм	400-630	400-630	630-1120
Габаритные размеры установиваемых заготовок (LxBxH), мм	580-400-275	580-400-275	800-650-450
Наибольшая дистанция от рабочей поверхности стола до торца шпинделя, мм	615	615	615
Наибольшая рабочая перемещаемая длина, мм	250	400	400
Наибольшая масса устанавливаемых заготовок, кг	400	1000	1000
Наибольшая масса электродов, кг	487214(3)	100	100
Наибольшая продолжительность по стали 45 непрерывной работы, ч	250-300	1400	1200
Дискретность перемещения шпинделя, мм	280-250-150	1	1
Количество управляемых координат	460	—	3
Габаритные размеры станка (LxBxH), мм	2850-1700-2100	3500-2000-3000	3350-3100-3200
Масса станка в комплекте, кг	1545	3800	3800
Генератор	ЦГК-80-440М2	ЦГК180-2-200М2	ЦГК-80-440М2
Рабочая мощность	РК-3	РК-8	РК-8

Тема 4.3. Регуляторы межэлектродного промежутка

Для сохранения устойчивости электроэрозионного процесса необходимо поддерживать определенную величину межэлектродного промежутка. Так как по мере выброса металла происходит увеличение межэлектродного промежутка, то необходимо непрерывно производить сближение электродов, иначе через некоторое время процесс прекратится. Эту функцию в электроэрозионных станках выполняют автоматические регуляторы межэлектродного промежутка. Регуляторы должны удовлетворять следующим требованиям: стабильно поддерживать выбранный межэлектродный промежуток при случайных возмущениях (резких кратковременных изменениях режима); не должны допускать значительных отклонений управляемой величины от заданного режима; должны обладать малой инерционностью; быть малогабаритными; экономичными; простыми и надежными в работе.

Функциональная схема регулятора построена по принципу автоматических систем с обратной связью по выходному сигналу (рис. 4.1).

С датчика 3 выходной величины сигнал подается в орган сравнения ОС. Разность выходного $X_{вых}$ сигналов усиливается заданного $X_{зад}$ схемой 1 и поступает на исполнительный орган 2. Эту разность привод подачи электрода-инструмента обрабатывает так, чтобы она обратилась в нуль. При этом электрод-инструмент перемещается, а заданная величина межэлектродного промежутка поддерживается в пределах, определяемых погрешностью системы.

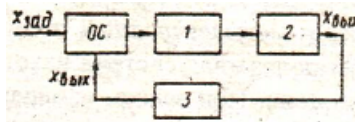


Рис. 4.1

Достижения зарубежного станкостроения

В настоящее время мировыми лидерами по изготовлению и продажам электроэрозионного оборудования являются японская фирма Sodic и две швейцарских фирмы – Agis и Charmilles Technologies. Наиболее эффективные результаты по производительности, точности и качеству обработанной поверхности имеет фирма Sodic. Такие результаты получены в основном за счет создания и оснащения станков принципиально новыми приводами подачи – линейными электродвигателями (ЛД). Принцип действия линейного двигателя не нов и известен давно. Сущность его состоит в том что, если в круглый электромагнитный статор поместить с небольшим зазором магнитный сердечник, то последний при включении обмотки электромагнитного статора будет перемещаться поступательно в ту или иную сторону в зависимости от полярности подаваемого напряжения. В результате многолетних исследований на фирме Sodic были созданы ЛД с плоскими ротором и статором, имеющими отличные характеристики: рабочий ход от 100 до 2200 мм, регулируемая скорость перемещения до 180 м/мин с ускорением до 20G при точности заданных перемещений – 1 мкм.

Точная и равномерная подача рабочего органа обеспечивается благодаря использованию двух технических новинок:

- размещение постоянных магнитов в роторе под определенным фиксированным углом по отношению к направлению движения рабочего органа;
- применение эффективной шестифазной импульсной системы управления магнитным полем статора и его оригинальной конструкцией.

Использование ЛД в приводах подачи взамен обычных электродвигателей имеет следующие преимущества:

- отпадает необходимость применения промежуточных механизмов для превращения вращательного движения в поступательное движение;
- отсутствует трение при передаче движения на рабочий орган станка;
- исключаются зазоры в передающих механизмах, а, следовательно, увеличивается точность и быстродействие работы привода;
- отсутствует износ сопрягаемых элементов;
- повышается точность станка из-за отсутствия погрешностей деталей передающих механизмов.

Другим качественным достижением фирмы Sodic является разработка и применение зеркальной системы “ПИКА”, которая позволяет получать весьма чистые поверхности (до $R = 0,05$ мкм) на больших рельефных поа верхностях при обработке на электроэрозионных копировальнопрошивочных станках. Сущность системы “ПИКА” для так называемого “зеркального полирования” заключается в том, что ЭЭО идет не в обычном масле, а в особом “высокодисперсном порошковом диэлектрике”, представляющем собой специально разработанную углеводородную жидкость Great Oil (Vitol-10), в которую добавляется “порошковая присадка Pikagen”. Эта присадка состояла до 1996 г. из смеси ультрадисперсных порошков кремния, алюминия и графита (в настоящее время используется присадка нового поколения Pikaden White). Масло Great Oil обеспечивает равномерное диспергирование частичек и исключает выпадение их в осадок.

Тема 4.4. Типовая структура оборудования для ЭХО

Типовая структура оборудования для ЭХО включает в себя:

- электрохимический станок, осуществляющий технологическую операцию;
- источник питания технологическим током (ИП) с токоподводами, которые обеспечивают подачу напряжения на электроды;
- оборудование для хранения, подачи, очистки и регулирования параметров электролита;
- систему управления работой электрохимического станка;
- технологическую оснастку для установки, базирования и крепления заготовок и ЭИ;
- устройства для отсоса из электрохимического станка выделяемых при работе газообразных продуктов, промывки заготовок и деталей (узлов) станка от остатков электролита, сушки обработанных и промытых заготовок, а при необходимости и их пассивации (в число таких устройств может входить и оснастка для подачи в рабочую зону сжатого воздуха или газа).

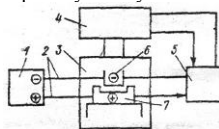


Рис. 4.2. Структурная схема технологического оснащения для ЭХО

Источники питания

Они являются преобразователями переменного тока в постоянный ток и обеспечивают подачу напряжения на электроды электрохимического станка. В отдельных случаях при ЭХО применяют ток переменного (импульсного) напряжения. Сила тока при ЭХО может достигать 30000 А, а напряжение – 30 вольт.

Применяют электромеханические и статические ИП. Электромеханические (машинные) ИП имеют механически связанные между собой электродвигатель и генератор. Генератор вырабатывает ток необходимого напряжения. Такие ИП имеют низкий КПД и являются источниками повышенного шума. Статические ИП работают на кремниевых выпрямителях и обладают по сравнению с машинными ИП повышенным КПД, компактностью и бесшумностью в работе.

Источники питания выпускают нереверсивными (ВАК) и реверсивными (ВАКР). Реверсивные ИП позволяют изменять полярность напряжения на выходе. Выпрямители ВАК и ВАКР являются регулируемыми по величине напряжения. Статические выпрямители ИП – нерегулируемые.

Электроды-инструменты

Для электродов-инструментов необходимо выбирать сплавы, обладающие коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, хорошей сопротивляемостью местному разрушению при коротких замыканиях, высокой адгезией к диэлектрическим покрытиям, достаточной механической прочностью и обрабатываемостью, низкой стоимостью. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют медь, медные сплавы, нержавеющие стали; в меньшей степени — титановые сплавы. Медь и ее сплавы имеют высокую электропроводность, свариваемость, удовлетворительную адгезию к покрытиям, достаточную механическую прочность. Главным их недостатком является высокая чувствительность к коротким замыканиям, при которых выплавляются большие участки рабочей поверхности, что затрудняет их восстановление. Если заготовку электрод-инструмента получают литьем, то в качестве материала используют латунь или бронзу.

Электрод-инструменты повышенной прочности изготавливают из нержавеющей сталей, например 12Х18Н9Т, которые не разрушаются при коротких замыканиях, имеют предел прочности в 2...3 раза выше, чем медь и обладают высокой адгезией к покрытиям. При этом следует учитывать низкую удельную электрическую проводимость (в 30...50 раз меньше, чем у меди). Поэтому контактные участки для подвода напряжения у таких инструментов должны быть большими.

При проектировании электродов-инструментов используются диэлектрические материалы в следующих исполнениях:

– в виде покрытий толщиной 0,05...0,5 мм;

– в виде механически обработанных конструктивных элементов (стержней, брусков, листов, плит), которые либо закрепляются на обрабатываемой поверхности, либо составляют часть электрода-инструмента.

Покрытия должны обладать высокой адгезией к металлам, механической прочностью, хорошей износостойкостью в условиях трения, стабильными диэлектрическими свойствами. В качестве покрытий используют эпоксидные смолы, лаки, керамические эмали, капрон в порошке, полиэтилен. Поверхность детали предварительно обрабатывают для повышения шероховатости: царапают металлическими щетками, обдувают дробью, накачивают канавки.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	3.	Электрохимическая размерная обработка металлов	10	-
2	3.	Электроэрозионная обработка инструментальных материалов	10	-
3	3.	Лазерная обработка конструкционных материалов	4	-
4	3.	Обработка металлов давлением импульсного магнитного поля	4	-
ИТОГО			28	-

4.4. Семинары/ практические занятия

Учебным планом не предусмотрено.

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Σ комп.</i>	<i>t_{ср}, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ОПК</i>				
		<i>1</i>				
1. Общие сведения об электротехнологии	14	+	1	14	Лк, СР	Зачет
2. Отделочные процессы механической обработки деталей	14	+	1	14	Лк, СР	Зачет
3. Основные методы и способы ЭФХКО	68	+	1	68	Лк, ЛР, СР	Зачет
4. Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО	12	+	1	12	Лк, СР	Зачет
<i>всего часов</i>	108	108	1	108	-	-

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

2. Архипов, П.В. Технологические процессы в машиностроении: учебное пособие / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков. - Братск: БрГУ, 2016. - 202 с.

3. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки: научное издание / Ф. В. Гречников и др. - М.: Машиностроение, 1985. - 184 с.

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование издания	Вид занятия	Кол-во экз. в библи., шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
Основная литература				
1.	Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 456 с.	Лк, ЛР, СР	10	0,5
2.	Архипов, П.В. Технологические процессы в машиностроении: учебное пособие / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков. - Братск: БрГУ, 2016. - 202 с.	Лк, ЛР, СР	22	1
Дополнительная литература				
3.	Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.	Лк, ЛР, СР	30	1
4.	Сафонов, С.О. Технология машиностроения. Проектирование технологических процессов обработки металлов давлением : учебное пособие / С.О. Сафонов, А.С. Янюшкин, Е.Д. Лосев. - Братск: БрГУ, 2007. - 90 с.	Лк, ЛР, СР	81	1
5.	Схиртладзе, А.Г. Технологические процессы в машиностроении : учебник для вузов / А.Г. Схиртладзе, С.Г. Ярушин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Старый Оскол: ТНТ, 2008. - 524 с.	Лк, ЛР, СР	19	1
6.	Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.	Лк, ЛР, СР	19	1

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ:

http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.

2. Электронная библиотека БрГУ: <http://ecat.brstu.ru/catalog> .

3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»: <http://biblioclub.ru> .

4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»»: <http://e.lanbook.com> .

5. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам»: <http://window.edu.ru> .

6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru> .

7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ): <https://uisrussia.msu.ru/> .

8. Национальная электронная библиотека НЭБ: <http://xn--90ax2c.xn--plai/how-to-search/> .

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Рекомендуемый режим и характер учебной работы по проработке лекционного материала заключается в ознакомлении с основами электрофизических и электрохимических процессов обработки.

При оформлении отчётов по лабораторным работам следует особое внимание обращать именно на современные методы обработки, основанные на электрохимическом, тепловом или механическом воздействии электрического тока на обрабатываемую поверхность.

Желательно обладать навыками применения электрофизических и электрохимических процессов обработки. Следует использовать научные результаты и известные научные методы и способы для решения новых научных и технических проблем, и оптимизации конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств.

Так как от металлообрабатывающей промышленности постоянно требуется всё большая точность изготовления деталей и целостность их поверхности, то и популярность технологий их изготовления вполне очевидна. Следует учитывать, что если какая-либо технология достигает в своих показателях уровня "нано", например, зернистость измельчаемого порошка получается менее 100 нм, или шероховатость поверхности после обработки составляет менее 0,1 мкм (100 нм), и т.п., то эта технология относится к нанотехнологиям. А это тема уже другой дисциплины.

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа №1 Электрохимическая размерная обработка металлов

Цель работы:

Ознакомиться с сущностью процесса электрохимической размерной обработки, а также со схемами обработки поверхностей деталей при помощи этого перспективного метода. Научиться определять основные зависимости технологических параметров ЭХРО, режимы резания, правильно подобрать оборудование, используемое при данном процессе.

Задание:

1. Ознакомиться с основными понятиями, терминами и определениями электрохимической размерной обработки металлов.
2. При выполнении задания необходимо определить по табличным данным основные зависимости технологических параметров ЭХРО в зависимости от полученного варианта, а также изобразить схему обработки и вид ЭИ.
3. Оформить отчёт по лабораторной работе.

Порядок выполнения:

Определить по табличным данным основные зависимости технологических параметров ЭХРО в зависимости от полученного варианта, а также изобразить схему обработки и вид ЭИ.

Пример выполнения задания

1. Подготовка заготовки (очистка, удаление смазки, ржавчины). Необходимо разрезать пластину из сплава ХН67МВТЮ, шероховатость обработанной поверхности Ra 2,5 мкм, площадь обрабатываемой поверхности $S = 200 \text{ мм}^2$. Подготавливаем заготовку к обработке: очистка (пескоструйная обработка).

1.1. По таблице 2 выбрать схему обработки и нарисовать её. Нарисовать эскиз ЭИ. По таблице 2 выбираем схему обработки №4 «Разрезание пластин проволочным катодом».

2. Выбор состава электролита.

По таблице 1 выбираем электролит 20% NaBr, т.к. шероховатость поверхности получаемая при обработке с электролитом получается удовлетворительной, а производительность обработки выше, чем при обработке с другим возможным электролитом.

3. Выбор режимов обработки из таблицы 1.

3.1. Удельный съём металла ($\text{мм}^3/\text{А} \times \text{мин}$): K_v .

$$K_v = 70 \text{ мм}^3/\text{А} \times \text{мин.}$$

3.2. Скорость движения ЭИ: $V_{эи} = V_p = K_v \times i$. Необходимо помнить, что с увеличением скорости ЭИ увеличивается производительность, однако возрастает шероховатость поверхности.

$$V_{эи} = 70 \times 0,50 = 35 \text{ мм/мин.}$$

Таблица 1

Оптимальные виды электролитов и режимы обработки различных металлов

Материал	Электролит	i , А/см ²	U, В	Vэл, м/с	t, °С	МЭЗ, мм	K_v , мм ³ А×мин	Ra
ВН-2АЭ	15% KBr	10-40	8-12	30-35	20-40	0,3-0,4	60-70	0,7-2,0
	20% КОН	60-80	8-12	10-20	20-40	0,3-0,4	56-65	0,7-2,0
ХН67МВЮ	20% NaBr	40-100	6-10	30-40	20-30	0,3-0,4	46-90	1,2-1,4
	15% NaNO ₃ + 7% NaCl	10-100					42-90	0,4-0,6
ВМ-1	25% NaNO ₃	10-20	9-12	30-40	20-40	0,3-0,4	60	0,16-0,3
	20% КОН	20-40	6-15	30-40	20-40	0,3-0,4	12-24	0,32-0,5
ВТ-8	12% KBr+ 8% NaCl	7-8	9-10	10-40	22-30	0,5	60-90	0,6-2,5
	10% KBr	31-37	10-11	10-40	25-30	0,5	60-90	0,6-2,5
ЛАМЦЖ 67-5-2-2-2	20% NaCl+ 10% NaNO ₃	30-40	12-20	20	20-35	0,3	240	0,32-1,25
БрАНЖ9-4-4	10% NaNO ₃ + 5% NaSO ₄	10-15	12-13	25-30	35-40	0,3	180	0,62-1,25

3.3. Сила тока (для выбора оборудования): $I = i \times S$, где S – площадь обрабатываемой поверхности.

$$I = 0,50 \times 200 = 100 \text{ А.}$$

3.4. Напряжение на электродах (В): U.

U=8 В.

3.5. Выбор станка. Выбираем установку ЭКУ 1503 по таблице 3.

4. Проектирование ЭИ.

4.1. Материал ЭИ должен обладать следующими свойствами: Электропроводность, механическая прочность, антикоррозионность, эрозионная стойкость. Обычно ЭИ изготавливают из бронзы, латуни, меди, нержавеющей стали, коррозионностойкие стали, W-Cu (композит). Материал ЭИ: медь.

Таблица 2

Схемы обработки поверхностей с помощью ЭХРО

№	Обработка	Эскиз	Применение
1	2	3	4
1	Фасонное точение цилиндрических деталей		Обработка деталей сложной формы, деталь вращается, катод подается; можно придать ему вращение по схеме круглого шлифования.
2	Фрезерование вращающимся катодом		Получение поверхностей сложной формы с продольным и поперечным перемещением катода – инструмента.
3	Электрохимическая вырезка с предварительным нанесением контура фотографическим способом		В радиоэлектронной промышленности (для изготовления печатных плат), изготовления гравюр. Для большей производительности можно придавать колебательное движение ЭИ.
4	Разрезание пластин проволочным катодом		Наименьшая ширина паза 0,5...1,0 мм.
5	Маркирование металлических деталей по шаблонам		Нанесение клейм; трафарет с нанесенным на него клеймом изготавливается из текстолита. Глубина клейма 0,1...0,5.
6	Разрезание деталей и обработка профильным вращающимся катодом		Ширина паза менее 1мм, точность до 3-го класса, шероховатость поверхности 0,16...1,25.
8	Обработка отверстий любой формы		Поступательное перемещение инструмента, имеющего форму соответствующую форме обрабатываемого отверстия.
9	Обработка отверстия со сложной формой торца (например зубчатого)		Применяется только поступательное перемещение инструмента до определенной глубины.
10	Калибрование фасонных отверстий деталей после термической обработки		Обработка производится последовательно тремя электродами, при этом в начале калибруют радиусные поверхности, затем прямые и все остальные.

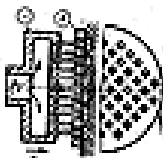
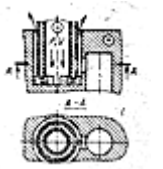
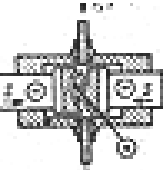
11	Одновременная обработка нескольких отверстий, сквозных или глухих		Инструмент имеет поступательное перемещение, неподвижна. деталь
12	Изготовление отверстий в местах недоступных для механической обработки		Деталь и катод неподвижны: толщина обрабатываемой стенки 2...5 мм.
13	Двухсторонняя обработка наружных фасонных поверхностей		Для обработки деталей типа лопатки.

Таблица 3

Станки применяемые для ЭХРО

Тип	Размеры детали	Давление электролита, МПа	Ход ЭИ	I _{max} , А	Ra
Э402	530×440×250	20	200	10000	0,63...1,25
ЭХ КП-1	500×400×250	25	160	12000	0,16...0,32
ЭГС-2	800×600×545	–	150	5000	0,16...0,32
ЭКУ-400	1000×1000×925	–	400	10000	0,32...1,25
ЭКУ-632	500×500×250	–	320	10000	0,63...2,5
ЭКУ-1503	1000×1000×1000	0,9	400	25000	0,32...1,25

Примечание. Станки Э402 и ЭХ КП-1 – копировально-прошивочные станки, ЭГС-2 для прошивки отверстий у круглых деталей, ЭКУ-400 для обработки гравюр штампов, панелей, прошивки фасонных отверстий, ЭКУ-632 – обработка корпусных деталей, ЭКУ-1503 для обработки плоских и фасонных поверхностей, штампы.

Таблица 4

Покрывтия электродов-инструментов

Материал покрытия ЭИ	Толщина слоя	Применение
Керамические эмали	0,03...0,17	Прошивка отверстий, узких щелей, фасонных, глубоких полостей.
Эпоксидные композиции	0,6...0,7	Прошивка отверстий.
Поливинил бутираль	0,2...0,4	Прошивка отверстий.
Полипропилен	0,3...0,35	Удаление заусенцев, обработка фасонных поверхностей.
Фторопласт	0,02...0,05	Прошивка малых отверстий.
Полиуретановая смола	0,1	Удаление заусенцев, прошивка отверстий большого диаметра.

4.2. По таблице 4 выбрать покрытие ЭИ.

Покрытие ЭИ делаем из керамической эмали (толщина слоя 0,1 мм).

5. Выбрать комплектующее и вспомогательное оборудование к установкам ЭХРО по таблице 5, если оно требуется.

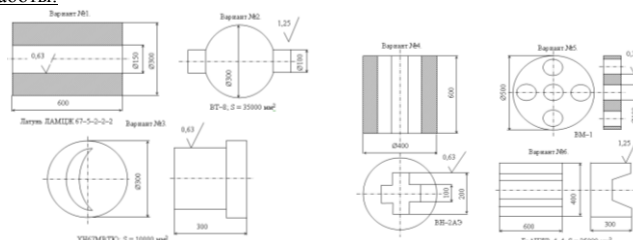
Таблица 5

Вспомогательное оборудование

Марка насоса	Полный напор, МПа	Подача, м ³ /ч
3Х-6Е-1	0,54	45
4Х-12К-1	3,35	90
ХБ-45/165	1,65	45
НЦВ-40/80	0,5	40
2ХМС-4Х4К-2Г(1)-2	1,9	20

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, определение по табличным данным основных зависимостей технологических параметров ЭХРО в зависимости от полученного варианта, а также изображение схемы обработки и вида ЭИ, список использованных источников.

Задания для самостоятельной работы:



Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

Рекомендуемые источники

1. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Яношкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Яношкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

Основная литература

1. Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 456 с.

2. Архипов, П.В. Технологические процессы в машиностроении: учебное пособие / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков. - Братск: БрГУ, 2016. - 202 с.

3. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сущность метода ЭХРО.
2. Виды деталей, обрабатываемых с помощью ЭХРО.
3. Шероховатость обработанной поверхности и производительность метода.
4. Дефекты, возникающие при ЭХРО.
5. Особенности изготовления ЭИ.

Лабораторная работа №2

Электроэрозионная обработка инструментальных материалов

Цель работы

Изучить различные методы ЭЭО инструментальных материалов. Произвести приближённый расчёт технологических характеристик ЭЭО. Произвести расчёт размеров электрода-инструмента для обработки отверстий. Анализ полученных результатов и их корректировка.

Задание:

1. Ознакомиться с основными понятиями, терминами и определениями электроэрозионной обработки инструментальных материалов.
2. Определить по табличным данным основные зависимости технологических параметров ЭЭО в зависимости от полученного варианта.
3. Расчётным путём определить основные размеры ЭИ для обработки сквозных или глухих отверстий, в зависимости от варианта.
4. Оформить отчёт по лабораторной работе.

Порядок выполнения:

1. По таблице 1 выбрать станок для ЭЭО, выбор производится, в зависимости от размеров заготовки и требуемой шероховатости получаемого отверстия.

Пример: заготовка с размерами 30×100, требуемая шероховатость отверстия – Ra = 0,34. По таблице 1 выбран универсальный копировально-прошивочный станок особо высокой точности марки 4Д722А.

2. По таблице 2 укомплектовать выбранный электроэрозионный копировально-прошивочный станок широкодиапазонным генератором.

Пример: по табл. 2 станок 4Д722А может быть укомплектован двумя широкодиапазонными генераторами ШГИ-20-440/3 и ШГИ-20-440/3П. Но они оба не удовлетворяют требованиям по шероховатости, следовательно, необходимо выбрать такой ШГИ, который бы удовлетворял эти требования - ШГИ-16-880Б Ra = 0,2 – 0,4.

3. По таблице 3 определить параметры режимов ЭЭО при использовании выбранного ШГИ.

Пример: материал заготовки – твёрдый сплав ВК15. По таблице 3 определяем материал электрода – медь, полярность прямая. Требования Ra – удовлетворяются.

4. По таблице 4 найти наиболее производительные режимы ЭЭО при питании от широкодиапазонных генераторов.

Пример: определили форму импульсов – прямоугольные. Все выше перечисленные и выбранные параметры должны остаться в требуемых пределах.

5. По таблицам 5 и 6 определить режимы ЭЭО и диапазон финишных режимов генератора.

Пример: для чистовой обработки отверстия получили по таблице 6 следующие режимы:

Для материала ВК15 производительность – 0,5; полярность остаётся прямой; износ ЭИ составляет приблизительно 65% и т. д.

6. Определить характеристики ЭЭО по таблице 7, в зависимости от материала ЭИ и формы импульсов.

Пример: для чистовой обработки отверстия определяем, соответственно, все характеристики.

7. По таблице 8 определить материал, используемый для изготовления ЭИ методами порошковой металлургии.

Пример: для обработки твёрдых сплавов, титана, тугоплавких металлов и сплавов для получения ЭИ методом порошковой металлургии мы будем использовать композицию медь – нитрид бора МНБ-3.

8. Определить по таблицам 9, 10 и 11 относительный объёмный износ (%) ЭИ при ЭЭО, соответственно, стали или твёрдого сплава на генераторах ШГИ.

Пример: при частоте 200 кГц для медного электрода объёмный износ, согласно таблице 10 составляет 60 – 360%. По таблице 11 уточняем этот параметр, тогда износ составит 80 – 100%.

9. Рассчитать время обработки и подачу по ф.:

$$T = 1 / f \quad (6)$$

$$\text{Подача} = \text{Производительность} / S \quad (7)$$

Пример: определим данные подачи и времени обработки, которые выберем, в соответствии с уже произведёнными расчётами, из таблицы 6. Производительность около 2,5 мм³/мин; S около 110 мм²; f – 440 кГц.

10. Рассчитать основные размеры ЭИ для обработки сквозных или глухих отверстий, в соответствии с вариантом задания. Расчётные формулы и эскиз обработки приведён в таблице 12 – для сквозных отверстий и в таблице 13 – для глухих.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы и краткие теоретические сведения по использованию электроэрозионной обработки инструментальных материалов; все характеристики и режимы ЭЭО в соответствии с методическими указаниями и примерами решения задач в соответствии с индивидуальным заданием по вариантам; выводы по каждому расчётному параметру; оформленные общие выводы по работе и предложения по её совершенствованию, список использованных источников.

Задания для самостоятельной работы:

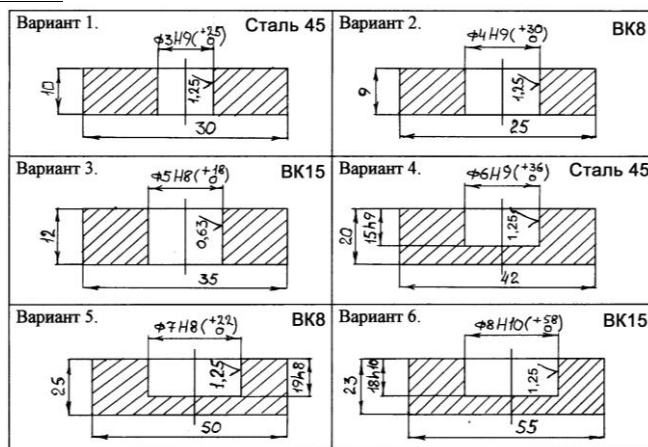


Таблица 1

Технические характеристики копировально-прошивочных станков для электроэрозионной обработки

Параметр	ОФ-81	МА4720У	4Г721М	4Д722А
	Специальный повышенной точности для обработки небольших заготовок	Специальный настольного типа с приводами, работающими в следящем режиме	Специальный настольного типа с приводами, работающими в следящем режиме	Универсальный с электромеханическим приводом подачи, нормальной точности
Размеры стола (длина×ширина),мм	200×125	200×125	360×200	630×400
Мах высота изделия, мм	-	-	100	200
Мах производительность, мм ³ /мин; по стали	70	70 – 80	250 – 100	500
Потребляемая мощность, кВт	3,2	3,25	4,5	-
Наибольший рабочий ток, А	16	16	40	63
Пределы частоты, кГц	3 – 880	3 – 880	8 – 440	1 – 440
Ra, мкм: тв. сплав, сталь	0,63	0,63 – 0,32 1,25 – 0,63	0,63 1,25	0,63 – 0,32 1,25 – 0,63

Таблица 2

Типовые варианты комплектования электроэрозионных копировально-прошивочных станков ШГИ и их характеристики

Модель станка	Тип генератора	Максимальный ток, А	Диапазон частот, кГц	Ra, мкм	Максимальная потребляемая мощность, кВт
ОФ-81	ШГИ-40-440Б	40	8 – 440	0,5	4,0
МА4720У	ШГИ-16-880Б	16	3 – 880	0,2 – 0,4	-
4Г721М	ШГИ-40-440А ШГИ-40-440Б	40	8 – 440	0,5	4,0
4Д722А	ШГИ-20-440/3 ШГИ-20-440/3П	20×3	1 – 440	0,4 – 1,0	6,0

Таблица 3

Параметры режимов при использовании ШГИ

Обрабатываемый материал	Полярность	Материал инструмента	Форма импульсов	Ra на финишном режиме	γ, %	f, кГц
Углеродистые, легированные, нержавеющие стали	Обратная	Медь	Пр Гр	0,5 – 0,6	10 – 120 0,2 – 10	≥3
		Углеродистый	Пр Гр		0,1 – 40 0,05 – 0,5	≥8
Твёрдые сплавы типа ВК	Обратная Прямая	Медь	Пр	0,25 – 0,35	25 – 40	1 – 22
		Медь			80 – 200	22 – 440
		Латунь			120 – 500	

Таблица 4

Наиболее производительные режимы при питании от широкодиапазонных генераторов

Rz, мкм	Форма импульсов*	Характеристика режимов			
		Частота, кГц	Скважность	Средний ток, А	Число гребней в импульсе
Сталь (полярность обратная)					
40 – 80	Пр	8	1,25	35 – 45	-
20 – 40	Гр	8	1,5	40	15 – 20
	Пр Гр	22 – 44 44 – 66	1,25 2 – 3	30 – 35 20 – 30	- 10 – 20
10 – 20	Пр Гр	66 – 100 100	1,25 – 1,5 2 – 3	25 – 30 8 – 10	- 10 – 5
	Пр Гр	200 200	1,7 – 2 2,5 – 3	12 – 14 4 – 5	- 7 – 8
Ra=0,63 – 1,25	Пр	440	3 – 4	До 4	-
Твёрдый сплав (полярность прямая)					
20 – 40	Пр	8	1,25	До 50	-
10 – 20	Пр	22 – 44	1,25	До 45	-
Ra=1,25 – 2,5	Пр	100	1,5	До 30	-
Ra=0,63 – 1,25	Пр	200	1,7	До 12	-
Ra=0,32 – 1,63	Пр	400	2,0	До 4	-

Обозначения: Пр – прямоугольные импульсы; Гр – гребенчатые.

Таблица 5

Режимы ЭЭО (черновая 1 и чистовая 2 обработки)

Параметр	1	2
Длительность импульсов, мкс	900 – 1000	5 – 7
Энергия импульсов, Дж	6 – 8	2,4
Частота повторения, имп/с	400	1200
Напряжение на электродах, В	20	200
Рабочая жидкость	Индустриальное масло И-12	Топливо дизельное
Амплитуда тока, А	100	2000

Таблица 6

Диапазон финишных режимов генератора типа ШГИ-16-880Б

Материал	Ra, мкм	Производительность, мм ³ /мин	Полярность	Износ ЭИ, %	Режим обработки			
					S, мм ²	I, А	f, кГц	Ti, мкс
BK15	0,15 – 0,18	0,034	Прямая	30	25	0,4	880	0,4
	0,26 – 0,29	0,2		40	50	0,7	880	0,6
	0,62 – 0,63	3,0		65	125	2,6	440	0,6
BK8	1,25	13		70	250	10	200	3,0
Сталь 45	0,22 – 0,25	-	Обратная	-	25	-	880	0,4
	0,32	0,02	Обратная	-	25	-	880	0,6
	0,54 – 0,56	0,03	Прямая	30	50	0,4	440	0,8
	0,62 – 0,64	0,7	Обратная	130	125	1,2	440	1,0
	1 - 2	6,0	Обратная	140	125	4,0	440	1,0

Таблица 7

Характеристики ЭЭО электродами из различных материалов

Материал ЭИ	Технологические характеристики ЭЭО	Черновые режимы		Чистовые режимы	
		f = 1 кГц I _p = 45 – 55 А F = 3000 мм ²	f = 44 кГц I _p = 20 – 25 А F = 1000 мм ²	f = 88 кГц I _p = 10 – 15 А F = 1000 мм ²	f = 200 кГц I _p = 3 – 5 А F = 500 мм ²
Медь, импульсами: Пр	Qa, мм ³ /мин	8,2	5,5	3,9	2,4
	γ, %	20	60	70	90
	Ra, мкм	26	6	3	1,5
Гр	Qa, мм ³ /мин	6	4,1	3	2
	γ, %	0,1	1,2	1,5	1,8
	Ra, мкм	60	10	6	3,5
ЭЭПГ	Qa, мм ³ /мин	9,3	6,2	3,5	1,3
	γ, %	0,1	12,5	32	105
	Ra, мкм	40	8	6	5
МПГ-7 (высший сорт)	Qa, мм ³ /мин	8,0	7,0	4,3	1,8
	γ, %	0,2	8	1,6	50
	Ra, мкм	40	7	5	2,8
МПГ-6	Qa, мм ³ /мин	8,7	6,8	4,5	1,9
	γ, %	0,1	10	17	60
	Ra, мкм	40	7	5,2	3
ЕДМ-1	Qa, мм ³ /мин	9,0	6,2	2,7	0,5
	γ, %	0,15	8,3	33	140
	Ra, мкм	40	8	6	4
ЕК	Qa, мм ³ /мин	10,6	6,2	2,5	0,6
	γ, %	0,5	18	60	130
	Ra, мкм	40	10	6	5
АРВ-2	Qa, мм ³ /мин	9,5	6,3	3,2	-
	γ, %	0,1	16	40	-
	Ra, мкм	40	7	5,5	-

Примечание: Qa – производительность съема на 1 А рабочего тока

Таблица 8

Материалы, используемые для изготовления ЭИ методами порошковой металлургии

Материал, марка	Состав	Содержание, массовые доли в %	Основное применение
Медный порошок ПМА, ПМС, ПМ	Медь	99,8	Обработка стали и жаропрочных сплавов
Композиция медь – нитрид бора МНБ-3	Медь Нитрид бора	97 3	Обработка твердых сплавов, титана, тугоплавких металлов и сплавов
Алюминиевый порошок АКП	Алюминий	99,2	Заменяет ЭИ из алюминиевого сплава Д1
Углеродо-полимерный материал УПМ	Углерод	99,0	Применяют, как и другие углеродистые электроды

Таблица 9

Относительный объёмный износ (%) ЭИ при ЭЭО стали на генераторах ШГИ

Частота, кГц	Импульсы			
	Пр		Гр	
	ЭИ			
	Медный	Графитированный	Медный	Графитированный
5	15 – 40	0,6 – 1	0,3 – 0,5	-
22	25 – 45	3 – 5	0,3 – 0,8	0,08 – 0,15
44	30 – 50	5 – 18	0,5 – 1	0,1 – 0,15
66	35 – 55	15 – 25	0,8 – 1,2	0,12 – 0,15
88	40 – 70	30 – 40	1 – 1,8	0,3 – 0,5
100	-	-	1 – 2	0,8 – 1,2
200	45 – 90	40 – 70	-	-
440	90 – 140	-	-	-

Таблица 10

Объёмный износ (%) ЭИ (катода) при работе на генераторах ШГИ

Обрабатываемый материал	Материал ЭИ				
	Латунь	Медь	Чугун	Алюминий	Вольфрам
Твёрдый сплав	170 – 300	60 – 360	30 – 210	260 – 730	20 – 120
Углерод. сталь	70 – 100	20 – 60	10 – 30	20 – 80	2 – 16
Жаропроч. сплав	20 – 50	15 – 120	5 – 35	20 – 60	3 – 20

Таблица 11

Объёмный износ (%) ЭИ при обработке твёрдых сплавов

Частота, кГц	Материал ЭИ		Частота, кГц	Материал ЭИ	
	Латунь	Медь		Латунь	Медь
8	350 – 440	180 – 200 (70 – 100)	66	250 – 300	-
22	380 – 400	110 – 140 (100 – 140)	88	200 – 240	100 – 120
44	300 – 350	120 – 150	200	180 – 200	80 – 100
			400	100 – 120	75 – 90

Примечание: В скобках даны значения, полученные при обратной полярности тока

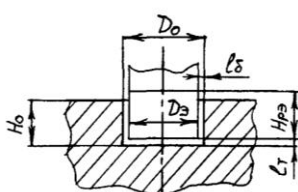
Таблица 12

Расчёт размеров ЭИ для обработки сквозных отверстий

Схема обработки	ЭИ	Расчётные формулы	ПРИМЕЧАНИЕ
	Медный	$D_z = D_0 - 2l_6$ $H_{рз} = [(1,5 \div 2) + \gamma \varepsilon] H_0$	Для однопроходной прошивки отверстий
	Графитовый	$H_{рз} = [(1,1 \div 1,3) + \gamma \varepsilon] H_0$	Точность получаемого отверстия не выше $\pm 0,1$ мм

Таблица 13

Расчёт размеров ЭИ для обработки глухих полостей

Схема обработки	Расчётные формулы	Примечание
	$H_{рз} = (H_0 + (\Delta_{од}/2))(1 + \gamma \varepsilon) - l_t$ $D_z = D_0 - (\Delta_{од}/2) - 2(l_6 - \gamma \varepsilon)(l_6 - l_t)$	Для прошивки глухих полостей с вертикальными стенками

Обозначения:

$H_{рз}$ – длина рабочей части ЭИ, мм;

H_0 – глубина обрабатываемого отверстия, мм;

D_0 – номинальный размер отверстия в горизонтальной плоскости, мм;

D_z – размер рабочей части ЭИ в горизонтальной плоскости, мм; $\Delta_{од}$ – допуск на размер отверстия в горизонтальной плоскости, мм;

l_6 – боковой, межэлектродный зазор, мм;

l_t – торцовый МЭЗ, мм;

$\gamma \varepsilon$ – относительный износ ЭИ;

$\Delta_{од}$ – допуск на размер обрабатываемой полости по высоте, мм.

Таблица 14

Значения МЭЗ при ЭЗО прямоугольными и гребенчатыми импульсами

Режим		МЭЗ при питании от генератора ШГИ-40-440Б		Режим		МЭЗ при питании от генератора ШГИ-40-440Б		
Максимальный ток, А	Частота, кГц	Торцовый	Боковой	Максимальный ток, А	Частота, кГц	Торцовый	Боковой	
90	8,0	-	-	20	66	0,04	0,07	
70		-	-	15		0,03	0,06	
50		-	-	7		0,02	0,05	
40		0,06	0,15	3		0,02	0,05	
30		0,05	0,12	25		0,04	0,07	
20		0,04	0,09			15	0,03	0,06
12		0,03	0,07			10	0,03	0,05
5	0,02	0,05	5		0,02	0,05		
50	22	0,06	0,12	20	100	0,04	0,06	
40		0,05	0,10	15		0,02	0,05	
30		0,04	0,08	10		0,02	0,04	
20		0,04	0,07	3		0,02	0,03	
12		0,03	0,06	1		0,01	0,02	
5		0,02	0,04					
25	44	0,04	0,07					
15		0,03	0,06					
7		0,02	0,05					
3		0,02	0,04					

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

Рекомендуемые источники

1. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

Основная литература

1. Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 456 с.

2. Архипов, П.В. Технологические процессы в машиностроении: учебное пособие / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков. - Братск: БрГУ, 2016. - 202 с.

3. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сущность метода ЭЭО.
2. Основные параметры и характеристики электроэрозионной обработки.
3. Основные характеристики ШГИ.
4. Различия и общие признаки методов ЭЭО.
5. Основные параметры и характеристики ЭИ.

Лабораторная работа №3 Лазерная обработка конструкционных материалов

Цель работы:

Освоить различные методы лазерной обработки конструкционных материалов. Рассчитать основные характеристики лазерного луча. Определить расчетным путем основные конструктивные параметры ОКГ, режимы обработки отверстий и резки металлов.

Задание:

1. Ознакомиться с основными понятиями, терминами и определениями лазерной обработки конструкционных материалов.
2. Расчётным путём получить некоторые значения ОКГ-лазера.
3. Рассчитать параметры технологического процесса лазерной обработке отверстий.
4. Рассчитать параметры технологического процесса лазерной резки конструкционных материалов.
5. Оформить отчёт по лабораторной работе.

Порядок выполнения:

1. При выполнении первого задания необходимо учесть, что согласно действующим стандартам ОСТ.3-24-70 и ОСТ.3-25-70 рубиновые активные элементы лазеров, изготавливаемые с маркировкой: "Р", "РЛ", "РЛС" и др. имеют строго регламентированные размеры. Например, рубин "РЛОБ-10×120" имеет диаметр $d_s = 10$ мм и длину $l = 120$ мм с длиной световой волны $\lambda = 10,6$ мкм. Активные элементы, выпускаемые по ОСТ.3-31-70 и ОСТ.3-30-70, изготавливают из стекла, активированного неодимом. Например, "ЭНЦ-90 /8×10" имеет $d_s = 8$ мм, $l = 100$ мм и $\lambda = 0,586 \dots 1,06$ мкм.

Отечественной промышленностью освоен выпуск стандартных активных элементов лазера из стекла с размерами диаметров от 5 до 60 мм и длиной от 80 до 1200 мм, а рубиновые диаметром от 3,5 до 16 мм и длиной от 45 до 240 мм.

Решение задач первого задания по своим вариантам (см. табл.4) провести в следующем порядке:

1.1. Определение величины расходимости луча ОКГ – лазера.

Пример решения:

$$\theta_p = \frac{1,22 \times \lambda}{d_s} = \frac{1,22 \times 0,0106}{5} = 0,0026 \text{ мрад}$$

Т.е. при $\lambda = 10,6$ мкм, $d_s = 5$ мм, получаем $Q_p = 0,0026$ мрад.

1.2. Определение величины расходимости сфокусированного луча лазера и размер фокального пятна.

Пример решения:

$$\theta = 0,939 \left| \frac{\lambda}{\alpha} \right|^{1/2} = 0,939 \left| \frac{0,0106}{45} \right|^{1/2} = 0,0144 \text{ мрад}$$

$$\tau = \kappa \times \theta \times F = 0,0144 \times 100 \times 1,0 = 1,44 \text{ мм,}$$

при $\alpha = 45$ мм, $F = 100$ мм, $\kappa = 1,0$, получаем $\theta = 0,0144$ мрад и $\tau = 1,44$ мм.

1.3. Определение величины интенсивности освещения в центре дифракционной зоны сфокусированным лучом лазера:

Пример решения:

$$J_o = \frac{A_{об}}{F^2 \times \lambda^2} \times P_{вых} = \frac{0,5 \times 100}{0,0106^2} = 454545 \text{ Вт / мм}^2 = 4,5 \times 10^5 \text{ Вт / мм}^2$$

При $A_{об}/F^2 = 0,5$, $P_{вых} = 100$ Вт (согласно варианту задания), имеем $J_o = 4,5 \times 10^5$ Вт/мм².

1.4. Определение полной энергии излучения ОКГ-лазера:

Пример решения:

$$W_{\Sigma} = \omega_p \times W_n \times \left(1 - \frac{1}{\gamma_{\omega}^n} \right) = 0,86 \times 0,2 \times 0,5 = 0,086 \text{ кДж} = 86 \text{ Дж}$$

При данных, согласно варианту задания: $W_n = 0,2$ кДж, $\omega_p = 0,86$;

$W_{\Sigma} = 0,086$ кДж = 86 Дж = 20,5 кал.

1.5. Определение коэффициента полезного действия лазерной установки:

Пример решения:

$$\eta_{к.п.д.} = \frac{W_{\Sigma}}{W_n} = \frac{0,086}{0,2} = 0,43$$

Имеем $\eta_{к.п.д.} = 0,43$.

2. Решение задач второго задания по соответствующим вариантам провести в следующем порядке:

2.1. Определить диаметр и глубины прожигаемых отверстий, используя зависимости:

$$D = 0,9553 \{ [(0,014 \times F - 0,728) \times K_{вз}^2 + (-0,0146 \times F + 0,71) \times K_{вз} + 0,141] \times V + (-0,0742 \times F + 3,054) \times K_{вз}^2 + (0,0782 \times F - 3,035) \times K_{вз} - 0,00245 \times F - 0,558 \}, \quad (13)$$

где $K_{вз}$ – коэффициент пропускной способности выходного зеркала резонатора; V – напряжение на зажимах конденсаторной батареи (см. поз.7, рис.2), кВ.

Глубина отверстий:

$$l = 0,888 \{ [(-0,0256 \times F - 0,13) \times K_{вз}^2 + (0,033 \times F + 0,02) \times K_{вз} - 0,0011 \times F + 0,36] \times V + (0,122 \times F - 2,97) \times K_{вз}^2 + (-0,157 \times F + 3,23) \times K_{вз} + 0,0004 \times F - 1,258 \}, \quad (14)$$

Пример решения:

$$D = 0,9553 \{ [(0,014 \times 50 - 0,728) \times 0,5^2 + (-0,0146 \times 50 + 0,71) \times 0,5 + 0,141] \times 5 + (-0,0742 \times 50 + 3,054) \times 0,5^2 + (0,0782 \times 50 - 3,035) \times 0,5 - 0,00245 \times 50 - 0,558 \} = 0,304 \text{ мм.}$$

При данных, согласно варианту задания: $F = 50$ мм; $V = 5$ кВ; диаметре диафрагмы выходного зеркала резонатора $d_0 = 12,5$ мм; $K_{вз} = 0,5$ имеем $D = 0,304$ мм.

Глубина отверстия:

$$1 = 0,888\{[(-0,0256 \times 50 - 0,13) \times 0,5^2 + (0,033 \times 50 + 0,02) \times 0,5 - 0,0011 \times 50 + 0,36] \times 5 + (0,122 \times 50 - 2,97) \times 0,5^2 + (-0,157 \times 50 + 3,23) \times 0,5 + (0,0004 \times 50 - 1,258)\} = 1,041 \text{ мм.}$$

2.2. Исследовать влияние величины напряжения на зажимах конденсаторов (V, кВ) на изменение диаметра прожигаемых отверстий (D, мм) и построить график данной зависимости (образец см. рис.4).

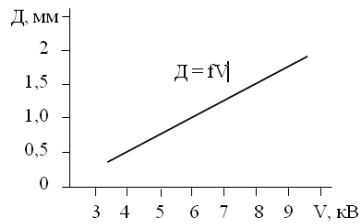


Рис.4. Зависимость величины напряжения на зажимах конденсаторов на изменение диаметра прожигаемых отверстий

$$D = 0,18 \times V - 0,55; \quad (15)$$

При исследовании принять: $V_1 = 3,5$; $V_2 = 4,5$; $V_3 = 5,5$; $V_4 = 6,5$; $V_5 = 8,5$; $V_6 = 10,0$ кВ.

Пример решения: $D_1 = 0,18 \times 3,5 - 0,55 = 0,08$ мм; ...; $D_6 = 0,18 \times 10 - 0,55 = 1,25$ мм.

2.3. Исследовать зависимость изменения величины фокусного расстояния от различных значений диаметра – D, прожигаемого отверстия и построить график данной зависимости (образец см. рис.5).

$$F = \frac{D - 0,23}{0,003} \quad (16)$$

При исследовании принять: $D_1 = 0,3$ мм; $D_2 = 0,5$; $D_3 = 0,7$ мм; $D_4 = 0,9$ мм; $D_5 = 1,0$ мм; $D_6 = 1,2$ мм; $D_7 = 1,4$ мм.

Пример решения:

$$F_1 = \frac{0,3 - 0,23}{0,003} = 23,3 \text{ мм}; \quad F_7 = \frac{1,4 - 0,23}{0,003} = 390 \text{ мм.}$$

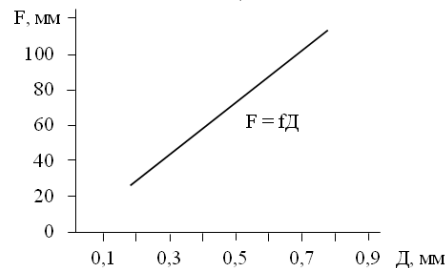


Рис.5. Зависимость изменения величины фокусного расстояния от диаметра прожигаемого отверстия

3. Решение задач третьего задания по соответствующим вариантам провести в следующем порядке:

3.1. Определение скорости разрушения материала при лазерной резке, используя зависимость:

Пример решения: согласно индивидуальному заданию по варианту дано:

$$2y_0 = 0,15 \text{ см}; \quad \rho = 7,8 \text{ г/см}^3; \quad \delta = 1,0 \text{ см}; \quad V_n = 30 \text{ см/мин.}$$

$$m = 2y_0 \times \rho \times \delta \times V_n = 0,15 \times 7,8 \times 1,0 \times 30 = 35,1 \text{ г/мин} = 0,585 \text{ г/с}$$

3.2. Определение величины поглощаемой или выделяемой мощности теплового источника – лазера, связанной с удельным энерговыделением химических реакций в материале при его резке:

Пример решения: дано $Q_y = 2900$ кал/г,

$$W_x = Q_y \times m = 2900 \times 0,585 = 1696,5 \text{ кал/с} = 7103 \text{ Вт}$$

Примечание: тепловой поток, измеряемый как 1 кал/с = 4,1868 Вт.

$$W_x = 7103 \text{ Вт} = 7,1 \text{ кВт.}$$

3.3. Определить мощность лазерного излучения, поглощаемую материалом, используя зависимость (9):

Пример решения, если дано: $P_n^1 = 700$ Вт; $(1 - R) = 0,7$;

$$W_n = P_n^1 (1 - R) = 700 \times 0,7 = 490 \text{ Вт}$$

3.4. Определение величины эквивалентного теплового источника, т.е. мощности CO₂ лазера, используя зависимость (8):

Пример решения, если дано: $\Delta W = 100$ Вт; $W_n = 490$ Вт; $W_x = 7103$ Вт,

$$W_\Sigma = W_n + W_x + \Delta W = 490 + 7103 + 100 = 7693 \text{ Вт} = 7,7 \text{ кВт}$$

3.5. Определение энергии резания, т.е. основной характеристики материала:

Пример решения, если дано: температура разрушения материала $T_p = 1500$ °С; атомарная теплоемкость $c = 6,0$ кал/г×атом; величина безразмерного термохимического параметра – $\psi = 0,3$ для стали Ст3 и ранее определенная величина удельного энерговыделения химических реакций и фазовых переходов $Q_y = 2900$ кал/г,

$$S_0 = c \times T_p - Q_y = (6 \times 1500 - 2900) = 6100 \text{ кал/г} = 25,5 \text{ кДж/г}$$

$$S_0 = c \times T_p (1 - \psi) = (6 \times 1500 \times 0,7) = 6300 \text{ кал/г} = 26,4 \text{ кДж/г,}$$

Принимаем $S_0 = 26$ кДж/г.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы и краткие теоретические сведения по использованию лазеров для обработки конструкционных материалов; все расчёты в соответствии с методическими указаниями и примерами решения задач в соответствии с индивидуальным заданием по вариантам; выводы по каждому расчётному параметру и общие выводы по работе, список использованных источников.

Задания для самостоятельной работы:

1. Расчётным путём получить значения: величины расходимости ОКГ-лазера – θ_p ; радиус фокального пятна r и величину расходимости сфокусированного лазерного луча у фокального пятна θ ; интенсивность освещения в центре дифракционной зоны от сфокусированного лазерного луча – J_0 и коэффициент полезного действия лазера – $\eta_{\text{к.п.д.}}$. Данные для расчёта приведены в табл. 3 первого задания.

Таблица 3

№ вар.	W_n , кДж	$(1-1/\gamma_{\omega}^n)$	d_3 , мм	λ , мкм	F, мм	ω_p	α , мм	$\frac{A_{об}}{F^2}$	$P_{вых}$, кВт
1	0,2	0,5	8	0,586	25	0,86	100	0,5	0,1
2	0,3	0,5	10	0,586	25	0,86	120	0,5	0,2
3	0,5	0,95	12	10,6	50	0,4	180	0,5	0,3
4	1,0	0,97	14	10,6	50	0,4	220	0,3	1,0
5	1,0	0,98	16	10,6	75	0,85	240	0,35	2,0
6	10,0	0,5	60	1,06	200	0,95	500	0,4	5,0
7	15,0	0,4	30	1,06	120	0,97	400	0,5	6,0
8	15,0	0,4	40	1,06	150	0,5	450	0,6	5,5
9	20,0	0,3	50	1,06	240	0,5	1000	0,6	8,0
10	25,0	0,4	60	1,06	260	0,5	1200	0,6	10,0

2. Рассчитать параметры технологического процесса лазерной обработке отверстий: диаметр отверстия – D; глубину – l; величину фокусного расстояния – F. Исследовать влияние рабочего напряжения на зажимах конденсатора на изменение диаметра прожигаемых отверстий. Данные для расчёта по второму заданию приведены в табл. 4.

3. Рассчитать параметры технологического процесса лазерной резки конструкционных материалов: скорости разрушения материалов при резке – m; мощности, поглощаемой материалом – W_n и мощности, выделяемой от химических реакций при резании – W_x , а также мощность суммарную CO_2 лазера – W_{Σ} энергии резания – S_0 . Данные для расчёта по третьему заданию приведены в табл. 5.

Таблица 4

№ вар.	V, кВт	$K_{вз}$	d_3 , мм	F, мм
1	0,5	1,0	3,0	10
2	1,0	0,9	4,0	15
3	5,0	0,8	12,5	20
4	2,0	0,75	6,0	25
5	2,5	0,7	8,0	30
6	3,0	0,6	10,0	50
7	5,0	0,5	12,5	40
8	4,0	0,4	12,5	40
9	4,5	0,75	12,5	40
10	5,0	0,4	20,0	60

Таблица 5

№	$2y_0$, см	ρ , г/см ³	δ , см	V_n , м/мин	Q_y , кал/г	(1-R)	$P_{л}^1$, Вт	ΔW , Вт	ψ	T_p , °C
1	0,6	7,8	0,2	0,1	650	0,7	100	50	0,07	1520
2	0,2	8,1	0,3	0,3	2500	0,8	500	70	0,32	1250
3	0,5	7,8	1,6	0,5	2260	0,7	300	250	0,25	1530
4	0,3	7,8	1,2	0,6	2400	0,7	700	250	0,30	1400
5	0,8	7,8	0,8	2,0	2600	0,95	9000	300	0,40	1450
6	0,25	2,7	1,0	1,6	3500	0,9	9500	300	1,00	670
7	0,3	7,8	0,3	4,0	2800	0,7	850	150	0,50	1520
8	0,45	7,8	0,5	6,0	3000	0,7	8000	400	0,45	1400
9	0,7	7,8	2,0	5,0	3600	0,7	9000	600	0,60	1440
10	0,5	7,8	0,7	10,0	4000	0,7	9800	700	0,70	1370

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

Рекомендуемые источники

1. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

Основная литература

1. Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 456 с.

Дополнительная литература

2. Архипов, П.В. Технологические процессы в машиностроении: учебное пособие / П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков. - Братск: БрГУ, 2016. - 202 с.

3. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Физическая сущность действия ОКГ.
2. Различие газовых и твердотельных ОКГ.
3. Различия в использовании активных элементов, изготовленных из стекла и рубина.
4. Различия и общие признаки технологического процесса обработки отверстий и резки конструкционных материалов.
5. Коэффициент полезного действия светолучевой обработки конструкционных материалов. Факторы потери КПД.

Лабораторная работа №4

Обработка металлов давлением импульсного магнитного поля

Цель работы:

Изучить физическую сущность и технологические возможности обработки конструкционных материалов ДИМП. Изучить устройство энергетической установки индукторов и технологической оснастки для обработки ДИМП конструкционных материалов. Определить режим деформирования трубчатой заготовки и выполнить практическую работу по деформированию.

Задание:

1. Ознакомиться с основными понятиями, терминами и определениями обработки металлов давлением импульсного магнитного поля.
2. Деформировать трубчатую заготовку из материала, соответственно номеру варианта.
3. Определить значение необходимой для деформации втулки напряжённости магнитного поля.
4. Оформить отчёт по лабораторной работе.

Порядок выполнения:

1. Деформируем трубчатую заготовку из легированной стали 1Х18Н9Т. Размеры заготовки приведены на рис.8.
2. По формуле (13) находим давление деформирования втулки при $gв = 21$ мм и $gн = 25$ мм. По табл.1, 11-ого варианта оно равно 30×10^7 Н/м². Подставляя получаем $Rст$. Найдя его, определяем $Rдин$.
3. Затем по формуле (14) определяем значение необходимой для деформации втулки напряжённости магнитного поля H .
4. По табл.2 находим значение накапливаемой энергии и её номер позиции на установке.
5. Провести анализ и сжать полученный материал с целью представления его в диссертации.

Форма отчётности: отчёт по лабораторной работе должен содержать: цель работы, решаемые в ней задачи, краткие теоретические сведения по ДИМП, расчёт деформации трубчатой заготовки со всеми необходимыми рисунками, размерами и табличными данными, список использованных источников.

Задания для самостоятельной работы:

1. Деформировать трубчатую заготовку из материала, соответственно номеру варианта (см. табл.1), для формообразования конуса (рис.1.8), используя инструмент-оправку (рис.1.9) из стали 45. Материал оправки подвергается термической обработке – закалке и отпуску; твёрдость металла после термической обработки равна HRC 40...42. Схема деформирования для формообразования конуса показана на рис.1.10.

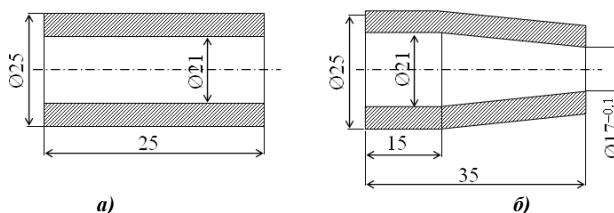


Рис.1.8. Трубчатая заготовка:
а) до деформирования; б) после деформирования

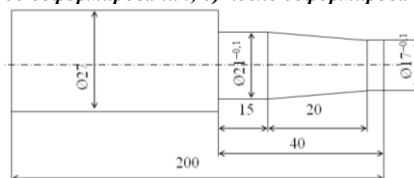


Рис.1.9. Конструкция оправки

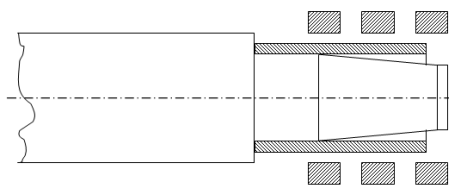


Рис.1.10. Схема деформирования втулки

Давление деформирования втулки определяется по формуле: $D\tilde{n}\delta = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \sigma_s \times \ln \frac{r_i}{r_a}$; Н/м² (13)

где $gв$ и $gн$ – радиусы внутренней и наружной поверхностей деформируемой втулки;
 σ_s – предел текучести, Н/м²

Таблица 1

Зависимость глубины проникновения вихревых токов в металлы и сплавы от частоты разрядного тока

№ вар	Марка материала	Предел прочности, $\times 10^7$ Н/м ²	Предел текучести, $\times 10^7$ Н/м ²	Удельное электрическое сопротивление, $\times 10^{-8}$ Ом×м	Глубина проникновения Δ , мм		
					5 кГц	10 кГц	20 кГц
1	Медь М1	24	7	1,78	0,95	0,67	0,48
2	Латунь Л62	33	11	7,2	1,73	1,22	0,86
3	Латунь Л68	32	10	7,2	1,91	1,35	0,95
4	Бронза БрБ2	50	30	6,8	1,86	1,31	0,93
5	АМгМ	19	10	5,09	1,6	1,13	0,8
6	Амг3М	19	9	4,95	1,58	1,12	0,79
7	Амг6М	32	16	7,1	1,9	1,34	0,95
8	Д16М	18	10	4,35	1,48	1,05	0,74
9	МА8М-М	26	19	5,1	1,61	1,15	0,8
10	Ст10	40	25	19,25	3,12	2,21	1,56
11	Ст20	48	30	24,2	2,7	1,9	1,34
12	1Х18Н9Т	99	30	72	6,04	4,2	3,02

Зависимость значений H от величины W

Номер позиции на установке	Величина накапливаемой энергии W , кДж	Напряжённость магнитного поля H , А/м
1	2,0	$96,5 \times 10^5$
2	2,5	$100,2 \times 10^5$
3	3,0	$105,3 \times 10^5$
4	3,5	$109,8 \times 10^5$
5	4,0	$114,7 \times 10^5$
6	4,5	$119,8 \times 10^5$
7	5,0	$124,5 \times 10^5$
8	5,5	$127,5 \times 10^5$
9	6,0	$132,2 \times 10^5$
10	6,5	$136,7 \times 10^5$
11	7,0	$140,8 \times 10^5$
12	7,5	170×10^5

При деформировании металла давлением импульсного магнитного поля принимают $R_{дин} = 3R_{ст}$.

2. Согласно ф.(2) определить значение необходимой для деформации втулки напряжённости магнитного поля:

$$H = \sqrt{\frac{2R_{дин}}{\mu}}; \text{ А/м.} \quad (14)$$

Определив необходимую величину напряжённости магнитного поля, найти значение накапливаемой энергии. В используемой для выполнения лабораторной работы системе – энергетическая установка МИУ-7 и многовитковый индуктор – характер напряжённости магнитного поля в зависимости от величины накапливаемой энергии показан в табл.2.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Лабораторная работа выполняется на базе информации по выбранной тематике исследования, собранной магистрантом самостоятельно. Полученные результаты обсуждаются и согласовываются с ведущим преподавателем.

Рекомендуемые источники

1. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

Основная литература

1. Железнов, Г. С. Процессы механической и физико-химической обработки материалов: учебник / Г.С. Железнов, А.Г. Схиртладзе. - Старый Оскол: ТНТ, 2011. - 456 с.

Дополнительная литература

2. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228 с.

3. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Суть способа деформирования конструкционных материалов давлением импульсного магнитного поля.
2. Объяснить сущность применения индуктора с концентратором.
3. Причины повышения пластичности сплавов в процессе деформирования ДИМП.
4. Привести классификацию технологических операций, выполняемых ДИМП.
5. Назначение, устройство и применение оборудования для обработки металлов давлением импульсного магнитного поля.

9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта (курсовой работы), контрольной работы, РГР, реферата

Учебным планом не предусмотрено.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Информационно-коммуникативные технологии (ИКТ) используются для:

- получения информации при подготовке к занятиям;
- создания презентационного сопровождения занятий;
- работы в электронной информационной среде.

Стандартное лицензионное программное обеспечение:

1. Microsoft Imagine Premium: Microsoft Windows Professional 7.
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level.
3. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.
4. Adobe Reader.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ Лк, ЛР, ПЗ</i>
Лк	Лекционная / семинарская аудитория	Учебная мебель	-
ЛР	Лекционная / семинарская аудитория	Учебная мебель	-
СР	Читальный зал № 1	Учебная мебель; 10-ПК i5-2500/Н67/4Gb (монитор TFT19 Samsung); принтер HP LaserJet P2055D	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-1	способность использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда	1. Общие сведения об электротехнологии 2. Отделочные процессы механической обработки деталей 3. Основные методы и способы ЭФХКО 4. Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО	1.1. Общие положения 1.2. Классификация методов ЭФХКО 1.3. Области применения и эффективность методов ЭФХКО 2.1. Отделка поверхностей лезвийными инструментами 2.2. Доводка поверхностей абразивными инструментами 2.3. Отделочная обработка металлов давлением 2.4. Отделочная обработка поверхностей выглаживающим инструментом 2.5. Расчет времени обработки при отделочных операциях 3.1. Методы, основанные на электрохимическом воздействии 3.2. Методы, основанные на использовании теплового действия электрического тока 3.3. Обработка, основанная на использовании механического действия тока или электромагнитного поля 3.4. Комбинированные методы обработки 4.1. Оборудование для электроэрозионной обработки 4.2. Генераторы импульсов 4.3. Регуляторы межэлектродного промежутка 4.4. Типовая структура оборудования для ЭХО	Вопросы к зачету

2. Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1.	ОПК-1	способность использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда	1. Механизмы изнашивания абразивных инструментов	1. Общие сведения об электротехнологии
			2. Тепловые процессы при шлифовании металлов	
			3. Конструктивные особенности и требования к катоду	2. Отделочные процессы механической обработки деталей
			4. Качественные характеристики и их уровень процесса электроалмазной обработки	
			5. Пути и варианты модернизации существующего оборудования под технологию электроалмазной обработки	3. Основные методы и способы ЭФХКО
			6. Вопросы техники безопасности	
			7. Прогнозирование направления развития и создания новых методов обработки	4. Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО
			8. Пути создания (проектирования) нового оборудования с расширенными технологическими возможностями	

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
Знать: <i>ОПК-1</i> - основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества; Уметь: <i>ОПК-1</i> - разрабатывать процессы изготовления машиностроительных изделий требуемого качества; Владеть: <i>ОПК-1</i> - навыками изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда.	зачтено	- даны исчерпывающие и обоснованные ответы на все поставленные вопросы; - ответы изложены грамотно, уверенно, логично, последовательно; - опираясь на усвоенные знания, четко увязывает научные положения с практической деятельностью; - свободно владеет основными понятиями дисциплины.
	не зачтено	- допускает существенные ошибки и неточности при ответе на поставленные вопросы; - испытывает трудности в практическом применении полученных знаний; - не может аргументировать научные положения; - не владеет системой основных понятий дисциплины.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки направлена на освоение на практике и совершенствование технологий, систем и средств машиностроительных производств, включая участие в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий с учётом научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта в данных областях, разработка, эксплуатация и реорганизация машиностроительных производств.

Изучение дисциплины Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- самостоятельную работу;
- зачет.

В ходе освоения раздела 1 Общие сведения об электротехнологии обучающиеся должны: уяснить общие положения дисциплины, классификацию методов ЭФХКО, области применения и эффективность методов ЭФХКО.

В ходе освоения раздела 2 Отделочные процессы механической обработки деталей обучающиеся должны ознакомиться с отделкой поверхностей лезвийными инструментами, доводкой поверхностей абразивными инструментами, отделочной обработкой металлов давлением, отделочной обработкой поверхностей выглаживающим инструментом, расчетом времени обработки при отделочных операциях.

В ходе освоения раздела 3 Основные методы и способы ЭФХКО обучающиеся должны раскрыть основные характеристики методов, основанных на электрохимическом воздействии, методов, основанных на использовании теплового действия электрического тока, обработки, основанной на использовании механического действия электрического тока или электромагнитного поля, комбинированных методов обработки.

В ходе освоения раздела 4 Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО обучающиеся должны ознакомиться с оборудованием для электроэрозионной обработки, генераторами импульсов, регуляторами межэлектродного промежутка, достижениями зарубежного станкостроения, типовой структурой оборудования для ЭХО, источниками питания, электродами-инструментами.

Необходимо овладеть навыками и умениями применения полученных знаний для подготовки и проведения организационной работы в области качественной обработки поверхностей, применения и реализации тех или иных технологических решений в конкретных ситуациях.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется обратить внимание на научные проблемы состояния поверхностного слоя деталей машин после комбинированной электроалмазной обработки.

Овладение ключевыми понятиями, терминами и определениями качества продукции является

необходимым для корректного оперирования общепринятыми терминами научного сообщества при подготовке выпускной квалификационной работы.

При подготовке к зачёту рекомендуется особое внимание уделить вопросам, связанным с проблемами состояния поверхностного слоя деталей машин.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления об основах электрофизических и электрохимических процессов обработки деталей машин в технологии машиностроения.

Самостоятельную работу необходимо начинать с ознакомления с основными понятиями, терминами и определениями электрофизических и электрохимических процессов; определения основных задач, решаемых при помощи электрофизических и электрохимических процессов обработки деталей машин в технологии машиностроения.

В процессе консультации с преподавателем обсуждаются и согласовываются полученные результаты, уточняются и корректируются отчёты по лабораторным работам и научные статьи по результатам исследований.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и в Интернете.

АННОТАЦИЯ
рабочей программы дисциплины
Основы электрофизических и электрохимических процессов обработки

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является – освоение на практике и совершенствование технологий, систем и средств машиностроительных производств, включая участие в разработке и внедрении оптимальных технологий изготовления машиностроительных изделий с учётом научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта в данных областях, разработка, эксплуатация и реорганизация машиностроительных производств.

Задачами изучения дисциплины является:

- развитие способности использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда.

2. Структура дисциплины

2.1. Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: лекции – 14 часов; лабораторные работы – 28 часов; самостоятельная работа – 66 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часов, 3 зачетные единицы.

2.2. Основные разделы дисциплины:

1. Общие сведения об электротехнологии.
2. Отделочные процессы механической обработки деталей.
3. Основные методы и способы ЭФХКО.
4. Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО.

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-1 – способность использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда.

4. Вид промежуточной аттестации: Зачет.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры ТМ №__ от «__» _____ 20__ г.,

Заведующий кафедрой _____

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-1	способность использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда	1. Общие сведения об электротехнологии	1.1. Общие положения 1.2. Классификация методов ЭФХКО 1.3. Области применения и эффективность методов ЭФХКО	Конспект лекций
		2. Отделочные процессы механической обработки деталей	2.1. Отделка поверхностей лезвийными инструментами 2.2. Доводка поверхностей абразивными инструментами 2.3. Отделочная обработка металлов давлением 2.4. Отделочная обработка поверхностей выглаживающим инструментом 2.5. Расчет времени обработки при отделочных операциях	Конспект лекций
		3. Основные методы и способы ЭФХКО	3.1. Методы, основанные на электрохимическом воздействии	Отчет по ЛР 1...2
			3.2. Методы, основанные на использовании теплового действия электрического тока	Отчет по ЛР 3
			3.3. Обработка, основанная на использовании механического действия тока или электромагнитного поля	Отчет по ЛР 4
3.4. Комбинированные методы обработки	Конспект лекций			
4. Оборудование, инструмент, приспособления для ЭФХКО	4.1. Оборудование для электроэрозионной обработки 4.2. Генераторы импульсов 4.3. Регуляторы межэлектродного промежутка 4.4. Типовая структура оборудования для ЭХО	Конспект лекций		

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать: ОПК-1 - основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительных изделий требуемого качества;</p> <p>Уметь: ОПК-1 - разрабатывать процессы изготовления машиностроительных изделий требуемого качества;</p> <p>Владеть: ОПК-1 - навыками изготовления машиностроительных изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда.</p>	зачтено	<ul style="list-style-type: none"> - даны исчерпывающие и обоснованные ответы на все поставленные вопросы; - ответы изложены грамотно, уверенно, логично, последовательно; - опираясь на усвоенные знания, четко увязывает научные положения с практической деятельностью; - свободно владеет основными понятиями дисциплины.
	не зачтено	<ul style="list-style-type: none"> - допускает существенные ошибки и неточности при ответе на поставленные вопросы; - испытывает трудности в практическом применении полученных знаний; - не может аргументировать научные положения; - не владеет системой основных понятий дисциплины.

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств от 11 августа 2016 г № 1000

для набора 2015 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413,

для набора 2016 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» октября 2016 г. № 684,

для набора 2017 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» марта 2017 г. № 125,

для набора 2018 года и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. № 130.

Программу составил:

Попов В.Ю., доцент кафедры МиТ, канд. техн. наук. _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры МиТ от «11» декабря 2018 г., протокол № 6

И.о. заведующего кафедрой МиТ _____ Е.А. Слепенко

СОГЛАСОВАНО:

И.о. заведующего выпускающей кафедрой МиТ _____ Е.А. Слепенко

Директор библиотеки _____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета МФ от «14» декабря 2018 г., протокол № 4

Председатель методической комиссии факультета МФ _____ Г.Н. Плеханов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник учебно-методического управления _____ Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____