

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование кафедры)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Разработка конструкции и технологии изготовления инструмент – электрода
для электрохимического полирования рабочих поверхностей

Студент	<u>О.В.Авдеев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Н.М. Бобровский</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент Н.М. Бобровский _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« _____ » _____ 20 _____ Г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов. _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« _____ » _____ 20 _____ Г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.....	7
1.1 История развития метода ЭХО.....	7
1.2 Основные процессы электрохимической обработки.....	9
1.3 Классификация методов ЭХО.....	12
1.4 Кинематические схемы и особенности операций ЭХО.....	14
1.5 Особенности размерного электрохимического формообразования.....	25
1.6 Оборудование и устройства ЭХО.....	28
1.7 Литературно-патентный обзор. Постановка цели и задачи.....	32
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ЭХО.....	40
2.1 Расчет основных технологических показателей электрохимической обработки.....	40
2.2 Расчет напряжения.....	48
2.3 Расчет коэффициента выхода металла по току.....	50
2.4 Точность обработки.....	53
2.5 Качество обрабатываемой поверхности межэлектродный зазор.....	55
2.6 Подбор электролита. Гидродинамические процессы в межэлектродном зазоре..	64
2.7 Инструмент электрод для электрохимического полирования рабочих поверхностей.....	72

3. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОДА ИНСТРУМЕНТА И ПРЕСПОСОБЛЕНИЯ.....	80
3.1 Расчет собственных колебаний резонатора с помощью программы ANSYS.....	80
3.2 Конструкция установки для электрохимического полирования.....	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении электрохимическая обработка (ЭХО) относится к современным технологическим процессам обработки деталей и заготовок в химических растворах электролитах. Электрохимическая и электрофизическая обработка применяется для изготовления деталей, заточки режущего инструмента, формообразования сложно-профильных деталей, турбинных лопаток, изготовления деталей штампов и пресс – форм, обработки деталей из жаропрочных, хрупких и твердых сплавов и др. Методы электрохимической обработки могут быть различными: электрохимическая размерная обработка, электрохимическое полирование, шлифование, электрохимическая ультразвуковая обработка, анодно-механическая обработка и др. Электрохимическая обработка позволяет решать такие технологически трудные задачи, как обработка высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, хрупких, тонкостенных, нежестких деталей, склонных к образованию трещин в поверхностном слое.

Удаление материала заготовки, используя электрофизические и электрохимические методы в электролитах, дает множество преимуществ: отсутствие структурных изменений поверхностного слоя детали; отсутствие физического воздействия на деталь; хорошее качество поверхности обрабатываемой заготовки, и позволяет получить: шероховатость поверхности $Ra = 0,32$ мкм; отсутствие износа инструмента; возможность изготовления электрода-инструмента из различных токопроводящих материалов. Электрод инструменты изготавливают из легкообрабатываемых металлов, они имеют твердость и прочность значительно ниже, чем у материала детали. Применение процесса электрохимической обработки повышает износостойкость, коррозионную стойкость поверхности деталей. Однако электрофизические и электрохимические методы обработки дополняют существующие методы обработки резанием.

Одной из основных операций при изготовлении штампов можно назвать шлифование. При производстве штампов используют различные виды шлифования плоское, круглое (наружное, внутреннее), профильное шлифование. Пресс-формы и штампы изготавливают из твердого сплава, закалённой стали. Основной причиной

выхода из строя деталей штампа является наличие трещин, микротрещин и прожогов которые снижают прочность твердого сплава. Причиной возникновения трещин является перегрев поверхности штампа при шлифовании. Трещины на поверхности штампа приводят к усталостному разрушению и потере ударной вязкости. Для исключения операции предварительного шлифования появления трещин при шлифовании поверхности штампа в результате перегрева и получения требуемой шероховатости предлагается электрохимическая обработка (ЭХО) электрохимическое полирование, электрохимическое шлифование и т.д. При ЭХО исключается контакт электрода инструмента с обрабатываемой поверхностью. Металл, снимаемый с заготовки не налипает на инструмент исключается сильный нагрев из-за трения контактируемых поверхностей, что исключает прожоги. Электрохимическая обработка позволяет решать такие технологически трудные задачи, как обработка высокопрочных и труднообрабатываемых металлов, твердые сплавы, хрупкие, тонкостенные, нежесткие детали склонные к образованию трещин в поверхностном слое. Основным преимуществом ЭХО является отсутствие заусенцев, трещин и других дефектов которые присутствуют при обычном абразивном шлифовании [9].

В представленной работе представлена конструкция, предназначенная для обработки рабочих поверхностей штампа электрохимическим методом. В современном машиностроении постоянно повышаются требования к точности и качеству поверхности изготавливаемых больших габаритных штампов. На долю механической обработки лезвийным и абразивным инструментом приходится до 80% всего объема обрабатываемых деталей, получение высокой точности и качества поверхности требует значительных дополнительных затрат на проведение финишных отделочных операций. В таких случаях единственными методами могут быть электро-химические. Электрохимическая обработка нетрадиционный процесс обработки, материал удаляется механизмом анодного растворения предлагает нам альтернативу на ряду с традиционными методами обработки в создании точных трехмерных форм [40].

Преимущество последних, по сравнению с механическими, являются высокая

размерная и геометрическая точность (до 2 мкм), высокое качество обрабатываемой поверхности с шероховатостью (R_a до 0,02 мкм), отсутствие поверхностного дефектного слоя и остаточных напряжений на рабочих поверхностях штампов [3].

Повышение требований к точности и качеству штампов позволяет значительно увеличить силовые и температурные нагрузки при эксплуатации последних, повысить срок их службы и их конкурентоспособность.

Существуют и недостатки электрофизических и электрохимических методов обработки материалов, Это высокая энергоемкость процесса. Высокая коррозионная агрессивность применяемых электролитов в связи, с чем детали рабочей зоны станка и оснастка должны изготавливаться из нержавеющей стали.

1. Общие сведения по электрохимической обработке

1.1 История развития метода ЭХО

Первый способ, с которого берёт свое начало развитие процесса ЭХО, является электрохимическое полирование. Русскому химику Е. И. Шпитальскому в 1911 г был выдан первый патент на электрохимическое полирование металлов. Растворение материала анода осуществляется под действием электрического тока в тока проводящей среде электролите. В первую очередь растворяются выступающие участки поверхности, где плотность тока выше, что приводит к полированию поверхности заготовки. Реализация электрохимических методов обработки на практике началось с 30-х гг. 20 века. Советскими инженерами В.Н. Гусевым и Л.А. Рожковым предложен способ электрохимической размерной обработки, суть которого заключалась в анодном растворении материала заготовки при высоких плотностях тока в проточной среде электролита. Этот способ помог осуществить электрохимическую обработку станин крупных станков. Идея, предложенная В.Н. Гусевым и Л.А. Рожковым осуществление процесс ЭХО анодное растворение металла в межэлектродных малых зазорах с принудительной прокачкой электролита (А.С. № 28384 от 21.03.28г) способствовала рождению нового вида обработки — размерной электрохимической обработки (ЭХО).

В 1943 г инженеру В.Н. Гусевым и его сотрудникам Е.А. Дроздову, И.Я. Богораду предложен комбинированный метод электрохимической обработки, включающий в себя электрохимическое и электроэрозионное воздействие электрического тока на поверхность заготовки в среде электролита. В 1948г в лаборатории В.Н. Гусева была разработана электрохимическая установка, которая позволяла делать и обрабатывать отверстия в бронзовой стали. В этот период были предложены первые способы по обработке турбинных лопаток. Методы электрохимической обработки, предложенные В.Н. Гусевым (1904-1956 гг.), позволили найти основные закономерности управляемого электрохимического процесса создать и наладить производство и первые образцы промышленного

оборудования. По технологическому назначению процессы ЭХО подразделяют на две группы формообразующие и отделочные. В 1963г А.Н. Голдобиним, Ю.И. Коптеевым был предложен способ резания заготовок электродом проволокой. В 60-е началось производство станков для электрохимической обработки плоскошлифовальных, копировально – прошивных и др. Начался выход специализированной литературы и книг по электрофизическим и электрохимическим методам обработки. На многих предприятиях советских предприятиях по производству авиационных двигателей создаются участки, и цеха по электрохимической обработке на которые закупаются и устанавливаются специализированные станки для электрохимической обработки различного назначения. Разработкой станков предназначенных для электрохимической обработки занимаются во многих странах мира: США, Великобритании, Франции, Чехословакии, Японии (Mitsubishi Electric Co, HitachiLtd), Швейцарии (Chamilles). В 90-х годах получает развитие одна из разновидностей электрохимической обработки импульсная обработка в солевых водных растворах электролитов. Натрий азотнокислый NaNO_3 , калий азотнокислый KNO_3 , хлористый натрий NaCl и т.д. Использование солевых водных растворов электролита позволяет снизить погрешность обработки до 0,02...0,05 мм и улучшить шероховатость поверхности R_a 0,2...0,4 мкм. Появление в таких отраслях промышленности как приборостроении, медицине, авиастроении твердых, высокопрочных, наноматериалов повышение требований качеству поверхностного слоя и усложнением формы деталей возникла потребность в новых электрофизических и электрохимических методах обработки. Новые требования к качеству поверхности обрабатываемых деталей способствовало появлению нового метода ЭХО с применением вибрирующего инструмента электрода. Электрохимический процесс осуществляются на сверхмалых межэлектродных зазорах (3...10 мкм) с использованием тока высокой плотности ($10^2 \dots 10^4 \text{ A/cm}^2$). Что позволяет получить малые погрешности обработки в пределах (0,001..0,005 мм), шероховатость обрабатываемой поверхности в пределах (R_a 0,1..0,01 мкм). С 2003 года началось производство копировально - прошивных станков серии SFE-8000M, ET500,

ET3000, SFE-4000M , ET6000-3D (трёх координатный станок).

1.2 Основы процесса электрохимической обработки.

Электрохимические процессы обработки основаны на механизме анодного растворения материала. Это явление, основанное на способности растворения металлов в процессе окислительных реакций в среде электролита (электропроводного раствора) под действием электрического тока во время процесса электролиза. Процесс электролиза проходит между анодом и катодом в межэлектродном промежутке. Растворение металла происходит по первому закону Фарадея, по которому количество растворенного металла, прямо пропорционально силе тока прошедшего через электролит, определяется по формуле;

$$V=kit, \quad (1.1)$$

где k - электрохимический эквивалент, $\text{см}^3/\text{А мин}$; I – сила тока, А ; t – время электролиза, мин .

Объемный электрохимический эквивалент k можно определить, зная атомную массу и валентность вещества; эти величины, завися от природы растворяющегося металла, приведены в таблице 1[3].

Таблица 1 – Электрохимический эквивалент металлов

Наименование	Атомная масса	Валентность	Объемный электрохимический эквивалент K_v , $\text{см}^3/\text{А мин}$
Алюминий	26,98	3	0,0021
Железо	55,85	2	0,0022
		3	0,0015
Медь	63,57	1	0,0044
		2	0,0022
Никель	58,69	2	0,0021
		3	0,0014
Титан	47,9	4	0,0017
Хром	52,01	3	0,0015
		6	0,0008

Плотность тока от которой зависит объем растворенного материала заготовки определяется отношением силы тока I к площади S анода:

$$i=I/S, \quad (1.2)$$

где I – сила тока, А; S – площадь анода, см².

Выхода металла по току это коэффициента полезного действия электрохимического процесса. Этот коэффициент характеризует полезное использование электрического тока и определяется по формуле:

$$\eta = V_{\phi}/V, \quad (1.3)$$

где V_{ϕ} – фактический объем растворенного металла, см³; V - расчетный объем металла, см³. Используя первый закон Фарадея, учитывая коэффициента выхода металла по току η можно определить фактический объем растворенного металла:

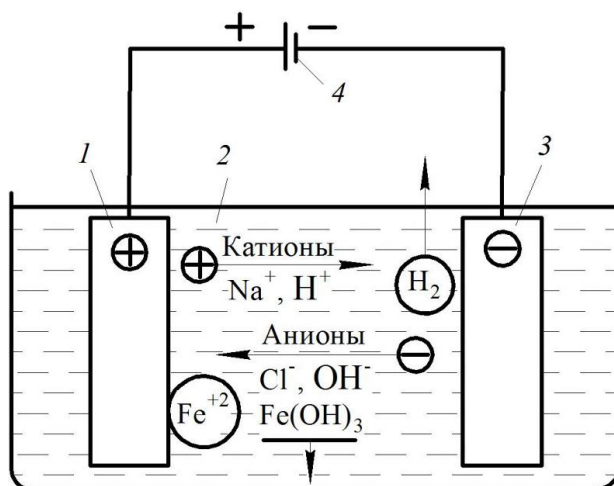
$$V_{\phi} = k I t \eta, \quad (1.4)$$

где k – объемный электрохимический эквивалент, см³/ А мин; I - сила тока, А; t – время, мин; η – коэффициент выхода по току.

Фактический объем растворенного металла V_{ϕ} всегда меньше расчетного V т.е. $\eta < 1$. Коэффициента выхода металла по току η от 0,5 до 1,0 характеризует активное анодное растворение материала. Коэффициент выхода металла по току $\eta < 0,5$ характеризует пассивное растворение материала.

Процесс электролиза сопровождается процессами окисления и восстановления поверхности электродов, которые погружены в раствор электролита и подсоединены к источникам питания. Заготовка (анод) присоединена положительному контакту источника питания. Инструмент электрод (катод) присоединен к отрицательному полюсу источника питания. В растворах электролитах молекулы вещества распадаются на положительные ионы (катионы) и на отрицательные ионы (анионы). Количество положительных и отрицательных зарядов переносимых ионами одинаково. В водном растворе электролита NaCl молекулы растворяются на положительные ионы натрия Na⁺ (катионы) и отрицательные ионы хлора Cl⁻ (анионы). Вода распадается на ионы водорода H⁺

(катионы) и гидроксила OH^- (анионы). На рис. 1. представлен процесс электролиза: Электроды погружены в водный раствор электролит, на электроды подается напряжение, начинается движение ионов в электролите. Катионы начинают перемещаться к катоду, а анионы перемещаются к аноду[3].



1 - заготовка (анод); 2 - электролит; 3 - электрод - инструмент (катод); 4 - источник питания

Рисунок 1 – Схема электролиза

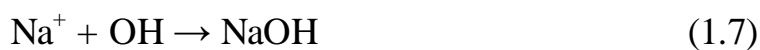
Процесс электролиза сопровождается процессами восстановления и окисления, при котором: Атомы железа Fe отдают электроны, переходят в раствор, где образуют ионы железа.

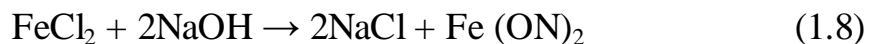


Находящиеся в водном растворе электролите ионы хлора Cl^- взаимодействуют с ионами железа Fe^{+2} , образуют хлористое железо.

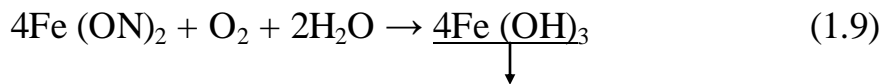


При взаимодействии ионов натрия и гидроксила образующаяся щелочь. Щелочь вступает в реакцию с хлористым железом, восстанавливая хлористый натрий и образуя гидроксид железа.





Гидроксид железа взаимодействует с кислородом, растворяется в воде плохо и выпадает в осадок.



Анионы водорода выделяются из раствора в виде пузырьков газа.



Достоинство процесса ЭХО заключается в том, что в процессе используются электролиты катионы, которые не оседают на поверхности катода, что обеспечивает отсутствие износа электрода инструмента [20].

1.3 Классификация методов электрохимической обработки

Электрофизические и электрохимические процессы обработки являются одними из основных процессов с уникальными возможностями обработки конструкционных материалов, которые проходят при протекании электрического тока в токопроводящих растворах электролитах. Электрохимическую обработку металлов можно разделить на три, основные варианта. К первому варианту относится электрофизическая обработка. Ко второму варианту относятся электрохимические методы обработки. К третьему варианту относятся комбинированные (гибридные) методы обработки, они представлены на схеме.

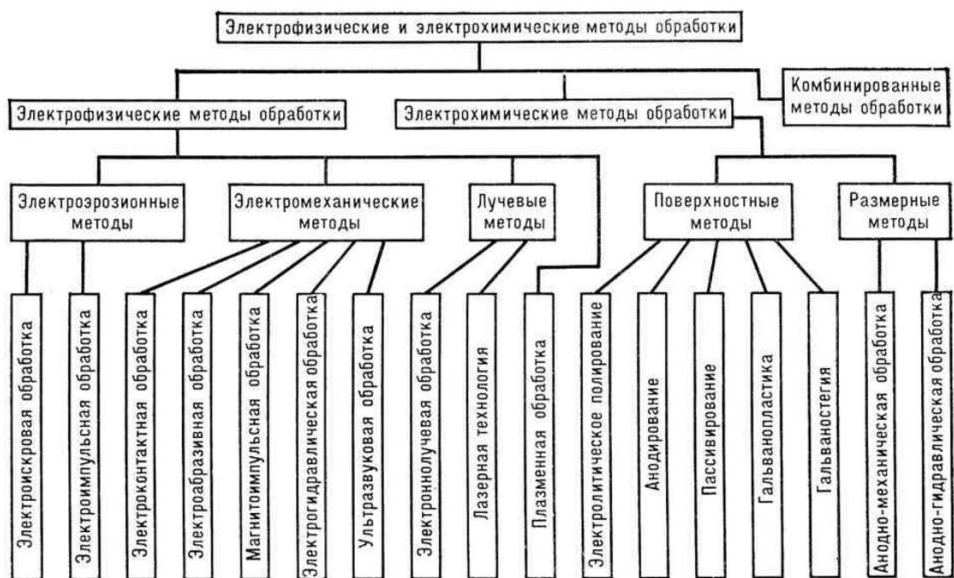


Рисунок 2 - Методы электрохимической обработки

Разновидности процесса ЭХО это нетрадиционные процессы, в котором материал удаляется механизмом анодного растворения поверхности обрабатываемого изделия или детали в токопроводящем растворе электролите, заключаются в удалении материала заготовки с изменением геометрии, шероховатости поверхности заготовки под действием электрического тока [4].



Рисунок 3 - Виды анодного растворения материала со съемом металла

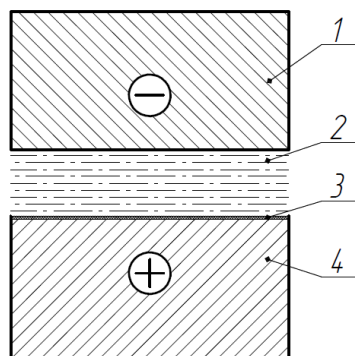
1.4 Кинематические схемы и особенности операций ЭХО.

В зависимости от физико-химических особенностей съема материала заготовки процессы ЭХО делятся на 2 группы. К первой группе относятся процессы ЭХО, в которых припуск удаляется за счет электрохимического растворения. Ко второй группе относятся разновидности ЭХО при выполнении которых вместе с электрохимическим растворением удаление припуска происходит за счет добавления в процесс ЭХО механического или электротермического воздействия. Процессы ЭХО основанные на растворении поверхности обрабатываемого материала осуществляются в проточном электролите при высоких плотностях тока или в стационарном электролите при невысоких плотностях тока.

В проточном электролите осуществляется такие разновидности электрохимической обработки как глянцевание и полирование труб, полирование проволоки, получение отверстий, профилирование поверхности сложной формы, разрезка, снятие заусенцев, маркирование и т.д.

В стационарном электролите осуществляют очистка и обезжиривание поверхности, маркирование, удаление припуска, скругление кромок, заострение лезвий, изготовление гравюр, изменение физико-технических свойств поверхности (удаление поверхностных напряжений после механической обработки, повышение частоты и коррозионной стойкости), полирование зубьев зубчатых колес и т.д.

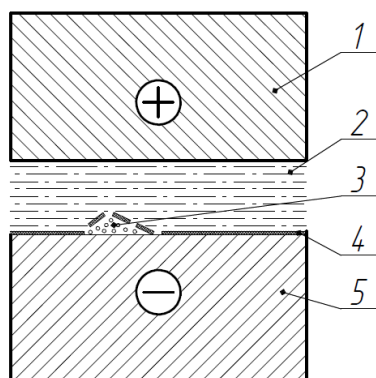
Она из разновидностей отделочных операций ЭХО является электрохимическое травление. Электрохимическое травление процесс ЭХО, который представляет собой растворение поверхности обрабатываемой заготовки удаления с обрабатываемой поверхности ржавчины, окисных пленок и т.д. образующихся, после проведения предварительной термической или химической обработки заготовки или деталей. Анодное электрохимическое травление используют для удаления тонких оксидных пленок, порядка нескольких микрон. Заготовку подключают к положительному полюсу источника питания. Процесс можно осуществлять в стационарном или проточном электролите. В процессе электролиза окисная пленка растворяется в электролите и удаляется с поверхности детали [3].



1 - электрод-катод; 2 – электролит; 3 – окисная пленка; 4 – заготовка анод

Рисунок 4 - Схема анодного электрохимического травления

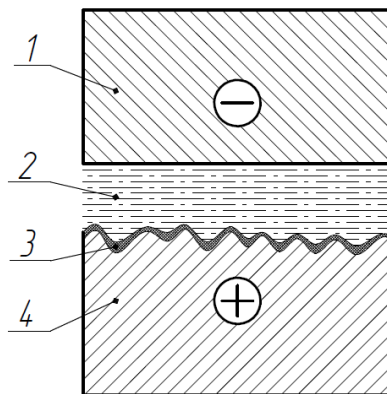
Для удаления оксидной пленки толщиной 0,3 – 0,5 мм применяют электрохимическое катодное травление. В этом случае заготовку подсоединяют к отрицательному полюсу источника питания. В процессе электролиза в местах разрывов оксидной пленки выходят пузырьки водорода, которые отделяют пленку от поверхности заготовки, очищая ее поверхность [3].



1 – электрод – анод; 2 – электролит; 3 – пузырьки водорода; 4 – окисная пленка; 5 – заготовка - катод

Рисунок 5 - Схема катодного электрохимического травления

Электрохимическое полирование анодное растворение, приводящее к значительному улучшению шероховатости поверхности детали. При подаче напряжения начинается процесс растворения поверхности заготовки.

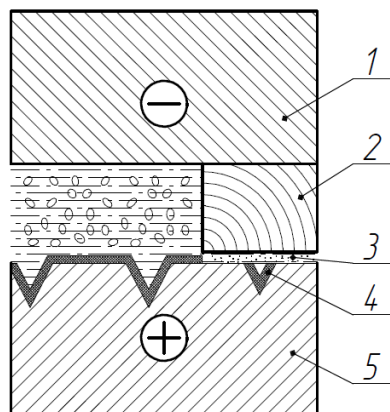


1 – электрод – инструмент; 2 – электролит; 3 – пленка; 4 – заготовка – анод

Рисунок 6 - Схема электрохимического полирования

Поверхностное растворение материала начинается с вершин микронеровностей, так как толщина оксидной пленки на вершинах меньше. Большая плотность тока интенсивнее растворяет вершины микронеровности. В результате высокой скорости растворения вершин микронеровности происходит сглаживание поверхности. В результате такой обработки снимается дефектный слой, образовавшийся после механической обработки. После электрохимического полирования появляется зеркальный блеск, повышается коррозионная стойкость в результате появления тонкой пассивной пленки на поверхности, изменяются многие физические свойства поверхности. Процесс электрохимического полирования можно проводить в проточном или стационарном электролите. Наилучший результат достигается при электрополировании однородных металлов и сплавов. Полирование легированных и труднообрабатываемых сплавов удаляет с поверхностно-напряжённые слои металла после механической обработки, повышает коррозионную стойкость и уменьшает шероховатость поверхности [3].

Разновидность электрохимического полирования является электрохимическое полирование в среде электролита содержащей абразивные зерна.

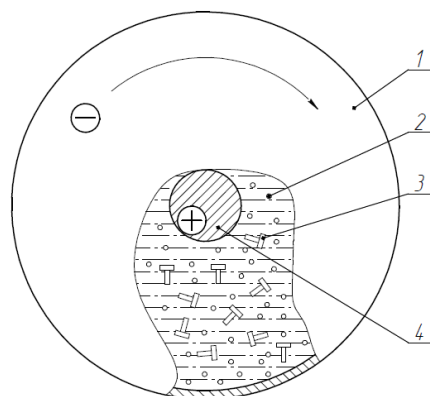


1 – электрод - инструмент; 2 – деревянный брусок; 3 – абразивные зерна; 4 – окисная пленка; 5 – деталь – анод

Рисунок 7 - Схема электрохимического полирования с абразивонесущим электролитом

При таком способе полирования используется диэлектрический материал брусок из дерева или другого непроводящего электрический ток материала, который перемещается в межэлектродном зазоре относительно обрабатываемой поверхности. Содержащий абразивные зерна электролит обновляется за счет движения электрода инструмента. Брусок прижимает абразивные зерна к обрабатываемой поверхности. Анодное растворение выступов микронеровности полируемой поверхности дополняется удалением с них пассивных пленок при помощи механического истирания их абразивными зернами [3].

Электрохимическое галтования применяется преимущественно для удаления заусенцев с наружных кромок заготовок, скругление острых кромок деталей без изменения их формы и размера. Процесс выполняется в токопроводящем растворе электролите с одновременным механическим воздействием на обрабатываемые поверхности детали абразивного материала.



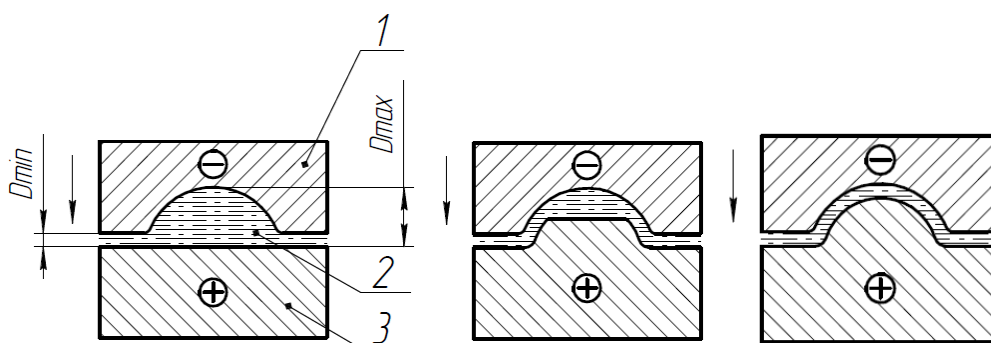
1 – барабан-катод; 2 – куски абразивного материала; 3 – металлические детали; 4 – стержень – анод

Рисунок 8 - Схема электрохимического галтования

Катод представляет собой барабан заполненный электролитом. Барабан заполняют абразивными материалами и деталями необходимыми для обработки. В качестве абразива можно использовать фарфоровые шарики, кусочки абразивных кругов и т.д. Анод представляет собой стержень, расположенный в центре барабана. Барабан медленно вращается, детали перемешиваются, на них воздействует электролит и абразивный материал. Детали, перемешиваясь в электролите, контактируют со стенками барабана катода или со стержнем анодом и получают положительную полярность при соединении с катодом или отрицательную полярность при соединении с катодом. На заусенцы и острые кромки обрабатываемых деталей интенсивно воздействует абразивный материал. Растворение металла на этих участках проходит быстрее [3].

Размерная электрохимическая обработка это процесс анодного растворения материала, который предназначен для изменения формы и геометрических размеров заготовки. Растворение токопроводящего материала при ЭХО происходит в среде проточного электролита, который удаляет продукты анодного растворения. Инструмент электрод (катод) находится на определенном расстоянии от заготовки (анод). Это расстояние называется межэлектродным зазором. Одной из особенностей процесса электрохимического формообразования является то, что электрод инструмент не изнашивается. От величины межэлектродного зазора расстояния между электродом инструментом и заготовкой зависит, какая будет

плотность (сила) тока, следовательно, процесс анодного растворения на разных участках межэлектродного зазора будет протекать с различной скоростью. Чем больше сила (плотность) тока тем выше скорость растворения тем интенсивнее удаляется металл с поверхности заготовки. На участках с расстоянием $a_{мин}$ между электродом инструментом и заготовкой плотность тока выше так как сопротивление столба электролита меньше. На участках с межэлектродным зазором равным $a_{макс}$ сила тока меньше так как возрастает сопротивление электролита. Поверхность заготовки более удаленная от электрода инструмента растворяется медленнее. В начальной стадии анодного растворения на участках с минимальным зазором процесс съема металла с заготовки идет интенсивнее, чем на участках с большим межэлектродным зазором.



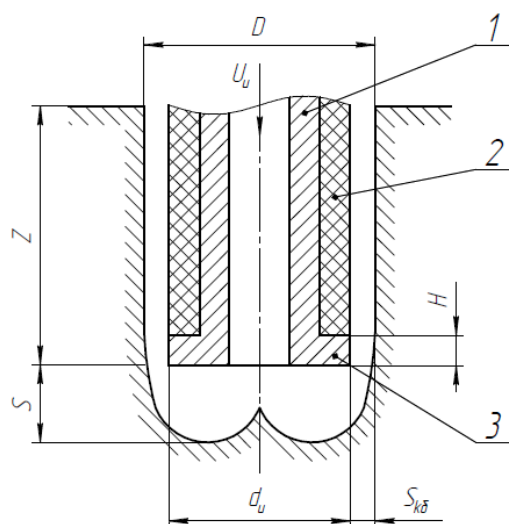
1 – электрод инструмент; 2 – электролит; 3 – заготовка-анод

Рисунок 9 - Схема размерной электрохимической обработки с одним перемещающимся электродом-инструментом

По мере анодного растворения материала заготовки и перемещения электрода инструмента зазоры между заготовкой и электродом инструментом выравниваются. По мере перемещения электрода инструмента происходит анодное растворение заготовки. Поверхность заготовки изменяется, и она приобретает форму поверхности, отображающую собой форму электрода инструмента [33].

Электрохимический метод обработки, предназначенный для получения глухих, сквозных отверстий, отверстий с криволинейной осью, отверстий геометрически сложной формы называется прошиванием. Электрохимическое прошивание выполняют в деталях, изготовленных из высокотвердых и

сверхтвердых материалов и сплавов. Электрод инструмент представляет собой полую деталь, через которую прокачивают электролит. Электрод инструмент совершает поступательное движение. Скорость движения инструмента равно скорости растворения материала заготовки. Форма сечения отверстия определяется профилем электрода инструмента. Диаметры отверстия могут быть любыми и определяются размерами инструмента. Электрод инструмент для прошивания изготавливают в виде цилиндрической трубки 1, электролит подается под давлением в полость электрода инструмента, для направленного съема металла нерабочие части электрода инструмента изолируют эпоксидной смолой или другим изоляционным материалом 2, чтобы исключить отслоение изоляции под действием потока электролита на торце электрода инструмента предусмотрен буртик 3. Если отверстие имеет круглое сечение электроду-инструменту можно предать вращение, что позволяет повысить точность и качество обрабатываемой поверхности [1].



1 – электрод инструмент; 2 – изолирующее покрытие; 3 – буртик

Рисунок 10 - Схема прошивания

Для получения отверстия диаметром D необходимо найти d_u . Учитывая съем металла с боковых поверхностей отверстия буртиком 3, диаметр электрода инструмента можно найти по формуле

$$d_u = D - 2y, \quad (1.11)$$

где y - съем металла с боковых поверхностей. Он равен изменению бокового

зазора за время прохождения каждого сечения отверстия буртом: $y = S_{к.б} - S_{об}$ отсюда

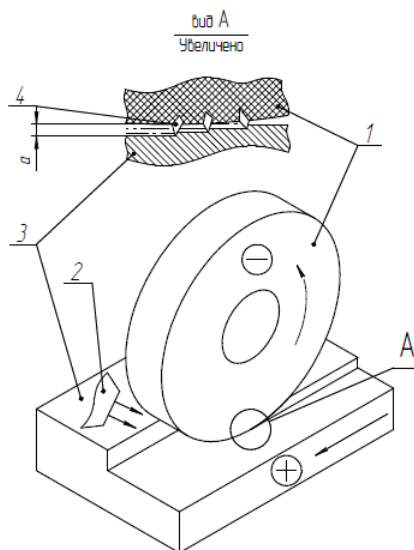
$$S_{к.б} = \sqrt{2\eta\epsilon x Ut/p} + S_{об}^2, \quad (1.12)$$

где η – выход по току; ϵ – электрохимический эквивалент материала заготовки; x – удельная проводимость электролита; U – напряжение на электродах, В; p – плотность продуктов обработки; t – время прохождения тока.

Время воздействия бурта на боковую поверхность равно отношению его высоты H к скорости подачи инструмента $v_{и}(t = H/v_{и})$

$$d_u = D - 2 \sqrt{2\eta\epsilon x U H t / (p v)} + S^2 + 2S, \quad (1.13)$$

Электроабразивная обработка это способ, основанный на удалении металла с поверхности заготовки с совмещением электрохимического растворения и механического воздействия инструмента создаваемого частицами абразива на обрабатываемую поверхность. Электродом инструментом служит токопроводящий круг катод 1 который вращается с большой окружной скоростью и совершает движение подачи в направлении обрабатываемой поверхности. Через сопло 2 падают электролит в рабочую зону резания, т.е. в межэлектродный зазор a . Прохождение электрического тока через электролит запускает процесс анодного растворения материала заготовки. Соприкосновение абразивных зерен 4 с поверхностью заготовки 3 создает процесс электроэрозии. Абразивные зерна механически снимают материал с поверхности заготовки и способствуют подачи в межэлектродный зазор электролита. В точке соприкосновения инструмента электрода и поверхности заготовки происходит разогрев металла, и он размягчается. Продукты анодного растворения удаляются абразивными зернами за счет вращательного движения электрода инструмента и движению подачи заготовки [3].



1 – абразивный круг-катод; 2 – сопло; 3 – заготовка; 4 – абразивные зерна

Рисунок 11 - Схема электроабразивного шлифования

Электроэрозионная обработка основана на явлении эрозии (разрешения) электродов (электрода инструмента и заготовки) при пропускании между ними электрического тока. Процесс эрозии между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектродного зазора диэлектрической жидкостью. В качестве диэлектрической жидкости используют керосин, дизельное топливо, машинное масло и т.д. Электрод инструмент служит для подведения импульсов напряжения к участкам обрабатываемой поверхности. Нам электрод инструмент и обрабатываемую деталь подается напряжение в результате в межэлектродном зазоре, заполненном диэлектрической жидкостью возникает электрическое поле. Максимальное напряжение $U_{им}$ электрического пробоя подбирают равным напряжению электрического пробоя $U_{пр}$ при котором происходит электрический пробой раствора и зависит от величины межэлектродного зазора $a_{пр}$. Наибольшее напряжение возникает между близкими друг от друга микронеровностями на поверхности электрода инструмента и заготовки. При возрастании напряжения от 0 до $U_{пр}$ происходит электрохимическая размерная обработка период времени τ_1 на графике. Когда напряжение достигнет $U_{пр}$ происходит электрический пробой межэлектродного зазора и образуется канал электрического импульсного разряда [3].

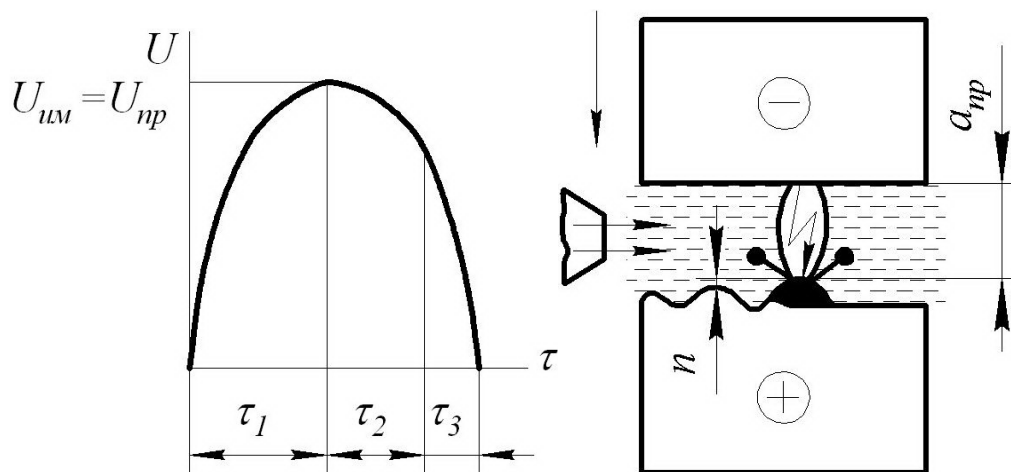


Рисунок 12 - Схема эрозионного разрушения металла при ЭХО

Рисунок 13 - График зависимость напряжения U от времени τ электроэрозионной обработки

Результатом пробоя и образования импульсного разряда является разрушение металла поверхности электродов и на обрабатываемой поверхности образуется лунка. В результате разряда и образования газового пузыря капли металла выбрасываются и застывают в виде мелких частиц в диэлектрической жидкости межэлектродного зазора. Следующий пробой межэлектродного зазора произойдет там, где расстояние между электродами наименьшее. Процесс эрозии будет проходить до тех пор, пока не будет удален весь металл на расстоянии между электродами, при котором возможен электрический пробой межэлектродного зазора. Для возобновления разрядов электроды надо сблизить, на расстояние где возможен межэлектродный пробой. Участки, не подвергнутые эрозионному разрушению, формообразование заготовки происходит за счет анодного растворения. В процессе электроэрозионной обработки сочетаются два процесса это электрофизический процесс (эрозия) и электрохимический процесс (анодное растворение) формообразования, приводящие к разрушению металла и формообразованию поверхности обрабатываемой заготовки [34].

В начальный момент электрохимической обработки межэлектродный зазор зависит от неровностей поверхности обрабатываемой заготовки, там, где межэлектродный зазор меньше плотность тока выше скорость съема материала заготовки больше. Процесс анодного растворения на различных участках

межэлектродного зазора проходит с различной скоростью. От этого зависит точность копирования электрода инструмента.

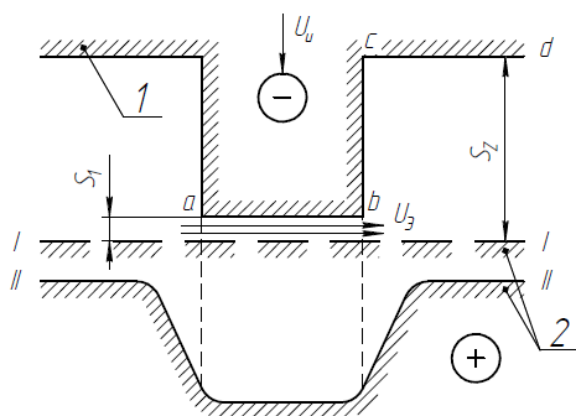


Рисунок 14 - Копирование электрода инструмента на заготовке

Первоначальная граница заготовки занимает положение 1-1. Поверхность электрода инструмента ab находится на расстоянии s_1 от заготовки. Для сохранения межэлектродного зазора s_1 постоянным, электрод инструмент перемещается со скоростью $v_{и}$ в направлении к заготовке. При условии, что подача инструмента $v_{и}$ равна скорости растворения анодного растворения, то межэлектродный зазор s_1 остается постоянным. Через межэлектродный промежуток прокачивается электролит со скоростью $v_э$. При условии, что на протяжении всего межэлектродного зазора показатели: напряжение, выход по току, удельную проводимость электролита принимаем постоянными, то скорость анодного растворения на участках ab и cd можно найти по формуле:

$$v_{ab} = \frac{\eta \varepsilon \chi U}{\rho S_1} ; \quad v_{cd} = \frac{\eta \varepsilon \chi U}{\rho S_2} \quad (1.14)$$

где η – выход по току; ε - электрохимический эквивалент материала заготовки; χ – удельная проводимость электролита; U – напряжение на электродах; ρ – плотность продуктов обработки.

Введем поправочный коэффициент $K = \eta \varepsilon \chi U / \rho$. Скорость анодного растворения на участках ab и cd зависит от размеров межэлектродных зазоров между поверхностью заготовки и поверхностью электрода инструмента:

$$v_{ab} = \frac{K}{s_1}; \quad (1.15)$$

Так как поверхность электрода инструмента ab находится на расстоянии s_1 от заготовки, а поверхность электрода инструмента cd находится на расстоянии s_2 т.е. $s_1 < s_2$ значит, скорость анодного растворения на участках ab будет больше, чем на участке cd в s_1/s_2 раз,

$$\frac{v_{ab}}{v_{cd}} = \frac{s_2}{s_1} \quad (1.16)$$

По мере растворения металла заготовки и перемещение электрода инструмента зазор s_2 уменьшается, но остается справедливым условие $s_2 > s_1$ сьем металла под выступом идет быстрее. На поверхности заготовки получится углубление 2-2. Форма электрода инструмента отобразилась на аноде и достигнута размерная обработка[3].

1.5 Особенности размерного электрохимического формообразования.

Методы ЭХО характеризуются рядом особенностей, выгодно отличающих их от других методов обработки материалов:

- возможность получения заготовок и деталей из труднообрабатываемых другим способом металлических материалов. Практическая независимость скорости, качества, и производительности обработки от физико-химических свойств обрабатываемого материала. Возможность обработки материалов с любыми механическими свойствами без приложения значительных механических усилий;
- возможность формообразования сложно профильных поверхностей;
- высокая стойкость электрода-инструмента;
- отсутствие износа электрода-инструмента, необходимости в специальных инструментах более твердых, чем обрабатываемый материал. При электрофизических и электрохимических методах давление инструмента на обрабатываемую деталь практически отсутствует или оно незначительно. В большинстве процессов обработки наличие зазора между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью является обязательным условием.

- значительное сокращение расходов материалов при обработке таких материалов как германий, кремний, рубин, кварц, алмаз и другие монокристаллы. С использованием ЭХО значительно сокращается необходимость в абразивах, алмазах, твердых сплавах, инструментальных сталях и др.
- повышаются чистота поверхности и точность обработки. Высокая точность изготовления деталей даже в тех случаях, когда механическая обработка невозможна или трудновыполнима. Точность обработки деталей в пределах 2-5_{мкм} механической обработкой сопряжено с большими трудностями, а использование методов ЭХО позволяет с успехом решить такую задачу.
- выполнение ряда операций не выполнимых механическим методом. Относительная не сложность технологии. Особенно целесообразно использование методов ЭХО, например, при таких операциях трудно осуществимых механическим путем как обработка отверстий и полостей в труднодоступных местах или на большой глубине. Возможность обработки сразу всей обрабатываемой поверхности путём получения отпечатка, копирующего форму инструмента.
- возможность местной обработки изделий больших габаритов без специальных крупных станков. Сокращение числа переходов при обработке изделий сложной формы.
- возможность полной механизации и автоматизации. Электрофизические и электрохимические методы благодаря своим особенностям являются весьма гибкими, позволяющими автоматизировать и механизировать технологические процессы более простыми средствами, чем при механической обработке,
- высокая производительность и экономическая эффективность. Трудоемкость обработки снижается, повышается качество обрабатываемой поверхности. Интенсификация обычных методов механической обработки. В обычных процессах механической обработки с использованием инструментов для резки и формовки получены технологические параметры близкие к предельно возможным. Электрохимическая обработка предлагает условия, которые могут улучшить параметры обработки. Традиционные методы обработки, совмещенные с анодным растворением металлов, ускоряют процессы формообразования. Формообразование

поверхности ковочных штампов происходит в минутах, а не в часах как при обычной механической обработке. Чистота поверхности находится в диапазоне 8 – 9 качества [4].

Таблица 2 – Технологические особенности операций ЭХО

Технологические особенности операций ЭХО	
Операции	Особенности
Заготовительные (не требующие особо высокой точности и качества обработки)	Высокая анодная плотность тока; высокая скорость перемещения или вращения электрода инструмента; интенсивное обновление электролита в зоне обработки.
Формообразующие (требующие относительно высоких точности и качества обработки)	Высокая анодная плотность тока; небольшая скорость перемещения или вращения электрода инструмента; интенсивное обновление электролита в зоне обработки.
Отделочные (требующие высокого качества обработки)	Низкая анодная плотность тока; электрод инструмент и заготовка либо неподвижны, либо перемещаются с небольшой скоростью; незначительное обновление электролита в зоне обработки

Преимущества ЭХО достигается только при определенных значениях следующих технологических параметров: напряжение на электродах, анодная плотность тока, скорость прокачки электролита, окружной скорости электрода инструмента или заготовки. Для каждой группы операций ЭХО значения этих параметров устанавливают в зависимости от физико-химических свойств обрабатываемого материала, требующих точности и качества обрабатываемой поверхности [2].

Таблица 3 - Технологические режимы операций ЭХО

Операция	Напряжение U , В	Плотность тока i , A/cm^2	Окружная скорость вращения электрода инструмента v , м/с	Скорость прокачки электролита $v_э$, м/с	Количество электролита поступающего в электролизе Q эл/мин	Межэлектродный промежуток a , мм
Электрохимическая резка	10-12	80-100	25-28		2-3	0,01-0,02
Анодно-механическая резка	17-28	50-150	16-20		10-15	0-0,1
ЭХО наружных поверхностей	8-20	2-50		1-20		0,02-0,8

Продолжение таблицы 3

Операция	Напряжени е U , В	Плотнос ть тока i , A/cm^2	Окружная скорость вращения электрода инструмен та v , м/с	Скорость прокачки электроли та $v_э$, м/с	Количество электролита поступающе го в электролизе р $Q_{эл}/мин$	Межэлектродн ый промежуток a , мм
ЭХО внутренних поверхностей	8-20	4-80		1-30		0,02-0,4
ЭХО отверстий	10-24	20-250		6-60		0,02-0,2
Электрохимичес кое скругление кромки	10-20	5-10		1-2		0,3-0,5
Электрохимичес кое маркирование	6-9	8-10		Поверхность детали смачивают электролитом		0,01-0,02
Электрохимичес кое шлифование абразивным кругом	6-8	70-100	25-30		10-25	0,01-0,05
Электроэрозийно- химическая обработка отверстий	17-36	100-800		10-20		0,02-0,1
Электрохимичес кое травление	3-12	0,05-0,2		0-0,1		100 и более
Электрохимичес кое полирование	4-24	0,05-0,6		0-0,1		2-100 и более
Электрохимичес кое абразивное полирование	6-18	0,5-1	2-5		5-10	10-50
Электрохимичес кое супер финиширование	12-18	0,5-1	1000-2000 колебаний		2-10	2-3
Электрохимичес кая жидкостно- абразивная обработка	20-25		0,1-0,2		10-15	Более 100

1.6 Оборудование и устройства для электрохимической обработки.

Оборудование для электрохимической обработки включает в себя станок и вспомогательное оборудование. Станки для электрохимической обработки по назначению делятся на три группы универсальные, специализированные, и специальные. Универсальные станки выпускаются серийно и имеют широкие

технологические возможности, служат для обработки деталей различного типоразмера при большом количестве переналадок оборудования. Специализированные и специальные станки не имеют таких технологических возможностей как универсальные, предназначены для обработки деталей определенной формы и типоразмера при минимальных переналадках оборудования, поэтому применяются в массовом и серийном производстве. Оборудование для ЭХО состоит из источника технологического тока, электропривода подачи электрода инструмента, насоса для подачи электролита в рабочую зону станка, устройства для очистки электролита (центрифуги, баки отстойники, фильтры), устройства для автоматической регулировки межэлектродного зазора, холодильной установки для охлаждения электролита. По компоновке рабочих узлов станки делятся на две группы консольные и порталные. Кинематика перемещения электрода инструмента и заготовки выполняется без перемещения электрода инструмента и заготовки, с перемещением электрода инструмента и заготовки, с вращением и перемещением электрода инструмента. В таблице 4 приведены некоторые модели универсальных станков [3].

Таблица 4 – Технические характеристики станков

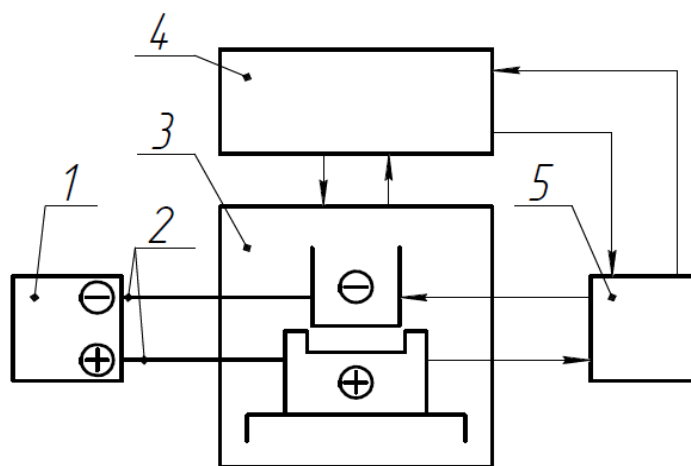
Модель	Наименование	Максимальные параметры обрабатываемых заготовок		Максимальная производительность <i>мм³ / мин</i>	Напряжение на электродах, <i>В</i>	Сила тока, <i>А</i>	Основное назначение
		размер, <i>мм</i>	масса, <i>кг</i>				
3622Э	Станок электрохимический заточной	Высота резцов до 32 мм		400	6	100	Заточка резцов по задним и передним поверхностям
3Э110М	Станок электрохимический круглошлифовальный	Ø 140x200 (отверстия Ø 25)	9	1 000	2 - 12	630	Обработка наружных и внутренних тел вращения

Продолжение таблицы 4

Модель	Наименование	Максимальные параметры обрабатываемых заготовок		Максимальная производительность	Напряжение на электродах, В	Сила тока, А	Основное назначение
		размер, мм	масса, кг	мм ³ / мин			
СП-101	Станок электрохимический внутришлифовальный высокой точности	Ø 250x110	10	200	2 - 12	630	Обработка внутренних поверхностей
3672	Станок электрохимический заточной	Ø 250x450	200	400	2 - 12	400	Заточка режущего инструмента с пластинами из твердого сплава по задним и передним поверхностям
3626Э	Станок электрохимический заточной	Высота резцов до 50 мм		500	6	320	Заточка резцов по передним поверхностям в автоматическом цикле.
4405	Станок электрохимический для удаления заусенцев	50		Время обработки 15-60 с	до 24	500	Удаление заусенцев притупление острых кромок калибровка.
4406		125				1 000	
4407		320					
4401	Станок электрохимический маркировочный	100x200 x300	48	Время маркировки 1-6 с	6-22	2 000	Нанесение маркировки без трафаретным способом (до 20 знаков одновременно)

Структурная схема установки для ЭХО состоит: Источником питания 1 который преобразует переменный трех фазный ток в постоянный соединен со

станком 3 через тока провод 2. Электролитный блок 5 обеспечивает нагнетание и очистку электролита; состоит из нескольких отдельных устройств, центрифуги, которая производит удаление шлама, насоса для прокачивания электролита в межэлектродный зазор, теплообменники обеспечивающие управление рабочей температуры электролита. Конструкция станка включает в себя контрольно – измерительное устройство 4, которое обеспечивает контроль, управление и регулирование параметров ЭХО и межэлектродный зазор [3].



1 – источник питания; 2 – токопровод; 3 – станок; 4 – система контроля, управления и регулирования параметров обработки; 5- система подачи; очистки регулирования параметров электролита

Рисунок 15 - Структурная схема средств технологического оснащения ЭХО

Станки с С-образной формой имеют литую или сварную форму станины. Подача электрода инструмента осуществляется в вертикальном направлении. На точность и производительность влияет конструкция станины. Конструкции электрохимических станков с П-образной станиной, обладают жесткой механической системой и создают условия для более точного формообразования и высокой производительности и отличаются меньшими габаритными размерами. Станки с двумя перемещающимися электродами-инструментами или с перемещающейся в процессе обработки заготовкой имеют наиболее часто горизонтальную компоновку подвижных элементов [3].

Управление станком осуществляется со стационарного пульта. У станков большими габаритными размерами кроме стационарного управления предусмотрен

переносной пульт, на котором дублируются необходимые приборы и кнопки управления.

Для исключения коррозии основные элементы конструкции станков изготовлены из коррозионностойких сталей и сплавов, а так же стойких к кислотам и щелочам неметаллических материалов (пластмассы, бетона и др.). Ответственные детали изготавливают из цветных металлов например токоведущие детали из бронзы. В конструкцию станка входят такие материалы как стеклопластик, обладающий высокими диэлектрическими свойствами. Из таких материалов изготавливают баки, резервуары для электролитов, трубопроводы, крыльчатки насосов и другие детали. Станки для ЭХО оснащаются автоматическими системами регулирования температуры электролита и водородного показателя рН, системами регулирования скорости подачи электрода инструмента [3].

1.7 Литературно - патентный обзор методов ЭХО. Постановка цели и задачи.

Электрохимические и электрофизические процессы анодного растворения материалов заготовки и связанные с ними гибридные процессы характеризуют собой нетрадиционные методы обработки: электрохимические, анодно-механические, электроэрозионные, плазменные, ультразвуковые и др. основным преимуществом которых является использование электрической энергии и химического процесса электролиза в роли инструмента. По технологическому назначению процессы ЭХО подразделяют на две группы отделочные и формообразующие.

В современном машиностроении постоянно повышаются требования к точности и качеству поверхности изготавливаемых больших габаритных штампов. На долю механической обработки лезвийным и абразивным инструментом приходится до 80% всего объема обрабатываемых деталей, получение высокой точности и качества поверхности требует значительных дополнительных затрат на проведение финишных отделочных операций. В таких случаях единственными методами могут быть электро-химические [1].

Преимущество последних, по сравнению с механическими, являются высокая

размерная и геометрическая точность (до 2 мкм), высокое качество обрабатываемой поверхности с шероховатостью (R_a до 0,02 мкм), отсутствие поверхностного дефектного слоя и остаточных напряжений на рабочих поверхностях штампов [3].

Повышение требований к точности и качеству штампов позволяет значительно увеличить силовые и температурные нагрузки при эксплуатации последних, повысить срок их службы и их конкурентоспособность.

Предлагаемая разработка установки для ЭХО обработки штампов, имеющие поверхности сложными формы и оснащенная системой автоматического управления включает в себя инструмент-электрод, оснащенный линейным электроприводом, датчиками контроля контакта и межэлектродного зазора (МЭЗ) и тремя контурами управления.

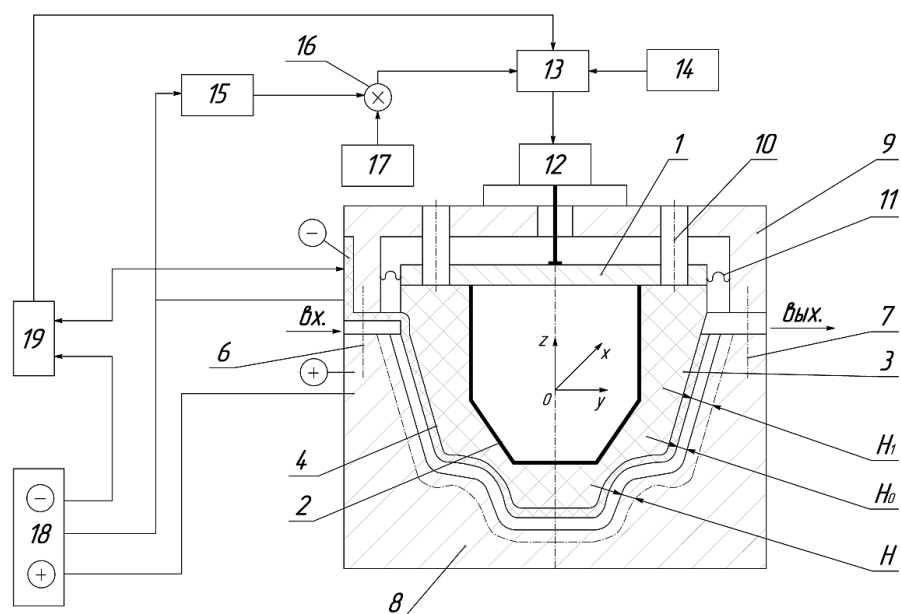


Рисунок 16 - Общий вид установки

Особенность разработки инструмента-электрода [2] состоит в том, что он включает в себя пластину 1 (рис.16) на которой вертикально крепится короб, к нему крепится модель, изготовленная из неметаллического отвердевшего материала, стойкого к воздействию электролита, на наружной поверхности, которого смонтирована металлическая безычеистая сетка, подключенная к источнику питания.

Заготовка корпуса штампа является моделью по поверхности, которой

изготавливается модель инструмента с учетом диаметра проволоки сетки и величины зазора предназначенного для прокачки электролита.

Установка функционирует следующим образом. На поверхности модели 3 закреплена сетка 4. Пластина 1 с моделью 3, устанавливается на торце заготовки 8. С помощью крепежных винтов 7 и штифтов 6 обеспечивает центровку корпуса 9 относительно заготовки 8.

На поверхность заготовки 8 наносят тонким слоем силиконовую жидкость. Для модели 3 заготовка 8 является мастер моделью. Объем между поверхностью заготовки 8 и пластиной 1 на которой крепиться пустотелый кожух 2 заполняют неэлектропроводящим материалом, эпоксидной смолой или другим материалом, стойким к воздействию электролита.

В процессе затвердевания пластина 1, модель 3 и пустотелый кожух 2 представляют собой единый инструмент-электрод, геометрически сложная поверхность электрода-инструмента обрабатывается на фрезерном станке. Припуск, снимаемый с поверхности электрода инструмента равен величине $H_1 = H_0 + H$, который включает зазор H предназначенный для прокачки электролита процесса электрохимического полирования (0,2...2 мм), и величину H_0 равную диаметру проволоки сетки (1,5...1мм).

Поверхность электрода инструмента покрывает проволока сетка, в качестве материала для ее изготовления выбирают коррозионностойкую сталь, медь, и т.д. сетка изготавливается с учетом объемной конфигурации обрабатываемой полости. На пластине 1 симметрично вертикальной оси корпуса 2 закреплены две скалки 10 по которым перемещается электрод-инструмент относительно корпуса 9. Электрод инструмент крепится с помощью винтов 6 и заготовки штампа 8.

В зазор между пластиной 1 и корпусом 9 вмонтировано одно гофрированное уплотнение 11. Система автоматического управления содержит линейный электропривод 12 жестко соединенный с инструментом-электродом, который управляется блоком управления 13. Величина (МЭЗ) задается датчиком 14. Межэлектродный зазор контролируется датчиком постоянного тока 15, который своим выходом подключен к входу сравнивающего элемента 16, на вход которого

подключен источник эталонного питания. Источник питания 18 соединен с катодом со знаком минус (металлическая сетка) и с анодом (заготовка 8) со знаком плюс. Первый вход датчика контактов 19 подключен к сетке 4, а второй к заготовке 8.

Разработанная схема для электрохимической обработки работает следующим образом. К заготовке 8 подводят электрод-инструмент который жестко закреплен на роторе линейного электропривода 12 и перемещается от блока управления 13 до контакта с заготовкой, причем момент контакта контролируется датчиком контакта 15. Выход, которого подключен к выходу блока управления 13. Датчиком 19 контролируется момент контакта электрода инструмента и заготовки 8. В результате взаимного контакта инструмента и заготовки происходит замыкание электрической цепи. Точкой отсчета для выставления требуемого межэлектродного зазора является момент контакта электрода инструмента и заготовки. С участием линейного электропривода 12 электрод-инструмент отходит от заготовки на величину межэлектродного зазора H заданный датчиком 14. После этого начинается подача электролита (на рисунке показана условно) с требуемой скоростью. Своим выходом источник постоянного тока 18 подключен к заготовке 8 (анод) со знаком плюс и инструмент-электрод со знаком минус поддерживает заданный режим ЭХО по току и напряжению.

Датчик потери постоянного тока 15 подключен к цепи источника питания 18. На вход сравнительного элемента 16 подключен выход источника эталонного питания постоянного тока 17 и выход датчика потери постоянного тока 15.

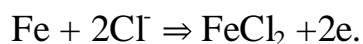
Система автоматически контролирует размер межэлектродного зазора и величину анодного растворения поверхности заготовки. С увеличением межэлектродного зазора между инструментом электродом и заготовкой равной толщине удаленного материала заготовки ток потребления падает.

Возьмем в качестве электролита водный раствор (NaCl), при растворении которого в воде образуются отрицательные ионы (анионы) хлора Cl^- и положительные ионы (катионы) Na^+ . Если инструмент-электрод и обрабатываемую деталь поместить в электролит и включить электрический ток в электролите начинается движение ионов и происходит химическая реакция. На аноде

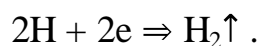
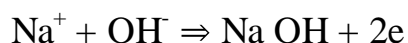
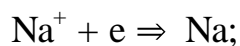
происходит окисление металла, т.е. начинается процесс анодного растворения. Вода частично распадается (диссоциирует) на компоненты ионы водорода и ионы гидроксильной группы:



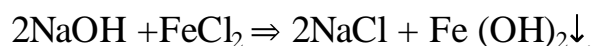
Анионы хлора движутся к детали аноду и соединяются с железом, образуя растворимый в воде хлорид железа:



Катионы натрия направляются к катоду, получают недостающие электроны и образуют металлический натрий. Металлический натрий в ходе электрохимического процесса реагирует с водой, образуя газообразный водород и растворимый гидроксид натрия:



Вступая в воде в химическую реакцию, хлорид железа и гидроксид натрия образуют нерастворимый гидроксид железа и растворимую поваренную соль. Нерастворимый гидроксид железа выпадает в осадок и больше в реакциях не участвует:



Характер неровностей размер шероховатости зависит от структуры материала заготовки, способа снятия припуска при механической обработке токарное точение, фрезерование, сверление и т.д. при подаче тока процесс формирования микрорельефа поверхности начинается с выступов шероховатости. Под воздействием электрохимического процесса шероховатость обрабатываемой поверхности снижается. Межэлектродный зазор между электродом инструментом и обрабатываемой поверхностью остается постоянным напряжением остается одинаковым по всей длине межэлектродного зазора, скорость электрохимического полирования протекает равномерно по всей поверхности. Для поддержания равномерной скорости съема металла с заготовки и выноса продуктов обработки из

межэлектродного промежутка необходимо электролит прокачивать. Для уменьшения скорости образования коррозии и повышение степени защиты обрабатываемых деталей в электролит добавляют ингибиторы коррозии. Инструмент-электрод после завершения процесса полирования извлекают из заготовки 8, снимают со штифтов 7 и полированную поверхность заготовки промывают водой. Установка, для ЭХО оснащенная системой автоматического управления стабилизации МЭЗ и контролю величины перемещения инструмента-электрода позволяет повысить точность формы и качество обрабатываемой поверхности больших габаритных штампов сложной пространственной формы за счет бесконтактного контроля и управления МЭЗ. Одновременно устранит концентраторы напряжения, которые остаются после механической обработки.

Известно устройство, которое предназначено для электрохимического процесса растворения (полирования) металлов и содержит электрод-инструмент, в конструкцию которого входит корпус с отверстиями, стержневые электроды подключены к проводам, имеют свободную степень подвижности, т.е. свободно перемещаться вдоль своей оси и поверхности разрезных втулок для позиционирования по обрабатываемой поверхности. Отверстия в корпусе находятся на одинаковом расстоянии равным друг от друга. Внутри корпуса расположены разрезные втулки. [А.с. СССР № 1710239, кл. В23Н 7/22. 1992] [6].

Приведенный аналог имеет недостаток. В процессе позиционирования стержневых электродов вдоль обрабатываемой поверхности образованная ими поверхность не имеет жесткой фиксации, так как в конструкцию приведенного аналога не входят устройства для фиксации стержневых электродов. В процессе движения электрода-инструмента стержневые электроды имеют подвижность и будут свободно перемещаться.

Перемещаясь вдоль разрезных втулок между стержневыми электродами и обрабатываемой поверхностью не будет обеспечиваться равномерный зазор который необходим для реализации качественного процесса электрохимического полирования.

Известно устройство, в конструкцию которого входит корпус, который

образует полость. В корпусе просверлены отверстия на одинаковом расстоянии друг от друга, т.е. имеют равный шаг. Внутри конструкции корпуса расположены разрезные втулки со стержневыми электродами. Стержневые электроды могут свободно перемещаться вдоль оси разрезных втулок для позиционирования, вдоль обрабатываемой поверхности детали. Стержневые электроды подключены к электрическим проводам. Пустота корпуса заполнена специальным материалом гидропластом. На гидропласт воздействует зажимной винт, расположенный в стенке корпуса. Разрезной винт действует на гидропласт обжимает разрезные втулки, фиксирует стержневые электроды, которые образуют поверхность ответную к обрабатываемой поверхности. [Патент РФ № 2338013, кл. C25F 7/00. 2008] [8].

Приведенный аналог имеет недостаток. Процесс электрохимического полирования происходит по двум координатам. Так как между стержневыми электродами расстояние превышает 2-3 мм то процесс полирования невозможно провести качественно и равномерно. Конструкция устройства достаточно сложная и требует постоянно настраивать положение стержневых электродов на каждую обрабатываемую поверхность.

Известно устройство выбранного в качестве прототипа, в котором инструмент электрод состоит из закрепленного на нем короба. На поверхности короба крепится форма из затвердевшего неметаллического материала стойкого к химическому действию электролита. Безячеистая сетка, подключенная к отрицательному полюсу источника питания закреплена на наружной поверхности отвердевшего неметаллического материала. Штифты и регулировочные винты, входящие в конструкцию корпуса обеспечивают выставление межэлектродного зазора между моделью и заготовкой. Мастер-моделью для изготовления модели является поверхность обрабатываемой заготовки. По внутренней поверхности, которой изготавливается модель, с учетом величины межэлектродного зазора предназначенного для прокачки электролита и диаметра безячеистой сетки. [Патент РФ № 2561556, кл. C25F 7/00, B23H 3/04. 2015].

Приведенный прототип имеет недостатки низкое качество обрабатываемой поверхности и невысокая производительность.

Целью магистерской диссертации является разработка конструкции и технологии изготовления инструмент - электрода для электрохимического полирования рабочих поверхностей. В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи:

- изучить теоретические основы ЭХО;
- разработать функциональную схему установки ЭХО;
- разработать конструкцию инструмент – электрода.

2. Проектирование и расчет технологических операций ЭХО

2.1 Расчет основных технологических показателей электрохимической обработки.

Разрабатывая технологический процесс обработки труднообрабатываемых материалов и сплавов заготовки с использованием процесса ЭХО необходимо провести анализ возможности и целесообразности использования процесса электрохимической обработки и проанализировать в первую очередь требования, которые предъявляются для обрабатываемой детали. Основными технологическими характеристиками процесса электрохимической обработки являются производительность, точность обработки и качество обрабатываемой поверхности. На приведенные технологические характеристики оказывают влияние объемный электрохимический эквивалент материала заготовки, напряжение на электродах, анодная плотность тока, состав применяемого электролита, коэффициент выхода металла по току, межэлектродный зазор. Производительность электрохимического процесса обработки не зависит от прочности обрабатываемого материала, что позволяет использовать электрохимические способы при обработке труднообрабатываемых материалов и сплавов. Производительность формообразующих операций и отделочных операций при ЭХО оценивают как скорость электрохимического растворения материала и измеряется (мм / мин; мм²/мин; м/мин; м²/час), а продолжительность процесса в мин, час и т.д. Процесс электрохимического формообразования может проходить как с подвижным, так и неподвижным электродом инструментом. При электрохимической обработке с неподвижным электродом инструментом размер межэлектродного зазора в начале процесса соответствует требованиям технологической документации. С течением времени значение межэлектродного зазора увеличивается, и скорость электрохимического растворения и производительность уменьшается. Скорость электрохимического растворения с неподвижным электродом можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{э.р}} = \frac{k_V U \chi \eta}{a_0^2 + k_V U \chi \eta \tau} \quad (2.1)$$

где k_V – электрохимический эквивалент сплава, $\text{см}^3 / (\text{А мин})$; χ – удельная электропроводность электролита, см/м ; U – напряжение, В; τ – время обработки, мин; a_0 – межэлектродный зазор, мм; η – коэффициент выхода металла по току.

При электрохимической обработке с подвижным электродом величина межэлектродного зазора остается постоянной это обеспечивается перемещением электрода инструмента. Постоянный межэлектродный зазор обеспечивает постоянный процесс электрохимического растворения материала. Производительность процесса не снижается с увеличением растворения припуска [2]. Скорость электрохимического растворения с подвижным электродом можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{э.р}} = V_{\text{э.и.}} = \frac{k_V U \chi \eta}{a} \quad (2.2)$$

где k_V – электрохимический эквивалент сплава, $\text{см}^3 / (\text{А мин})$; χ – удельная электропроводность электролита, см/м ; U – напряжение, В; η – коэффициент выхода металла по току; a – межэлектродный зазор, мм.

С повышением значений U , χ и η производительность электрохимической обработки повышается, с увеличением межэлектродного зазора a при неподвижном электроде инструменте с течением времени τ скорость электрохимического растворения $V_{\text{э.р}}$ снижается, при электрохимической обработке с подвижным электроде инструменте с течением времени τ скорость электрохимического растворения $V_{\text{э.р}}$ не изменяется, при электрохимической обработке с неподвижным электродом с увеличением времени τ скорость электрохимического растворения снижается [2].

Таблица 5 - Скорость электрохимического растворения металлов и сплавов в различных электролитах

Материал	Состав электролита в %		
	15% NaCl	12 % KNO ₃ ;10% NaCl	14% NaCl; 1% H ₃ BO ₃
	Скорость съема металла в мм/мин		
Сталь 45	2,0	2,85	1,9
Сталь У10 инструментальная углеродистая	1,5	1,6	1,5
Магнитотвердый сплав ЮНД -4	1,6	3,0	1,75
Жаропрочный сплав ХН70ВМТЮ	1,25	1,35	1,15
Жаропрочный сплав ХН62МВКЮ	1,3	1,35	1,35
Вольфрамокобальтовый твердый сплав ВК20	1,0	0,85	0,9

К характеристикам, влияющим на технологические показатели ЭХО можно отнести a – величина межэлектродного зазора мм; χ – удельная электропроводность электролита, см/м; U – напряжение, В; η – коэффициент выхода металла по току, %; анодная плотность тока i .

Объемный электрохимический эквивалент k_V для каждого обрабатываемого материала имеет свое значение и определяется свойствами вещества, он влияет на скорость растворения материала, т.е. производительность ЭХО. В таблице 6 приведены объёмные электрохимические эквиваленты сплавов [2].

Таблица 6 - Объемный электрохимический эквивалент сплавов

Сплав	Плотность ρ , г/см ³	Объемный электрохимический эквивалент k_V см ³ / (А мин)
ХН77ТЮР	7,85	0,0021
5ХНМ	7,8	0,0022
Х18Н9Т	7,9	0,0021
12Х18Н9Т	7,54	
30ХГСА	7,77	0,0022
38НМЮА	7,71	
2Х13	7,75	0,002
ВТ-8	4,5	0,0021
ВК8	14,35	0,0013
Т15К6	11	0,0015

Объемный электрохимический эквивалент обрабатываемого материала рассчитывается по формуле 2.3 [2].

$$k_V = B_A / (26,8n\rho \cdot 60) \quad (2.3)$$

где ρ – плотность металла анода, г/см³; B_A – атомная масса; n – валентность.

Таблица 7 - Объемлемые электрохимические эквиваленты чистых металлов

Металл	Плотность ρ , г/см ³	Атомная масса B_A	Валентность n	Объемный электрохимический эквивалент k_V см ³ / (А мин)
Алюминий	2,71	26,98	3	0,0021
Вольфрам	19,2	183,92	5	0,0012
Железо	7,86	55,85	3	0,0015
Кобальт	8,86	58,94	2	0,0021
Ниобий	8,6	92,91	5	0,0013
Медь	8,93	63,57	1	0,0044
Хром	7,16	52,01	6	0,0008
Титан	4,5	47,9	4	0,0017
Магний	1,74	24,32	2	0,0044

Электрохимической обработке подвергаются не чистые металлы, а их сплавы. Электрохимический эквивалент сплава можно выразить через содержание в сплаве его отдельных элементов в (%) и электрохимические эквиваленты металлов входящих в сплав. Электрохимический эквивалент в таком случае зависит от обрабатываемого сплава и формула определения электрохимического эквивалента сплава имеет вид [10].

$$k_{\Sigma} = \frac{100}{\frac{p_1}{k_1} + \frac{p_2}{k_2} + \frac{p_3}{k_3} + \dots + \frac{p_n}{k_n}} \quad (2.4)$$

где $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ - содержание в сплаве его отдельных составляющих, (%), $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ – электрохимический эквивалент металлов входящих в сплав, г/А· час.

Таблица 8 - Электрохимические эквиваленты, валентность чистых металлов

Металл	Валентность n	Электрохимический эквивалент k г / (А мин)
Алюминий	3	0,0056
Вольфрам	5	0,019
Железо	3	0,0115
Кобальт	2	0,018
Магний	2	0,0075
Ниобий	3	0,0191
Медь	1	0,0395
Хром	6	0,0054
Титан	4	0,0074

Значение плотности тока i А/см² векторная физическая величина является одним из важных и контролируемых показателей процесса ЭХО. Величина растворенного при электролизе металла V с площади анода S_a определяется анодной плотностью электрического тока [2].

$$i = \frac{I}{S_a} \quad (2.5)$$

$$V = k_V i \tau \quad (2.6)$$

где i – плотность тока, А/см²; k_V – объемный электрохимический эквивалент сплава, см³/(А·мин); S_a – площадь анода, см²; τ – время обработки, мин; I – сила тока, А.

Поток вектора плотности тока через некую фиксированную поверхность есть сила тока. Сила тока зависит от размера межэлектродного зазора a . При небольших межэлектродных зазорах происходит интенсивное растворение и точное копирование профиля катода на аноде. С уменьшением межэлектродного зазора сила тока возрастает, так как уменьшается сопротивление столба электролита в межэлектродном зазоре при одном и том же напряжении. Зависимость, I – силы тока и i – плотности тока от межэлектродного зазора a имеет вид [7].

$$I = \frac{U}{R_э} = \frac{U \chi S}{a}; \quad (2.7)$$

$$i = \frac{U\chi}{a}; \quad (2.8)$$

где U – напряжение, В; χ – удельная электропроводность электролита, см/м; S – площадь анода, см²; a – межэлектродный зазор, мм; k_V – объемный электрохимический эквивалент сплава, см³/(А мин); τ – время обработки, мин;

Электролит в межэлектродном промежутке имеет сопротивление:

$$R_э = \frac{a}{\chi S} \quad (2.9)$$

где $R_э$ – сопротивление электролита, Ом; a – межэлектродный зазор, мм; χ – удельная электропроводность электролита, см/м; S – площадь анода, см².

Ниже представлены графики зависимости плотности тока от межэлектродного зазора.

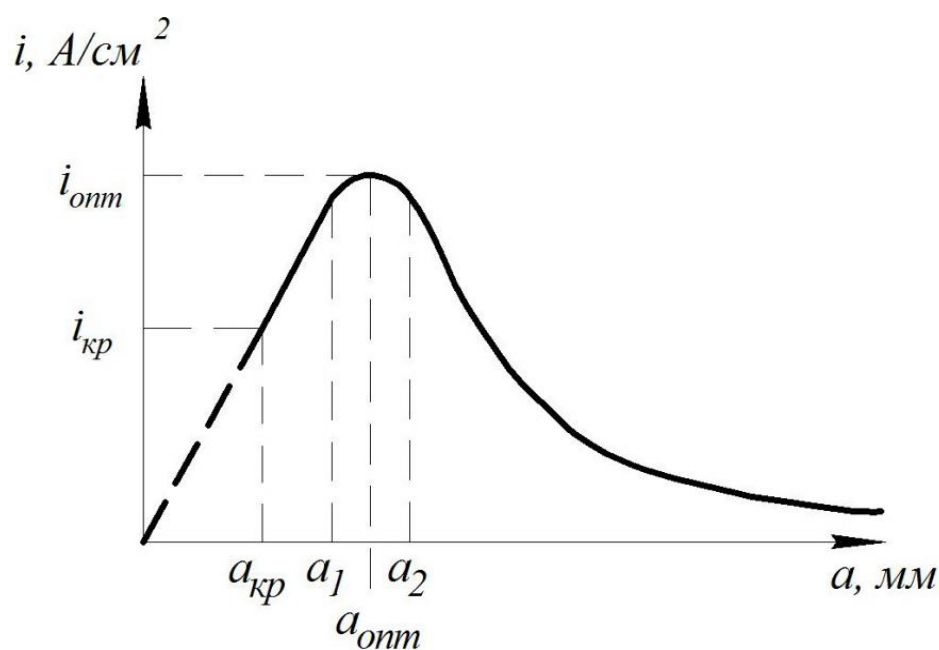


Рисунок 17 - График зависимости плотности тока i от межэлектродного зазора a

Из представленного графика видно, что при межэлектродном зазоре $a_{кр}$ плотность тока достигает критического значения $i_{кр}$ и могут возникнуть пробой межэлектродного промежутка, происходит замыкание электродов. Для исключения замыкания электродов необходимо поддерживать оптимальный межэлектродный зазор, который влияет на точность и производительность процесса ЭХО. С

увеличение межэлектродного зазора увеличивается плотность тока и достигает своего оптимального значения. Происходит интенсивное растворение материала заготовки. При достижении оптимального межэлектродного зазора $a_{\text{опт}}$ плотность тока $i_{\text{опт}}$ достигает своего оптимального значения в точке, где происходит процесс максимального растворения материала заготовки. При дальнейшем увеличении межэлектродного зазора плотность тока падает, увеличивается сопротивление столба электролита в межэлектродном зазоре, и процесс растворения материала заготовки замедляется.

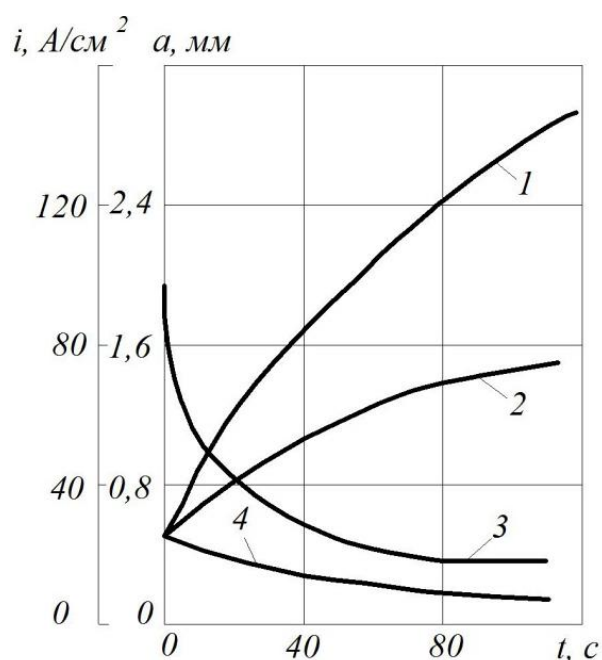
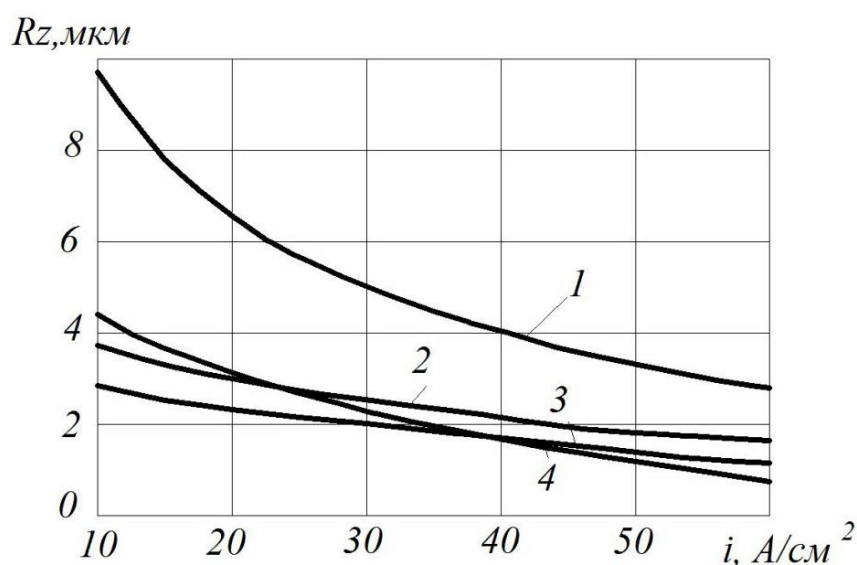


Рисунок 18 - Изменение зависимости межэлектродного зазора a (1,2) и плотности тока i (3,4) материал анода сталь 35ХМ, электролит 20% NaCl, при постоянном напряжении $U = 24$ В (1,3); напряжении $U = 8$ В (2,4)

Из представленной зависимости (рис.18) видно, что в процессе электрохимической обработки при постоянном напряжении $U = 24$ В, в растворе электролита NaCl 20% увеличивается межэлектродный зазор (линия 1) на графике плотность тока уменьшается (линия 3) на графике. В точке пересечения графиков достигается оптимальная величина межэлектродного зазора и плотности тока. В процессе дальнейшего увеличения зазора плотность тока продолжает падать, и процесс электрохимической обработки замедляется. При постоянном напряжении $U = 8$ В в растворе электролита NaCl 20% межэлектродный зазор и плотность тока

(линия 3, линия 4) на графике сразу принимают свое оптимальное значение и в процессе дальнейшей электрохимической обработки с увеличением межэлектродного зазора происходит падение плотности тока. Анализируя эти зависимости, можно сделать предположение, что с увеличением межэлектродного зазора плотность тока падает, а с уменьшением межэлектродного зазора плотность тока возрастает.

Плотность тока влияет на шероховатость R_z поверхности обрабатываемого материала. Зависимость влияния анодной плотности тока на величину микронеровностей представлена на графике.



1 – высокий отжиг, 2 – полный отжиг, 3 – высокий отпуск, 4 – низкий отпуск

Рисунок 19 - График изменения шероховатости поверхности R_z стали 40X конструкционная легированная с содержанием углерода 0,4 % от плотности тока i

Из графика изменения шероховатости поверхности Стали 40X от плотности тока видно, что при высокой плотности тока качество поверхности (шероховатость R_z) обрабатываемого материала улучшается. Высокая плотность тока зависит от межэлектродного зазора. С уменьшением межэлектродного зазора плотность тока возрастает. Следовательно, на шероховатость обрабатываемой поверхности влияет плотность тока, а также величина межэлектродного зазора. Чем меньше

межэлектродный зазор, тем выше плотность тока и меньше шероховатость обрабатываемой поверхности заготовки.

2.2 Расчет напряжения.

Прохождение тока через электрод-инструмент, межэлектродный зазор, заготовку, токоведущие провода происходят потери напряжения. Обозначим напряжение на зажимах источника питания U_0 тогда:

$$U_0 = U + \Delta U_T + \Delta U + \Delta U_3 \quad (2.10)$$

где U – напряжение, затрачиваемое на растворение материала заготовки, ΔU_T – потери напряжения на зажимах в токоведущих проводах, ΔU – потери напряжения в двойном электрическом слое, ΔU_3 – потери напряжения при прохождении через заготовку. Потери напряжения в двойном электрическом слое представляется как разность потенциалов анода и катода:

$$\Delta U = \varphi_a - \varphi_k \quad (2.11)$$

где φ_a – скачек потенциала на аноде, φ_k – скачек потенциала на катоде.

Тогда напряжение, затрачиваемое на растворение материала заготовки имеет вид:

$$U = U_0 - \Delta U \quad (2.12)$$

Потери напряжения ΔU зависит от состава материала заготовки, состава электролита, межэлектродного зазора, плотности тока. На графике представлена зависимость напряжения на электродах от величины межэлектродного зазора.

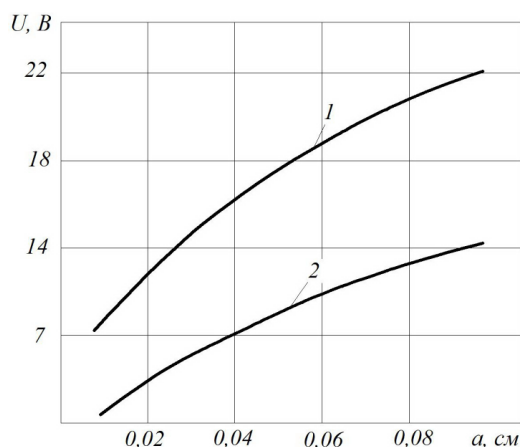


Рисунок 20 - График зависимости размера межэлектродного зазора и напряжения на электродах в растворе электролита 20% NaCl при обработке стали 40X

Одним из основных условий начала процесса анодного растворения подчиняющегося законам электролиза Фарадея в проточном и стационарном электролите является наличие межэлектродного зазора между электродом инструментом и заготовкой. В начальный момент обработки вследствие растворения металла с поверхности заготовки межэлектродный зазор увеличивается. На графике (линия 1) соответствует плотности тока $i = 33 \text{ A/cm}^2$ и (линия 2) соответствует плотности тока $i = 50 \text{ A/cm}^2$. При постоянных параметрах плотности тока $i = 33 \text{ A/cm}^2$ и $i = 50 \text{ A/cm}^2$ с увеличением межэлектродного зазора величина напряжения на электродах повышается [16].

Таблица 9 – Рекомендуемые напряжения на электродах для операций электрохимического формообразования

Операция	Материал детали	Напряжение на электродах в В
Прошивка мелких отверстий	Конструкционные стали, алюминиевые и медные сплавы	10-18
	Твердые сплавы	10-20
Прошивка глубоких полостей - "колодцев", крупных полостей, отверстий.	Высокопрочные и вязкие материалы, жаропрочные стали и сплавы.	10-18
Обработка профиля пера лопаток.	Титановые сплавы	12-25
Электрохимическое точение.	Конструкционные стали.	10-18
	Жаропрочные и титановые сплавы.	12-25
Электрохимическое шлифование	Высокопрочные и вязкие материалы.	6-12
Электрохимическая резка заготовок дисковым электродом.	Твердые сплавы, жаропрочные титановые сплавы.	10-30
Электрохимическая резка заготовок проволочным электродом.	Высокопрочные и вязкие материалы.	25-30

Продолжение таблицы 9

Операция	Материал детали	Напряжение на электродах в В
Электрохимическая обработка неподвижным электродом.	Высокопрочные и вязкие материалы.	10-18

2.3 Расчет коэффициента выхода металла по току.

Выход по току является показателем полезного использования энергии затрачиваемой при проведении процесса ЭХО. Одним из показателей влияющий на съем металла в процессе электрохимической обработки является коэффициент выхода металла по току, η который характеризует объем растворенного материала. Выражается в отношении V_{ϕ} – фактического объема растворенного металла к V – расчетному объемному значению растворенного материала.

$$\eta = \frac{V_{\phi}}{V} \quad (2.13)$$

$$V_{\phi} = \eta k I \tau \quad (2.14)$$

где I – сила тока, А; k – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала анода, Кг/А·мин; τ – время обработки, мин; η – коэффициент выхода металла по току.

$$k = B_A / (26,8n \cdot 60) \quad (2.15)$$

где B_A – атомная масса металла, n – валентность, постоянная Фарадея равная 26,8 А ч / моль.

Коэффициент выхода металла, по току η выраженный в (%) зависит от плотности тока, состава электролита, физико-механических свойств обрабатываемого материала. Выход металла по току характеризует степень полезного использования энергии при осуществлении процесса электрохимической обработки материала. Чем ниже выход металла по току, η тем больше расход

энергии на удалении единицы массы материала, т.е. выше удельная энергоёмкость процесса. Чем выше выход металла по току, тем меньше энергии затрачено на удаление единицы массы материала тем ниже удельная энергоёмкость процесса [7]. Удельную энергоёмкость процесса W_m Дж/кг можно рассчитать по формуле [12].

$$W_m = \frac{I U \tau}{m_{\phi}} \quad (2.16)$$

где U – напряжение, В; τ – время обработки, мин; I – сила тока, А; m_{ϕ} – фактическая масса растворенного вещества, кг.

На коэффициент выхода металла по току влияет структура обрабатываемого материала и применяемый электролит, плотность тока. График зависимости коэффициента выхода металла по току от применяемого электролита NaCl, NaNO₃ представлен ниже:

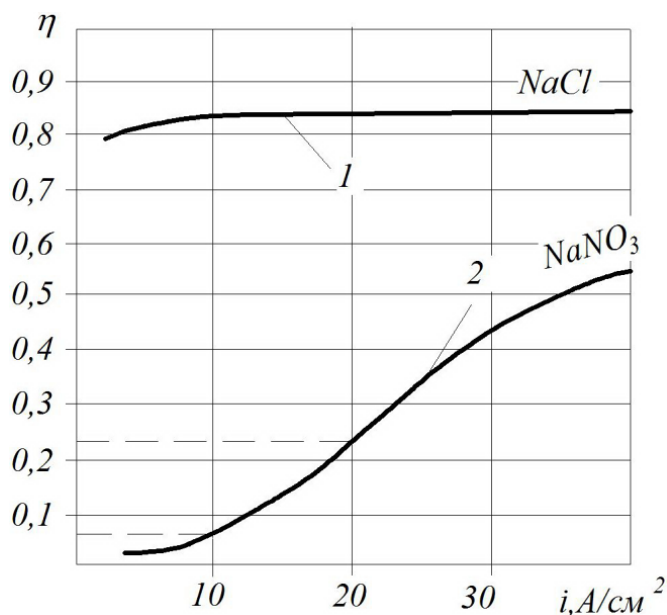


Рисунок 20 - График влияния плотности тока i на коэффициента выхода металла по току η в электролитах NaCl и NaNO₃ 30%

При обработке хромистой стали 15X11МФ при использовании электролита хлористого натрия NaCl повышение плотности тока, межэлектродный зазор существенно не влияют на коэффициент выход металла по току (линия 1) на графике. Обработка хромистой стали 15X11МФ в тридцати процентном растворе

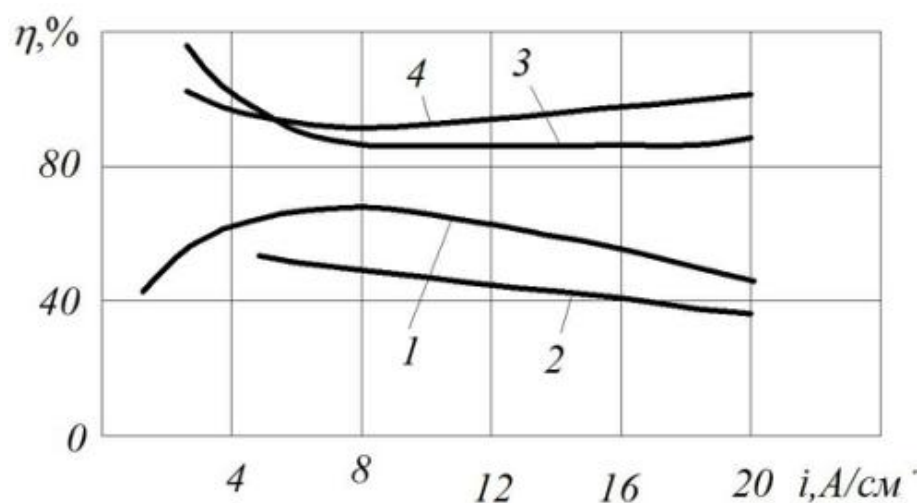
электролита азотнокислого натрия NaNO_3 30% коэффициент выхода металла по току η , следовательно, и производительность зависит от плотности тока. Повышение плотности тока от 10 до 20 A/cm^2 приведет как видно из графика увеличение выхода металла по току с 0,05 до 0,22 (линия 2) на графике. Межэлектродный зазор существенно влияет на коэффициент выхода металла по току. При уменьшении межэлектродного зазора плотность тока возрастает, это оказывает значительное влияние на коэффициент выхода металла по току.

Значения коэффициента выхода металла η для некоторых металлов и сплавов при анодной плотности тока $i = 10-15 \text{ A}/\text{cm}^2$ в растворе электролита NaCl , NaNO_3 представлен в таблице 10 [2].

Таблица 10 – Коэффициент выхода металла по току

Металлы и сплавы	Электролит	
	25% NaCl	30 % NaNO_3
Сталь 45	77,5	60,00
Чугун	36	-
Сталь 30X10Г10	73	48
Сталь ШХ15	92	32
Никель	98	68
Сталь X18H9T	65	55
Сталь 12XГНЗ закаленная	92	40,3
Медь	98	66
Сталь 5ХНВ закаленная	98	68
Сплав ЭИ867	71	94
Сплав ЖС6К	80	65
Алюминий	112	117

График влияния плотности тока и материала обрабатываемой заготовки на коэффициент выхода металла:



1 – Конструкционная коррозионно-стойкая жаропрочная сталь 12X18H9T; 2 – Титановый сплав ВТЗ – 1; 3 - Коррозионно-стойкая сталь 30X10Г10; 4 - Нержавеющая жаропрочная сталь 20X13

Рисунок 21 - График влияния плотности тока i на коэффициента выхода металла по току η в электролите $NaNO_3$ для различных материалов

При электрохимическом процессе обработке деталей изготовленных из материала сталь 12X18H9T в растворе азотнокислого натрия $NaNO_3$ повышение плотности тока на $0,01 A/mm^2$ увеличивается выход по току на $0,1...0,15\%$. Обработка коррозионно-стойкой стали 30X10Г10 и нержавеющей жаропрочной стали 20X13 (линия 3) и (линия 4) на графике в аналогичных условиях происходит с высоким выходом по току. Обработка титанового сплава ВТЗ – 1 показывает обратную закономерность. Рост плотности тока вызывает снижение коэффициента выхода металла по току, т.е. снижение скорости съема металла [11].

2.4 Точность обработки.

Точность обработки это соответствие полученных размеров обрабатываемой детали требованиям чертежа или другой технической документации. Слой металла, который необходимо снять с заготовки для получения детали с заданными размерами называют припуском. В начале процесса ЭХО зазор между электродом

инструментом и заготовкой неравномерный из-за неровностей на поверхности заготовки. На участках, где зазор между электродом инструментом заготовкой минимальный плотность тока выше соответственно скорость съёма материала заготовки выше. Разница между номинальным и фактическим значением межэлектродного зазора называют погрешностью. После окончания обработки погрешность детали $\Delta_{дет}$ должна быть в пределах допуска ($\delta_{дет}$).

$$\Delta_{дет} = \Delta_0 - y_1 \tau - y_2 \tau \quad (2.17)$$

где Δ_0 – погрешность заготовки, y_1 - съём металла в конце обработки на участках с минимальным межэлектродным зазором s_1 , y_2 – съём металла в конце обработки на участках с максимальным межэлектродным зазором s_2 , τ – время обработки.

Съём металла в конце обработки y_1 с минимальным межэлектродным зазором s_1 рассчитываем по формуле:

$$y_1 = -s_0 + \frac{\sqrt{s_0^2 + 2\eta k_v \chi U \tau}}{\rho} \quad (2.18)$$

где s_0 – начальный межэлектродный зазор, мм; k_v – объемный электрохимический эквивалент обрабатываемого материала заготовки, см³/А·мин; τ – время обработки, мин; η – коэффициент выхода металла по току; χ – удельная электропроводность электролита, см/м; U – напряжение, В; ρ – плотность материала заготовки.

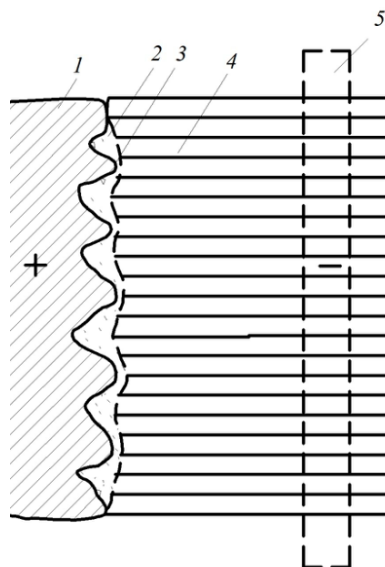
Съём металла в конце обработки y_2 с максимальным межэлектродным зазором s_2 находим аналогично по формуле (2.18), начальный межэлектродный зазор s_0 принимаем равным $(s_0 + \Delta_0)$, тогда погрешность детали представим в виде формулы:

$$\Delta_{дет} = \frac{\sqrt{(s_0 + \Delta_0)^2 + 2\eta k_v \chi U \tau}}{\rho} - \frac{\sqrt{s_0^2 + 2\eta k_v \chi U \tau}}{\rho} \quad (2.19)$$

Чем меньше погрешность заготовки, начальный зазор и больше время обработки, тем меньше погрешность детали.

2.5 Качество обрабатываемой поверхности. Межэлектродный зазор.

В процессе электрохимического формообразования отсутствует воздействие электрода инструмента на заготовку, что определяет геометрию шероховатости. Более высокие выступы шероховатости являются концентратами напряжения одна из причин снижения усталостной прочности. Поверхность детали после электрохимического полирования имеет меньшую шероховатость микронеровности распространены равномерно по всей поверхности детали, поэтому имеют большую усталостную прочность при циклической нагрузке и износостойкость. После электрохимической обработки на поверхности детали отсутствуют изменения связанные с кинематикой обработки или геометрией инструмента. Шероховатость поверхности также зависит от структуры материала заготовки состава и температуры электролита, плотности тока. На процесс сглаживания микронеровностей на обрабатываемой заготовке и образования шероховатости оказывает влияние пассивация. Пассивация образование оксидной пленки на поверхности обрабатываемой заготовки. Оксидная пленка образующееся в результате электрохимического процесса состоит из продуктов анодного растворения в электролите на поверхности детали заполняет впадины шероховатости. Тонким слоем покрывает вершины микронеровности. Скорость растворения металла зависит от плотности тока. На вершинах микронеровности плотность тока будет больше. Электрический ток концентрируется на вершинах микронеровности потому, что оксидная пленка, заполнившая впадины профиля обладает высоким электрическим сопротивлением. Скорость растворения наибольших выступов профиля микронеровности будет больше чем скорость растворения впадин профиля.



1 – анод; 2 – оксидная пленка; 3 – слой оксидной пленки, обладающий высоким сопротивлением; 4 – электролит; 5 – катод

Рисунок 22 - Расположение оксидной пленки на поверхности заготовки анод

Зависимость силы тока от напряжения при постоянной площади обрабатываемой поверхности имеет вид:

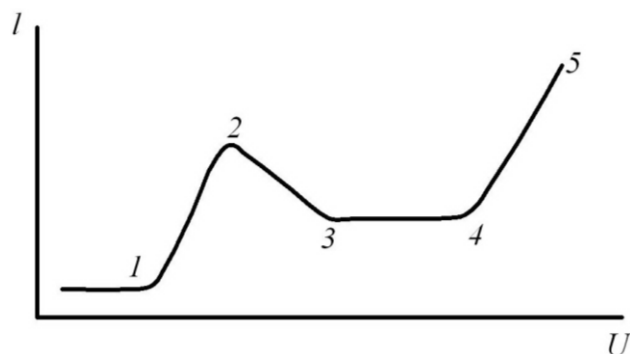


Рисунок 23 - График зависимости силы тока от напряжения

Участок 1 – 2 на графике характеризуется началом процесса анодного растворения материала заготовки. При повышении напряжения сила тока растёт. Сила тока вырастает постепенно, при этом высокой скорости обработки заготовки не происходит. На участке 2 – 3 напряжение продолжает расти, а сила тока снижается. В точке 2 начинается процесс образования оксидной пленки, наступает пассивация обрабатываемой поверхности. С увеличением напряжения толщина оксидной пленки, обладающая высоким сопротивлением возрастает. На участке 3 – 4 напряжение продолжает расти сила тока остаётся неизменной. Происходит процесс анодного растворения материала заготовки без разрушения оксидной

плёнки. На участке 4 – 5 сила тока начинает расти и скорость растворения заготовки возрастает.

На этом участке происходит разрушение оксидной пленки на выступах профиля. Под воздействием возрастающей силы тока и растворяющим действием электролита наибольшие выступы профиля освобождаются от оксидной пленки и сглаживаются. Наибольшая высота выступов уменьшится. [13]

При оценке параметров профиля шероховатости по десяти точкам средняя линия m , имеющая форму номинального профиля, является базой для определения параметра шероховатости, сместится в сторону наибольших впадин профиля. [14]

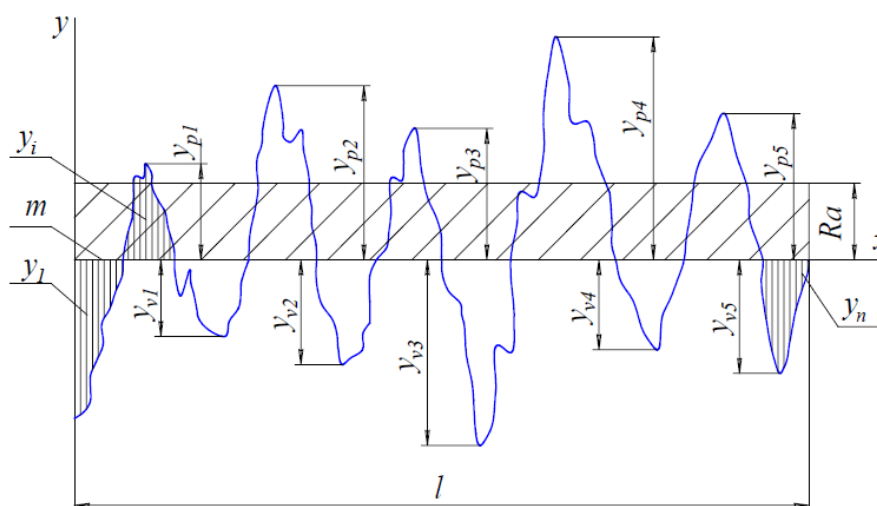


Рисунок 24 - Профиль поверхности

Высота неровности R_z по десяти точкам - сумма средних высот пяти наибольших выступов профиля и пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины l определяется по формуле 2.20 [15].

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5} \quad (2.20)$$

где y_{pi} – высота пяти наибольших выступов профиля; y_{vi} – высота пяти наибольших впадин профиля.

Среднее арифметическое отклонение абсолютных значений R_a находим по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.21)$$

Электролит и его свойства оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности, и является одним из определяющих факторов влияющий на показатель шероховатости после электрохимической обработки. Состав электролита и температура в значительной степени влияют на шероховатость поверхности. В качестве электролитов используют различные растворы солей NaCl, NaNO₃, KCl, KNO₃, и др. Применение в качестве электролита хлористого натрия позволяет при обработке нержавеющей стали, углеродистых сталей, жаропрочных сплавов получить 7 – 8 класс частоты шероховатости поверхности $R_a = 0,63 - 1,25$. Зависимость шероховатости поверхности R_a от концентрации электролита NaCl и KNO₃ для нержавеющей стали X18H19T представлена на графике:

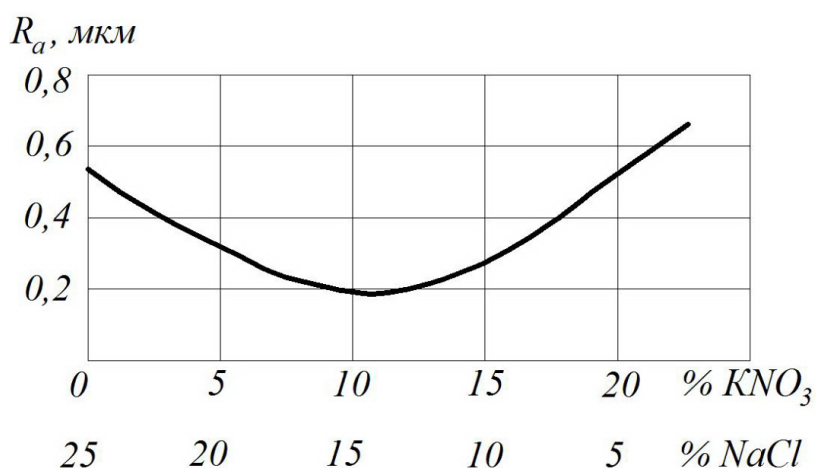
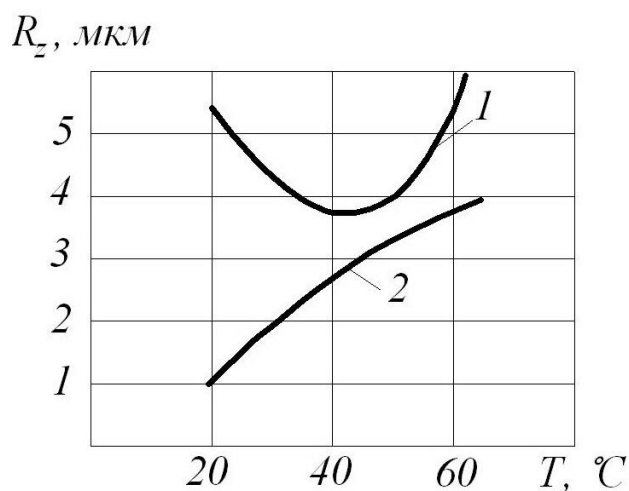


Рисунок 25 - Зависимость шероховатости поверхности R_a от концентрации электролита

Из представленной зависимости видно, что при применении электролита 15% NaCl достигается наилучший результат шероховатости поверхности $R_a = 0,21$. Повышение или снижение концентрации растворенных компонентов электролита NaCl приведет к снижению или повышению электропроводности электролита, χ (См/м) что в свою очередь ускоряет или замедляет процесс растворения материала заготовки и приводит изменению класса частоты поверхности повышению шероховатости обрабатываемой поверхности. Аналогичный результат шероховатости поверхности можно получать при обработке нержавеющей стали

X18H19T с применением электролита 10% KNO_3 .

Электропроводность электролита χ (См/м) величина обратно пропорциональна его удельному сопротивлению и зависит от температуры раствора электролита. Изменение температуры электролита приводит к изменению шероховатости обрабатываемой поверхности жаропрочных сплавов, титановых сплавов и углеродистых сталей.



1 – титановые сплавы; 2 – жаропрочные сплавы

Рисунок 26 - Влияние температуры электролита на шероховатость поверхности

Оптимальная температура электролита для обработки жаропрочных сплавов и получения шероховатости поверхности до 8 – 9 класса как видно из графика, равна 20°С. С повышением температуры электролита шероховатость поверхности будет ухудшаться. Шероховатость поверхности жаропрочных сплавов улучшают электролиты с температурой 20°С. Худшие результаты шероховатости при полировании титанового сплава свыше 50°С. Кроме того высокая температура ванны с электролитом повышает технологические затраты, генерирует токсичные пары. Таким образом, рекомендуемая температура электролита для обработки титанового сплава и получения высокого класса шероховатости поверхности должна быть равной 50°С [42].

Точность обработки и скорость электрохимического процесса формообразования зависит от размера межэлектродного зазора. С уменьшением межэлектродного зазора анодная плотность тока возрастает и увеличивается

скорость растворения материала. В малых межэлектродных промежутках затрудняется процесс прокачки электролита, увеличивается газонаполнение межэлектродного зазора и снижается скорость растворения материала заготовки. Необходимо выбирать такой межэлектродный зазор, который поможет достичь оптимальной скорости растворения материала заготовки и точности обработки.

В различных электрохимических процессах устанавливают свои оптимальные диапазоны межэлектродного зазора, обеспечивающие высокую скорость съема металла и точность формообразования.

В таблице 11 представлены диапазоны величин межэлектродного зазора между анодом и катодом для некоторых операций электрохимического формообразования[16].

Таблица 11 – Диапазон величин межэлектродного зазора

Операции	Величина зазора в мм	
	Пределы	Наиболее часто применяемый диапазон
Прошивка отверстий диаметром 8 мм.	0,02 - 0,3	0,1 - 0,2
Прошивка мелких полостей длинна контура от 3 до 30 мм.	0,08 - 0,5	0,1 - 0,3
Прошивка крупных полостей длинна контура более 40 мм.	0,3 - 1,0	0,3 - 0,5
Обработка профиля лопаток с длинной пера до 100 мм	0,08 - 0,3	0,1 - 0,2
Обработка профиля лопаток с длинной пера от 100 мм до 200 мм	0,15 - 0,5	0,25 - 0,3
Электрохимическое шлифование металлическим катодом	0,1 - 0,8	0,2 - 0,3
Электрохимическое шлифование металлоабразивными кругами	0,01 - 0,08	0,02
Электрохимическая разрезка заготовок дисковым электродом диаметром до 100 мм	0,1 - 0,5	0,2 - 0,3
Электрохимическое точение наружных поверхностей.	0,2 - 0,8	0,3 - 0,5

Продолжение таблицы 11

Операции	Величина зазора в мм	
	Пределы	Наиболее часто применяемый диапазон
Электрохимическая разрезка заготовок проволочным электродом толщиной до 30 мм	0,1 - 0,6	0,2 - 0,3
Обработка неподвижными электродами	0,1	0,1 - 0,3

При работе с неподвижным электродом величина межэлектродного зазора увеличивается, и скорость растворения материала заготовки замедляется. Режим электрохимического процесса изменяется с течением времени и является нестационарным. Процесс анодного растворения и изменение межэлектродного зазора представлены на рис.27 [1].

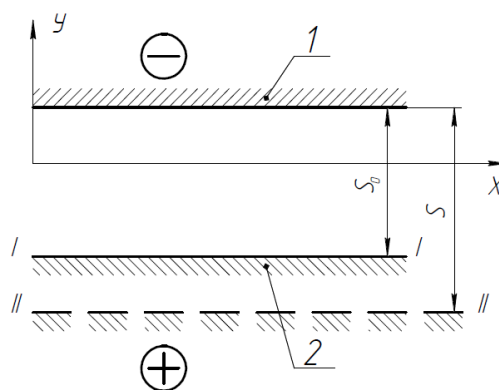


Рисунок 27 - Изменение межэлектродного зазора во времени

В начале процесса электрохимического формообразования электрод инструмент - 1 находится на расстоянии S_0 относительно заготовки - 2. В течение времени τ межэлектродный зазор увеличится и линия I – I переместится в положение II – II и электрод инструмент будет находиться относительно заготовки на расстоянии S . Движение электролита осуществляется по оси X.

Скорость растворения металла можно записать в виде формулы:

$$v = \frac{k_v \chi \eta U}{\rho \alpha} \quad (2.22)$$

где k_V – электрохимический эквивалент сплава, $\text{см}^3 / (\text{А мин})$; χ – удельная электропроводность электролита, см/м ; U – напряжение, В; η – коэффициент выхода металла по току; a – межэлектродный зазор, мм; ρ – плотность материала. Запишем скорость растворения металла через d_y , d_τ тогда скорость растворения можно записать в виде:

$$\frac{d_y}{d_\tau} = \frac{k_V \chi \eta U}{\rho y} \quad (2.23)$$

Интегрируем это выражение:

$$\tau = \frac{s}{s_0} \frac{y}{\eta k_V \chi U} d_y = \frac{s^2 - s_0^2}{\eta k_V \chi U \rho} \quad (2.24)$$

где s – межэлектродный зазор в конце обработки; s_0 – межэлектродный зазор в начале обработки.

$$s = \sqrt{\frac{2\eta k_V \chi U \tau}{\rho + s_0^2}} \quad (2.25)$$

где η – коэффициент выхода металла по току; k_V – электрохимический эквивалент сплава, $\text{см}^3 / (\text{А мин})$; χ – удельная электропроводность электролита, см/м ; U – напряжение, В; s_0 – межэлектродный зазор в начале обработки; ρ – плотность материала.

В процессе электрохимического формообразования используют постоянный ток. Наряду с постоянным током можно использовать импульсный или переменный ток. Выбранный параметр формы тока позволяет уменьшить шероховатость обрабатываемой поверхности, а в некоторых процессах повысит точность и производительность. Применение импульсного тока с различной скважностью позволяет уменьшить шероховатость поверхности. [17] Под скважностью понимают отношение периода повторения импульса к длительности импульса.

$$Q = \frac{T}{t_u} \quad (2.26)$$

где T – периодичность (временный период до следующего импульса); t_u –

длительность импульса.

Обратная величина скважности это коэффициент заполнения отношение длительности импульса к периоду повторения импульса измеряемый в (%).

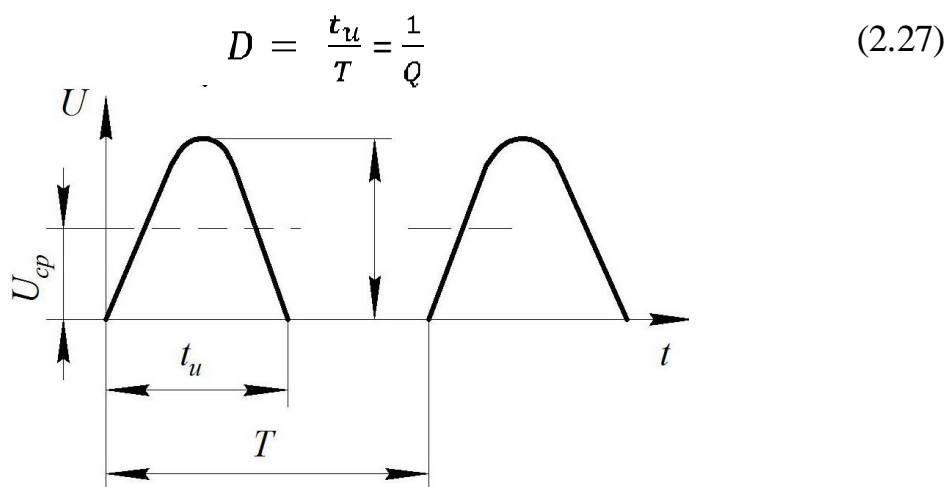


Рисунок 28 - Диаграмма формы импульса напряжения при электрохимической обработке

Импульсное напряжение наиболее часто применяется в процессах ЭХО, где межэлектродный зазор колеблется от 0,05 до 0,1 мм.

Зависимость влияния скважности тока на шероховатость поверхности показана на рисунке:

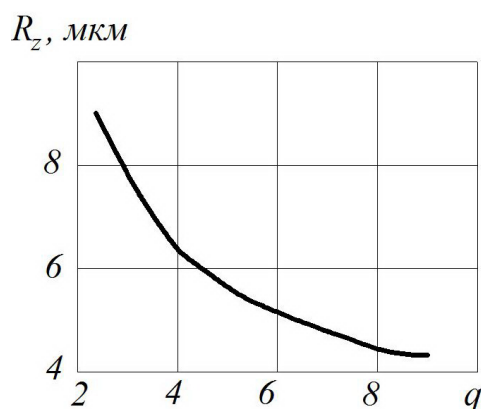


Рисунок 29 - Зависимость шероховатости от скважности тока

Из представленной зависимости видно, что повышение скважности до 4 и выше, т.е. увеличение длительности импульса t_u ведет к уменьшению шероховатости поверхности и повышению класса частоты. Увеличение скважности снижает высоту микронеровностей.

2.6 Подбор электролита. Гидродинамические процессы в межэлектродном зазоре.

Все электрохимические процессы протекают при наличии электролитов. Электролиты это растворы, обладающие ионной проводимостью. Электролиты пропускают электрический ток под действием напряжения за счет движения ионов. Под действием электрического поля возникает упорядоченное движение ионов к противоположно заряженным электродам. Скорость движения ионов можно найти по формуле:

$$V_i = \frac{ez_i U}{R l} \quad (2.28)$$

где e - элементарный электрический заряд; z_i – количество элементарных электрических зарядов; U – напряжение, В; R – сопротивление электролита; l – расстояние между электродами.

Электрическую подвижность иона в вязкой среде можно оценить формулой Стокса:

$$u_i = \frac{F}{6\eta r_i} \quad (2.29)$$

где F – сила, действующая на ион; η – коэффициент вязкости; r_i – радиус частицы.

Различают сильные и слабые электролиты. Слабые электролиты частично диссоциирует (распадаются) на ионы при растворении. Сильные электролиты полностью распадаются на ионы заряженные частицы (+ Катионы) и (- Анионы). Правильный выбор электролита одно из важных условий позволяющее проводить процесс электрохимической обработки с высокой производительностью при малой энергоемкости процесса. Определяющими для подбора электролита являются требования, которые предъявляются для выполнения операции и получения требуемого качества обрабатываемой детали. Водные растворы кислот и щелочей отличаются высокой электропроводностью, их используют для увеличения скорости анодного растворения металла. Для повышения точности обработки используют электролиты с пониженной электропроводностью. Электропроводность

электролита χ и вязкость, ν основные технологические показатели. Для электрохимического полирования необходимо выбирать электролиты с повышенной вязкостью. Для размерной электрохимической обработки вязкость должна быть меньше, чтобы обеспечить минимальное гидравлическое сопротивление в малых межэлектродных зазорах. Электролиты с высокой электропроводностью способны обеспечить прохождение тока большей силы. Удельная электропроводность электролита χ (χ – каппа) выражается $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ или по системе СИ, в сименсах на метр (сим/м) величина обратная его удельному сопротивлению ρ ($\text{Ом} \cdot \text{м}$) и зависит от температуры электролита и концентрации растворенных компонентов [18].

С увеличением температуры и концентрации электропроводность возрастает, и скорость растворения металла увеличивается. Изменение температуры зависит от продолжительности действия тока. Значения удельной электропроводности электролитов их зависимости от температуры и концентрации представлены в таблице 12 [2].

Таблица 12 – Электропроводность электролитов

Электролит	Температура T, °C	Концентрация, %			
		5%	10%	15%	20%
NaCl	20	7	12,6	17,2	20,2
	30	8,6	15,4	20,9	24,9
	40	10,1	18,1	24,5	29,1
NaNO ₃	20	4,5	8,1	11,3	13,5
	30	5,5	9,95	13,7	16,5
	40	6,7	11,5	16	19,3
Na ₂ CO ₃	20	4,6	7,3	8,8	–
	30	5,7	9	10,6	
	40	6,7	10,5	12,4	
KCl	20	7,2	14,1	21,1	28
	30	8,8	17,2	25,7	34,1
	40	10,3	20,2	30	39,7

С повышением температуры подвижность ионов возрастает, удельная электропроводность электролита увеличивается по закону:

$$\chi = \chi_0 (1 + \alpha t - 18) \quad (2.30)$$

где χ_0 – удельная электропроводность электролита при температуре 18° С; α – температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление электролита R_z можно определить по формуле:

$$R_z = \frac{l}{\chi_0 S} \quad (2.31)$$

где l – длина столба электролита между электродами, см; χ_0 – удельная электропроводность электролита величина обратная удельному электрическому сопротивлению $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; S – площадь поперечного сечения столба электролита, см^2 . [22]

Электропроводность способность вещества проводить электрический ток можно определить по формуле:

$$G = \chi \frac{S}{l} \quad (2.32)$$

где χ – удельная электропроводность проводящая способность электролита, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; S – площадь поперечного сечения столба электролита, см^2 ; l – длина столба электролита, см. [22]

Для приготовления электролитов выбирают соли растворы, которых обладают высокой электропроводностью. Наибольшее применение для электрохимической обработки получили нейтральные растворы неорганических солей (хлориды, нитриты, сульфаты натрия и калия) [17].

Таблица 13 - Электропроводность электролитов

Электролит	Концентрация электролита в %	Удельная электропроводность в $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Электролит	Концентрация электролита в %	Удельная электропроводность в $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
HNO_3	31	0,782	Na_2S	14	0,236
HCl	20	0,762	K_2CO_3	30	0,222
KOH	29	0,543	H_3PO_4	40	0,207
H_2SO_4	40	0,739	NaCl	25	0,241

Продолжение таблицы 13

Электролит	Концентрация электролита в %	Удельная электропроводность в Ом ⁻¹ • см ⁻¹	Электролит	Концентрация электролита в %	Удельная электропроводность в Ом ⁻¹ • см ⁻¹
NH ₄ Cl	25	0,403	CaCl ₂	25	0,178
HBr	15	0,355	NaNO ₃	30	0,161
KBr	36	0,351	MgCl ₂	20	0,14
NaOH	15	0,349	Na ₂ SO ₄	15	0,089
KCl	21	0,281	K ₂ SO ₄	10	0,086
KHSO ₄	27	0,342	Na ₂ CO ₃	15	0,084

В процессе электрохимической обработки изменяется свойство электролита. Водород выделяется, и концентрация ионов водорода в электролите изменяется. Концентрация ионов водорода в электролите характеризуется водородным показателем pH. Защелачивание электролита отрицательно влияет на производительность, скорость растворения материала и качество поверхности. Значение pH для некоторых электролитов приведены в таблице 14 [2].

Таблица 14 - Значение pH

Наименование электролитов	Значение pH
Растворы кислот	1...7
Растворы оснований	7...10
Растворы солей	6...7

С увеличением показателя pH концентрация ионов водорода увеличивается, снижается электропроводность электролита, плотность тока падает, производительность процесса ЭХО снижается, растворение обрабатываемой поверхности детали замедляется, наблюдается рост шероховатость поверхности. Для обработки нержавеющей и инструментальных сталей показатель pH поддерживают в пределах 7...8. Для обработки жаропрочных сплавов показатель pH поддерживают в пределах 7...9. [20]

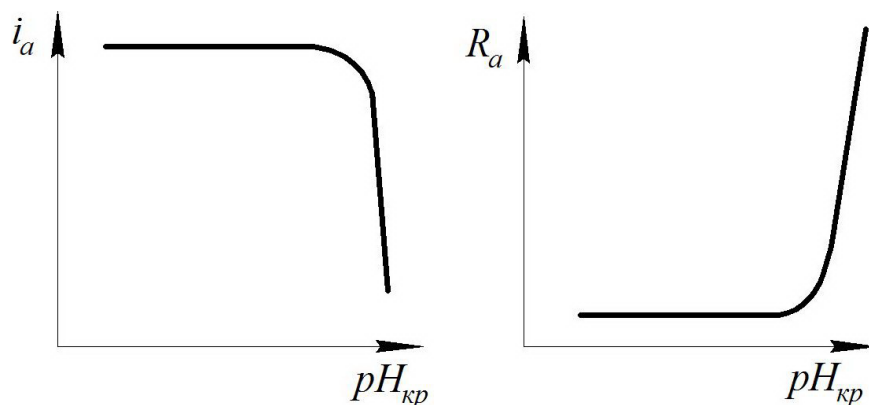


Рисунок 30 - Влияние значения pH электролита NaCl на показатель плотности тока i и шероховатости обрабатываемой поверхности R_a

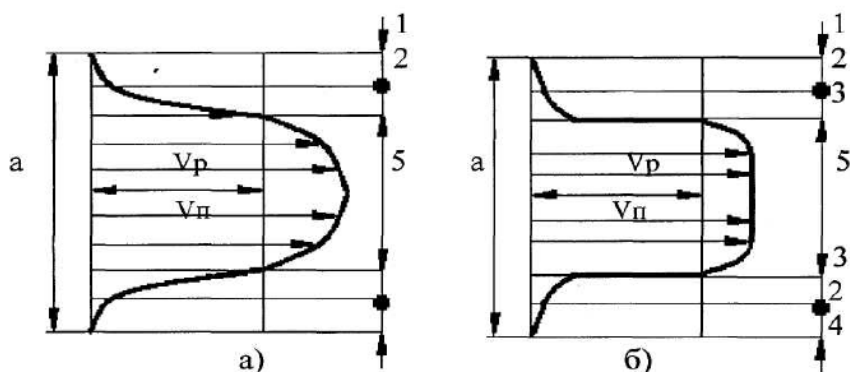
Растворы электролитов, имеющие показатель $pH > 7$ обладают щелочными свойствами. Растворы электролитов, имеющие показатель $pH < 7$ обладают кислотными свойствами. При $pH = 7$ растворы электролита нейтральны. [21] Для стабилизации показателя pH снижение защелачивание электролита производят подкисление и буферирование раствора электролита (добавление специальных добавок при приготовлении электролита). Буферным действием электролита называют способность электролита противодействовать изменению pH [17]. Буферную емкость электролита можно рассчитать по формуле:

$$\beta = \frac{d_x}{d \text{ pH}} \quad (2.33)$$

где d_x – количество добавленного реактива.

В качестве буферных веществ могут быть использованы борная кислота, лимонная кислота и др. В движущемся электролите под давлением в межэлектродном зазоре между анодом и катодом происходят различные гидродинамические процессы. Гидродинамические режимы, проходящие в межэлектродном зазоре должны обеспечивать стабильный электрохимический процесс, обеспечивающее растворение материала заготовки, отвода тепла, удаление продуктов растворения из межэлектродного зазора. Растворение электролитов в воде увеличивает вязкость раствора, при изменении температуры раствора влечет за собой изменение вязкости. Изменение вязкости влияет на гидродинамические

процессы, проходящие в межэлектродных зазорах и результат электрохимической обработки. Рассмотрим особенности течения жидкости в малых межэлектродных зазорах на границе жидкости и твердого тела. Возле электродов возникает тонкий поверхностный квазитвердый слой жидкости гидродинамические свойства, которого отличаются в связи с молекулярным и электростатическим взаимодействием твердого тела на жидкость.



а – ламинарный поток; б – турбулентный поток.

1,4 - электроды; 2 – квазитвердый слой жидкости; 3 – ламинарная область; 5 – турбулентная область; V_p - скорость электролита в межэлектродном зазоре; а – межэлектродный зазор

Рисунок 31 - Схема движения электролита

Течение жидкости при электрохимической обработке в межэлектродном зазоре характеризуется безразмерным числом Рейнольдса:

$$R_e = \frac{V_p a}{\nu} \quad (2.34)$$

где V_p - средняя скорость электролита; a – межэлектродный зазор, мм; ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/сек.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.35)$$

где η – динамический коэффициент вязкости, Па · с; ρ – плотность жидкости, г/см³.

Средняя скорость движения электролита V_p , межэлектродный зазор a ,

кинематический коэффициент вязкости ν , непостоянны по всей длине межэлектродного зазора то возможно существование двух потоков ламинарного и турбулентного. От значения Рейнольдса Re зависит характер течения жидкости в межэлектродном промежутке ламинарный или турбулентный. Режим течения жидкости ламинарный при $Re < 1000$, промежуточный режим при $1000 < Re < 2000$, турбулентный $Re > 2000$ [19].

Турбулентный режим характеризуется скоростью пульсаций изменяющейся в межэлектродном зазоре:

$$V_{\Pi} = \frac{0,4R_e^{0,25}}{V_p} \quad (2.36)$$

где R_e – безразмерное число Рейнольдса; V_p - средняя скорость электролита.

Наличие невысокой скорости прокачки электролита в межэлектродном промежутке способствует появлению в межэлектродном зазоре плотных слоев продуктов растворения. Это приводит к снижению процесса съема металла, точности обработки, изменению температуры в межэлектродном зазоре вязкости и электропроводности электролита. Поэтому одним из основных гидродинамических условий оптимизации процесса анодного растворения является выбор такой скорости, давления, вязкости электролита которое обеспечит своевременное обновление электролита и выноса продуктов растворения. Для успешного осуществление электрохимического процесса значительную роль играет скорость электролита, обеспечивающая вынос из межэлектродного зазора продуктов растворения, удаление которых влияет на скорость анодного растворения материала и стабилизации показателя pH.

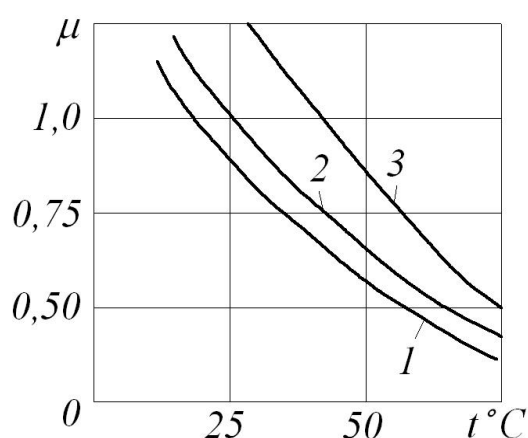
Скорость течения электролита в межэлектродном зазоре можно найти по формуле:

$$V_{\text{э}} = \frac{i^2 l_p}{\chi c \rho_{\text{э}} \Delta T} \quad (2.37)$$

где i – плотность тока, A/cm^2 ; l_p – длина рабочей части электрода инструмента, см; χ – удельная электропроводность проводящая способность

электролита, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; c – удельная теплоёмкость электролита, $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$; ρ_3 – плотность электролита, г/см^3 ; ΔT – разность температур электролита на выходе из зазора и на входе в него, $^{\circ}\text{C}$.

В процессе прохождения тока через межэлектродный зазор выделяется теплота, что способствует увеличению температуры электролита. Изменение температуры влечет за собой изменение вязкости. Скорость движения ионов возрастает, электропроводность электролита повышается. Плотность тока в межэлектродном промежутке увеличивается, и скорость растворения материала заготовки возрастает.



1- Вода; 2 – Раствор NaCl 3%; 3 – Раствор NaCl 12%

Рисунок 32 - Зависимость вязкости от температуры

Температура электролита является одним из важнейших факторов влияния поведение растворения материала заготовки. При температуре электролита свыше 40°C электрохимическое растворение происходит легче. Различия между разными температурами влечет за собой изменение скорости ионного обмена. При низких температурах вязкость выше скорость ионного обмена ниже, следовательно, продолжение электрохимического растворения становится трудным [41].

Выбор электролита является сложной задачей один из основных составляющих процесса ЭХО способствующей эффективному прохождению электрохимического процесса.

2.7 Инструмент-электрод для электрохимического полирования рабочих поверхностей.

Изобретение может применяться для электрохимического полирования деталей, штампов, сложной геометрической формы и относиться к процессу электрохимической обработки. Конструкция электрода инструмента состоит из короба, к которому крепится модель из неметаллического твердого стойкого материала к воздействию электролита, на наружной поверхности короба закреплена металлическая безычеистая сетка. Безычеистая сетка подкачена к отрицательному полюсу источника питания. В основании корпуса установлены регулировочные винты, штифты, позволяют сформировать зазор между обеспечивающие установку между моделью и заготовкой. Модель изготавливается по поверхности мастер-модели. Мастер-моделью является обрабатываемая заготовка, с учетом размера межэлектродного зазора предназначенного для прокачки электролита и диаметра безычеистой сетки. На дне короба размещаем резонатор комплексных колебаний, выполненный пустотелым с винтовыми пазами один конец которого жёстко закреплен на дне корпуса, а на другом смонтирована прямоугольная плита с зазором относительно электромагнитного вибратора, закрепленного на корпусе соосно с осью волновода, на вход которого подключен выход усилителя мощности, а на вход последнего подключен выход с генератора частот. Предлагаемое изобретение позволит сэкономить металл при изготовлении инструмента-электрода сложной формы, позволяет, повысит производительность труда, качество обрабатываемой поверхности, а так же проводить электрохимическую обработку поверхности деталей сложной формы с равномерным межэлектродным зазором который обеспечит оптимальную скорость съема металла и точность формообразования.

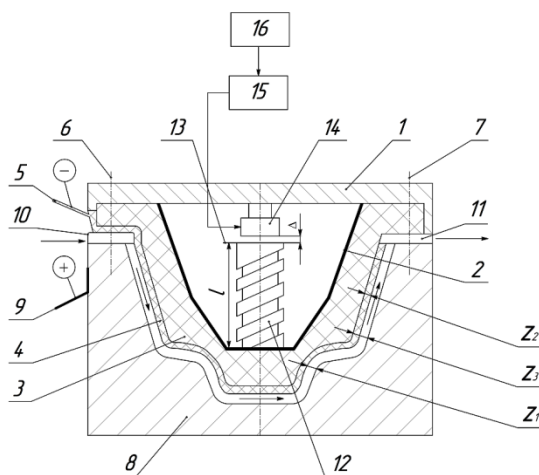


Рисунок 33 – Конструктивная схема электрода - инструмента

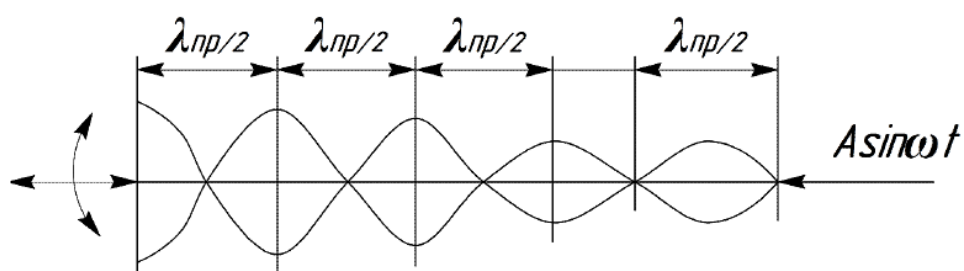


Рисунок 34 – Форма продольных колебаний

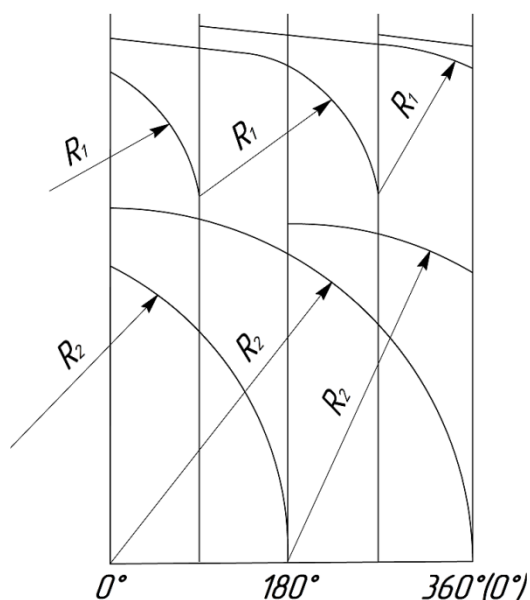


Рисунок 35 – Разметка винтовых пазов волновода

Для полирования деталей с поверхностью сложной геометрической формы был разработан электрод-инструмент который, содержит корпус с пустотелым коробом на наружной поверхности которого смонтирована металлическая

безячеистая сетка отличающийся тем, что на дне короба установлен волноводный резонатор комплексных колебаний, выполненный пустотелым с винтовыми пазами, один конец которого жестко закреплен на дне корпуса короба, а на другом смонтирована прямоугольная плита с зазором относительно электромагнитного вибратора, закрепленного на корпусе соосно с осью волновода, на вход которого подключен выход усилителя мощности, а на вход последнего подключен выход с генератора частот.

Представленной изобретение может использоваться в процессах, в которых происходит электрохимическое растворение металлов полирование поверхностей сложной формы, имеющих сложный профиль, т.е. представляют собой совокупность сложных геометрических поверхностей выпуклых, вогнутых, сферических, цилиндрических, конических и плоских участков.

Задачей изобретения является применения на операциях электрохимического полирования электрода-инструмента со сложной поверхностью. Эту задачу можно решить с помощью разработки конструкции инструмента-электрода предназначенного для электрохимического полирования деталей со сложной геометрической формой. Электрод-инструмент содержит корпус с пустотелым коробом, на наружной поверхности которого смонтирована металлическая безячеистая сетка отличающееся тем, что на дне короба установлен волновод резонатор комплексных колебаний, выполненный пустотелым с винтовыми пазами, один конец которого жестко закреплен на дне короба, а на другом смонтирована прямоугольная плита с зазором относительно электромагнитного вибратора, закрепленного на корпусе соосно с осью волновода, на вход которого подключен выход усилителя мощности, а на вход последнего подключен выход с генератора частот.

Наличие в конструкции электрода инструмента пустотелого короба на котором крепиться модель из отвердевшего материала стойкого к воздействию электролита позволяет снизить расход металла для изготовления электрода инструмента . снизить затраты на изготовление и уменьшить массу инструмента – электрода . что повышает технологичность конструкции инструмента. Безячеистая

сетка подключенная к отрицательному полюсу источника питания монтируется на наружной поверхности модели, обеспечивает изготовление электрода инструмента любой формы. Равномерный зазор, сформированный между электродом – инструментом и деталью обеспечивает качественный процесс электрохимического полирования.

Наличие в конструкции корпуса электрода-инструмента штифтов и регулировочных винтов обеспечивает равномерную установку межэлектродного зазора между инструментом и деталью.

Обрабатываемая поверхность детали является мастер - моделью для изготовления модели инструмента с учетом диаметра безычеистой сетки и межэлектродного зазора. Что позволяет сформировать равномерный межэлектродный зазор по всей сложной поверхности между инструментом и деталью.

Оснащение инструмента-электрода вибратором и волноводом комплексных колебаний (продольных и крутильных) позволяет противодействовать отрицательному воздействию продуктов анодного растворения достичь оптимальной скорости съема металла и точность формообразования. Что позволяет использовать зазоры меньшего размера и соответственно, обеспечить более точные границы обработки.

Комплексные колебания инструмента-электрода высокой частот в электролите вызывают явление кавитации между катодом и обрабатываемой заготовкой, которая вытесняет обломки, что позволяет на больших площадях обрабатываемой поверхности выполнять электрохимическое полирование с меньшими межэлектродными зазорами, не требуя высоких уровней тока из-за блокирующего эффекта пузырьков. Благодаря эффекту кавитации происходит удаление пленки оксида металла и тем самым обеспечивается более интенсивный процесс электрохимической обработки на окисленных металлах.

Зацепление нижнего торца волновода в нижней части корпуса инструмента-электрода позволяет оптимально провести настройку на резонанс его продольных или крутильных колебаний.

Предлагаемое изобретение иллюстрируется чертежами, где на рис. 31 показана конструктивная схема электрода - инструмента, на рис. 32 приведена форма продольных колебаний инструмента-электрода с указанием места приложения внешних сил воздействия и зоны пучности на торце волновода, на рис. 33 развертка для изготовления наклонных винтовых пазов волновода.

Устройство содержит пустотелый короб 2 который закреплен вертикально на корпусе 1. На пустотелом коробе 2 крепиться модель 3 состоящая из отвердевшего неметаллического материала (например, полиуретана), на наружной объемной поверхности которой смонтирована металлическая безячеистая сетка 4. Безячеистая сетка присоединена проводом 5 к отрицательному полюсу источника питания. В корпусе установлены регулировочные винты 7 и штифты 6 для выставления межэлектродного зазора и крепления корпуса. К положительному источнику питания через провод 9 подключена заготовка 8, между заготовкой 8 и корпусом 1 система каналов подвода 10 и отвода 11 электролита. На дне короба установлен волноводный резонатор на втором торце, которого закреплена плата 13. Во внутренней части короба на торце корпуса 1 закреплен электромагнитный вибратор 14, а на его вход подключен канал управления частотой последовательно соединенных усилителя 15 и генератора частот 16.

Длина волноводного резонатора 12 выбирается из условия обеспечения стабильности возбуждения, высокочастотных комплексных колебаний инструмента-электрода и по длине кратна полуволне продольных колебаний. Изготовление винтовых пазов с радиусом равным полуволне крутильных колебаний на длине равной полуволне продольных колебаний позволяет проводить возбуждение согласование и усиление на единой частоте.

Винтовые пазы рис. 35 выполняют с радиусом, равным длине полуволны крутильных колебаний и определяемым по формуле:

$$R = L_{\text{кр}} / 2 = C_{\text{сд}} / (2\omega_0), \quad (2.38)$$

где $L_{\text{кр}}$ – длина волны крутильных колебаний;

$C_{\text{сд}}$ – скорость распространения сдвиговых волн в стали;

ω_0 – собственная частота колебаний волнового резонатора,

при этом частота возмущений силы поступающей от электромагнитного вибратора равна собственной частоте корпуса короба 2 и инструмента-электрода. Паза имеют разные радиусы и располагаются последовательно, а ось симметрии начала одного паза повернута относительно симметрии другого на 90° для максимальной жесткости волнового резонатора паз с большим радиусом R фиг. 3 используется для меньшей частоты колебаний инструмента электрода.

Собственная частота корпуса короба 2 определяется по формуле:

$$\omega_k = 1/2\pi \sqrt{c/J_m}, \quad (2.39)$$

где J_m – момент инерции корпуса короба;

c – крутильная жесткость корпуса короба.

Устройство работает по следующему алгоритму: модель 3 на поверхности, которой закреплена безычеистая сетка 4, устанавливается на поверхности заготовки 8. Используя регулировочные винты 7 и штифты 6 выставляем межэлектродный зазор между поверхностью заготовки 8 и моделью 3.

Заготовка 8 является мастер-моделью для модели 3. На поверхность заготовки 8 наносим тонким слоем силиконовую жидкость. Корпус 1 с кожухом 2 с помощью штифтов 6 устанавливаем на торце заготовки 8 без зазора. Объем между пустотелым кожухом 2 и внутренней поверхностью матрицы 8 заполняем эпоксидной смолой с отвердителем стойким к воздействию электролита.

После затвердевания мы получаем электрод-инструмент состоящий из модели 3, пустотелого кожуха 2, и корпуса 1 пространственно сложная поверхность которого обрабатывается на фрезерном станке. Глубина снимаемого поверхностного слоя электрода-инструмента равна величине z_3 , которая включает величину зазора z_1 предназначенного для прокачки электролита, требуемый для процесса электрохимического полирования ($0,2...2$ мм), и глубине z_2 равной диаметру безычеистой сетки ($0,5...1$ мм). Проволока сетка изготавливается из меди, коррозионностойкой стали и т.д. безычеистая сетка изготавливаются по форме объемной конфигурации обрабатываемой поверхности. Сетку соединяют с отрицательным источником питания с помощью пайки.

На заготовку 8, после прохождения механической обработки и шероховатость

поверхности которой не соответствует требованиям на чертеже устанавливают на штифты 7 модуль-пуансон с зазором z_3 с помощью регулировочных винтов 6. В межэлектродный зазор между моделью 3 и поверхностью заготовки 8 подают электролит. В качестве электролита чаще всего используют водные растворы солей, кислот, щелочей и т.д.

Заготовку 8 соединяют через провод 9 с положительным источником питания. процесс электрохимического полирования стационарный. Инструмент-электрод находится неподвижно относительно заготовки. Конструкция электрода инструмента обеспечивает равномерный межэлектродный зазор между поверхностью инструмента и заготовкой.

Используем в качестве электролита водный раствор (NaCl) при растворении которого в воде происходит химическая реакция, образуются отрицательные ионы хлора (анионы) Cl⁻ и положительные ионы натрия Na⁺ (катионы).

Далее волноводный резонатор 12 настраивают на резонансный режим относительно переменной возбуждающей силы от электромагнитного вибратора 14 который установлен с зазором Δ относительно пластины 13 жестко закрепленной на верхнем торце волноводного резонатора 12 с винтовыми пазами. Происходит закручивание корпуса короба 2 под действием внешней силы создаваемой электромагнитом 14, а за счет упругой усадки волноводного резонатора 12 происходит продольное смещение корпуса короба. Электрод-инструмент совершает комплексные колебания. При включении напряжения между обрабатываемой поверхностью и инструментом электродом возникает постоянный ток в электролите начинается процесс химической реакция.

Зазор, образующийся между электродом – инструментом и поверхность заготовки равномерный то процесс анодного растворения происходит равномерно по всей поверхности детали. Введение в процесс ЭХО комплексных колебаний повышает производительность и качество обрабатываемой поверхности. Электролит прокачивают в процессе электрохимического полирования для удаления продуктов растворения и получения качественной поверхности. Для уменьшения скорости образования коррозии и повышение степени защиты обрабатываемых деталях в

электролит добавляют ингибиторы коррозии. После завершения процесса анодного растворения поверхности детали полированную поверхность детали промывают водой для этого, инструмент-электрод снимают с заготовки 8 с помощью штифтов.

3. Конструкция электрода инструмента и приспособления

3.1 Расчет собственных колебаний волновода резонатора с помощью программы ANSYS.

В рамках данной работы проводится анализ собственных колебаний волновода. Расчеты проводятся в конечно-элементном (КЭ) комплексе ANSYS v18.1 Workbench. Модель волновода строилась в стороннем комплексе с последующим устранением ошибок при помощи встроенного в ANSYS пакета прямого моделирования ANSYS Space Claim [37].

Волновод моделируется изготовленным из стали марки 35КФ10Н характеристики, которой сведены в таблицу 15.

Таблица 15 – характеристики стали марки 35КФ10Н

	Плотность	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона
Единицы измерения	кг/м ³	Па	-
35КФ10Н	7850	2.0E+11	0.3

Общий вид исследуемой конструкции представлен на рисунке 36.

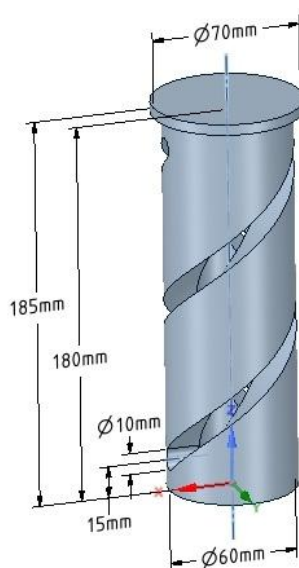


Рисунок 36 – Общий вид исследуемой конструкции

Для формирования КЭ модели используются твердотельные параболические элементы SOLID186, имеющие до 20 узлов с 3 степенями свободы в каждом (3 линейных перемещения). Общий вид используемых КЭ представлен на рисунке 2.

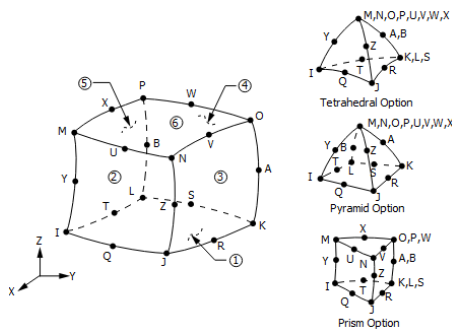


Рисунок 37 – Общий вид твердотельных КЭ SOLID186

Суммарное количество элементов – 55595, узлов – 84727. Общий вид полученной КЭ модели представлен на рисунке 38.

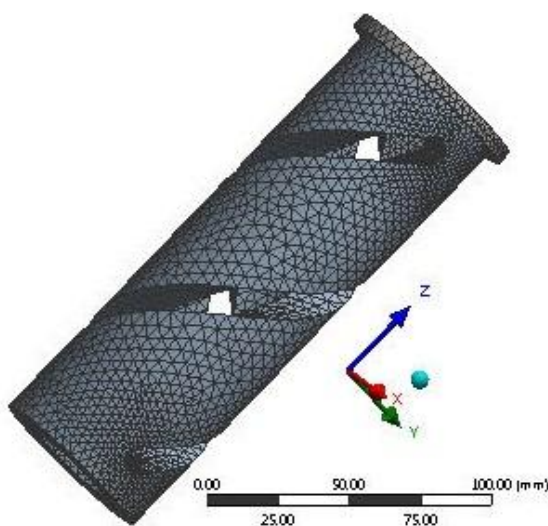


Рисунок 38 – Полученная КЭ модель

В рамках данной работы определялись первые шесть собственных частот колебаний и соответствующие им формы колебаний. При проведении модального анализа без учета закреплений первые шесть получаемых собственных форм колебаний соответствуют шести возможным перемещениям в пространстве (3 перемещения и 3 угла поворота), а соответствующие им собственные частоты приблизительно равны нулю. Таким образом, интересные частоты и формы колебаний начинаются с седьмой.

На рисунках 39 – 44 представлены полученные формы колебаний. Значения

собственных частот сведены в таблицу 16.

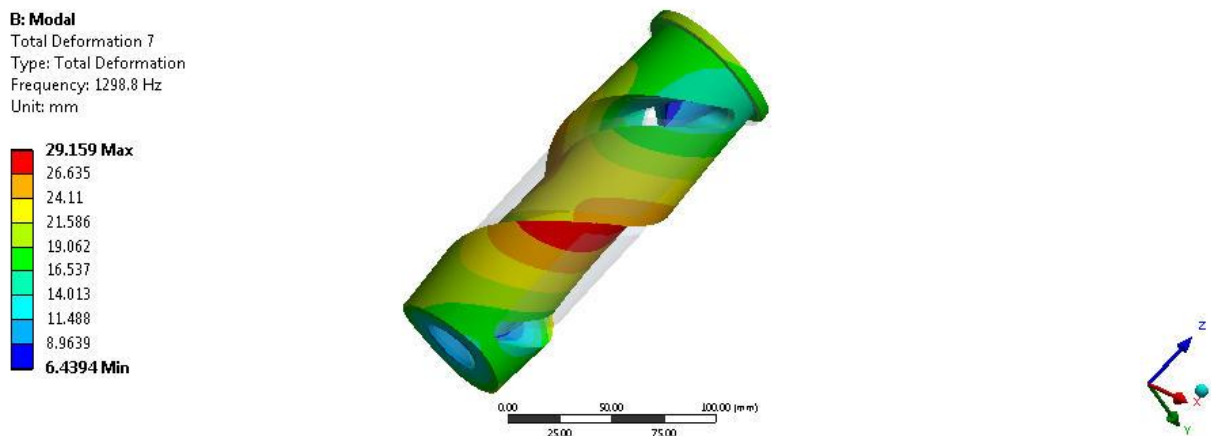


Рисунок 39 – Форма колебаний на 1 собственной частоте

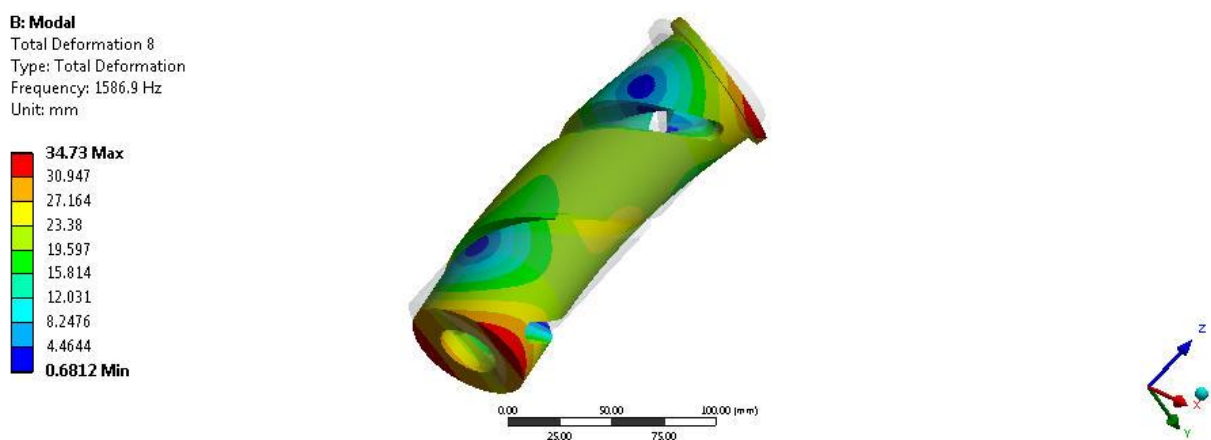


Рисунок 40 – Форма колебаний на 2 собственной частоте

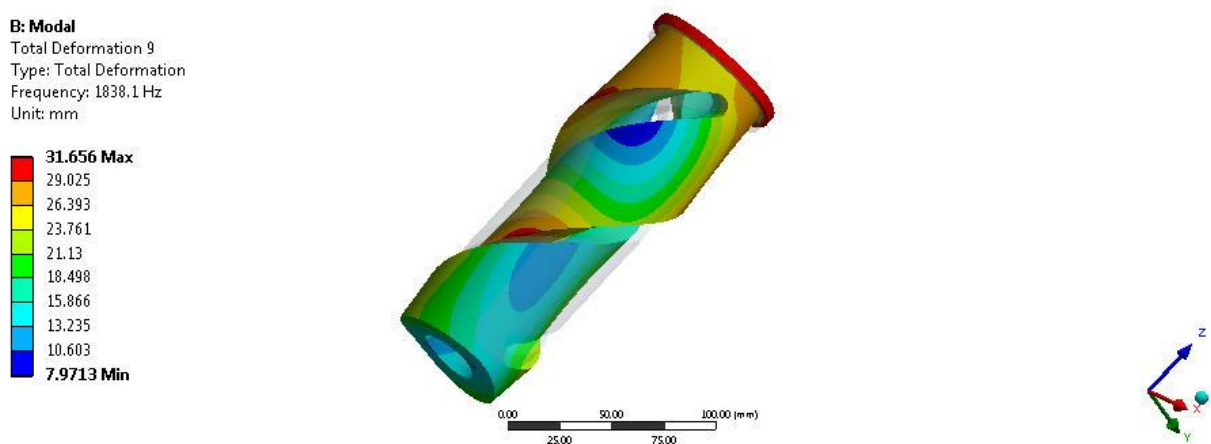


Рисунок 41 – Форма колебаний на 3 собственной частоте

B: Modal
Total Deformation 10
Type: Total Deformation
Frequency: 1858.4 Hz
Unit: mm

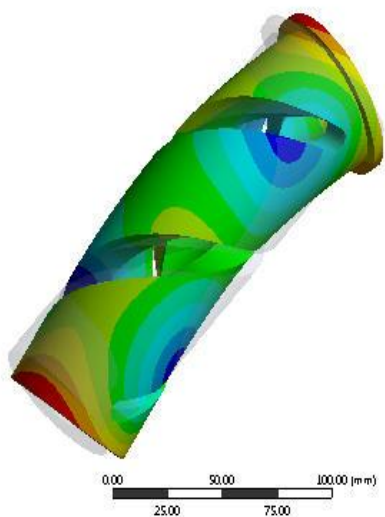
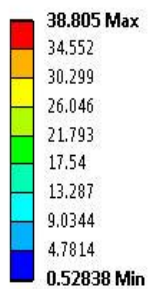


Рисунок 42 – Форма колебаний на 4 собственной частоте

B: Modal
Total Deformation 11
Type: Total Deformation
Frequency: 1914.2 Hz
Unit: mm

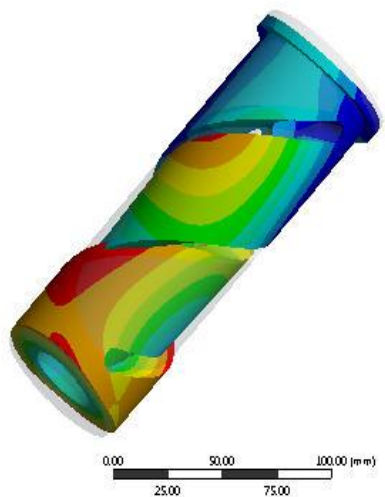
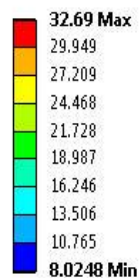


Рисунок 43 – Форма колебаний на 5 собственной частоте

B: Modal
Total Deformation 12
Type: Total Deformation
Frequency: 2416.4 Hz
Unit: mm

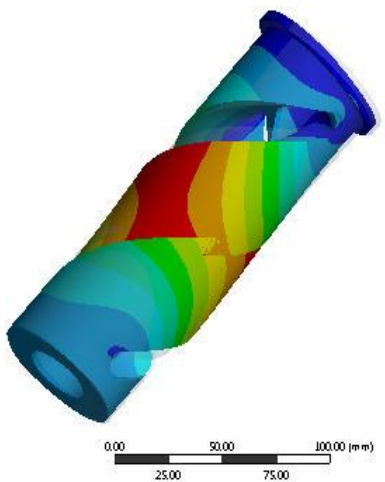
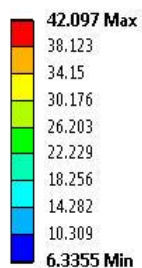


Рисунок 44 – Форма колебаний на 6 собственной частоте

Таблица 16 – Полученные собственные частоты

Форма колебаний	Частота, Гц
1	1298.8
2	1586.9
3	1838.1
4	1858.4
5	1914.2
6	2416.4

3.2 Конструкция установки для электрохимического полирования.

Форма и частота поверхности штампов формируют размеры и частоту изготавливаемых в них деталей. Погрешности деталей, из которых изготавливают штампы их шероховатость, влияют на качество изготавливаемых деталей. Следовательно, требования к качеству поверхности шероховатости и точности являются повышенными. В первую очередь повышенные требования предъявляются к пуансону и матрице. По своему назначению и условиям эксплуатации матрица и пуансон являются наиболее нагруженными и ответственными деталями штампов и пресс форм. Эксплуатационные свойства матрицы и пуансона зависят от материала, из которого они изготовлены. Для изготовления рабочих деталей штампов матриц и пуансонов используют специальные инструментальные штамповые стали 5ХНМ, 5ХНТ, 5ХГНМ, Х12М, Х12Ф и др. а также чугун марки ХФ и ХРТД. [23] Такие стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, и прочностью в сочетании с достаточной вязкостью. Химический состав и марки сталей, применяемые для изготовления пуансонов и матриц приведены в таблице 17.

Таблица 17 - Химический состав сталей

Марка Стали	Химический состав, %							Влияние легирующего элемента
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	
5ХНМ	0,5	0,6	0,3	0,7	1,6	0,3	-	Хром повышает износостойкость, увеличивает прочность и прокаливаемость стали. Молибден увеличивает вязкость и прокаливаемость стали. Кремний повышает стойкость стали после отпуска. Марганец в сочетании с хромом уменьшает коробление при закалке.

Продолжение таблицы 17

Марка Стали	Химический состав, %							Влияние легирующего элемента
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	
5ХНМ	0,5	0,6	0,3	0,7	1,6	0,3	-	Хром повышает износостойкость, увеличивает прочность и прокаливаемость стали. Молибден увеличивает вязкость и прокаливаемость стали. Кремний повышает стойкость стали после отпуска. Марганец в сочетании с хромом уменьшает коробление при закалке. Ванадий уменьшает хрупкость стали, предохраняет сталь от перегрева при закалке.
5ХГМ	0,5	1,5	0,5	0,8	-	0,3	-	
5ХГНМ	0,5	1,5	0,3	0,7	1,6	0,3	-	
Х12Ф	1,4	0,3	0,3	12,0	-	-	0,8	
Х12М	1,6	0,3	0,3	12,0	-	0,5	0,2	

Таблица 18 - Механические свойства штамповых сталей

Марка стали	Предел прочности σ_B [МПа]	Предел текучести σ_T [МПа]	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Твердость HRC	Термообработка
5ХГМ	1570	1450	9	26	47-52	Закалка 850°C масло, отпуск 450°C, 2ч.
5ХНМ	1570	1420	9	35	42-47	Закалка 850°C масло, отпуск 460°C - 520°C, 2ч.
5ХГНМ	1280	1050	11	45	51-55	Закалка 860°C масло, отпуск 190°C, 2ч.

В качестве материала используемого в изготовления рабочей части матрицы штампа используют чугуны марки ХФ, ХРТД с твердостью 217 -269 НВ. Матрица предназначена для изготовления усилителя нижней центральной стойки на автомобиль Х52.

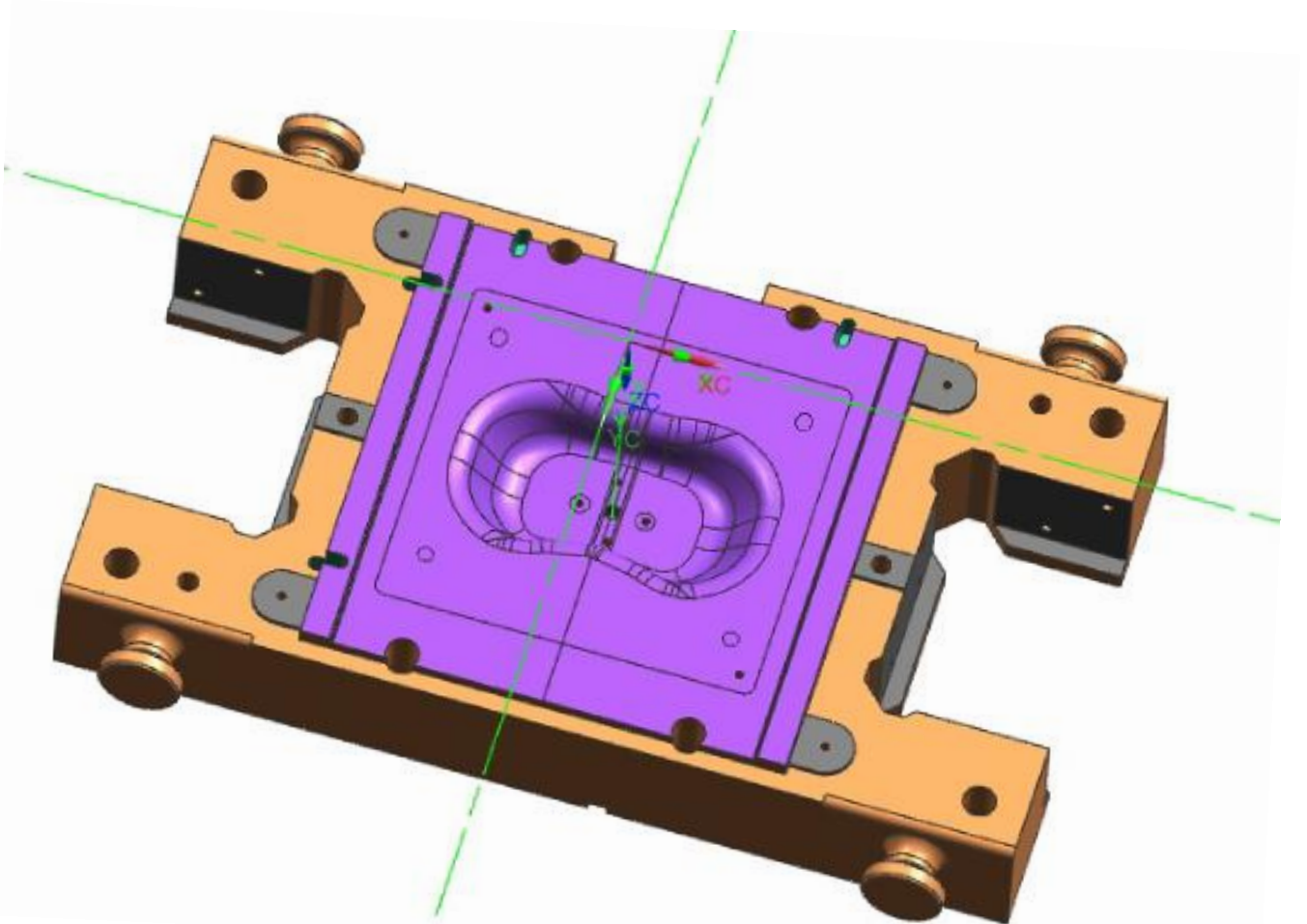


Рисунок 45 - Матрица для изготовления усилителя нижней центральной стойки для автомобиля Х52

Общие требования к отливкам из чугуна изготовленных в литейном цехе 15\1 металлургического производства ПАО «АВТОВАЗ» по СТП 37.101.0028.

Таблица 19 - Химический состав чугуна ХФ, ХРТД.

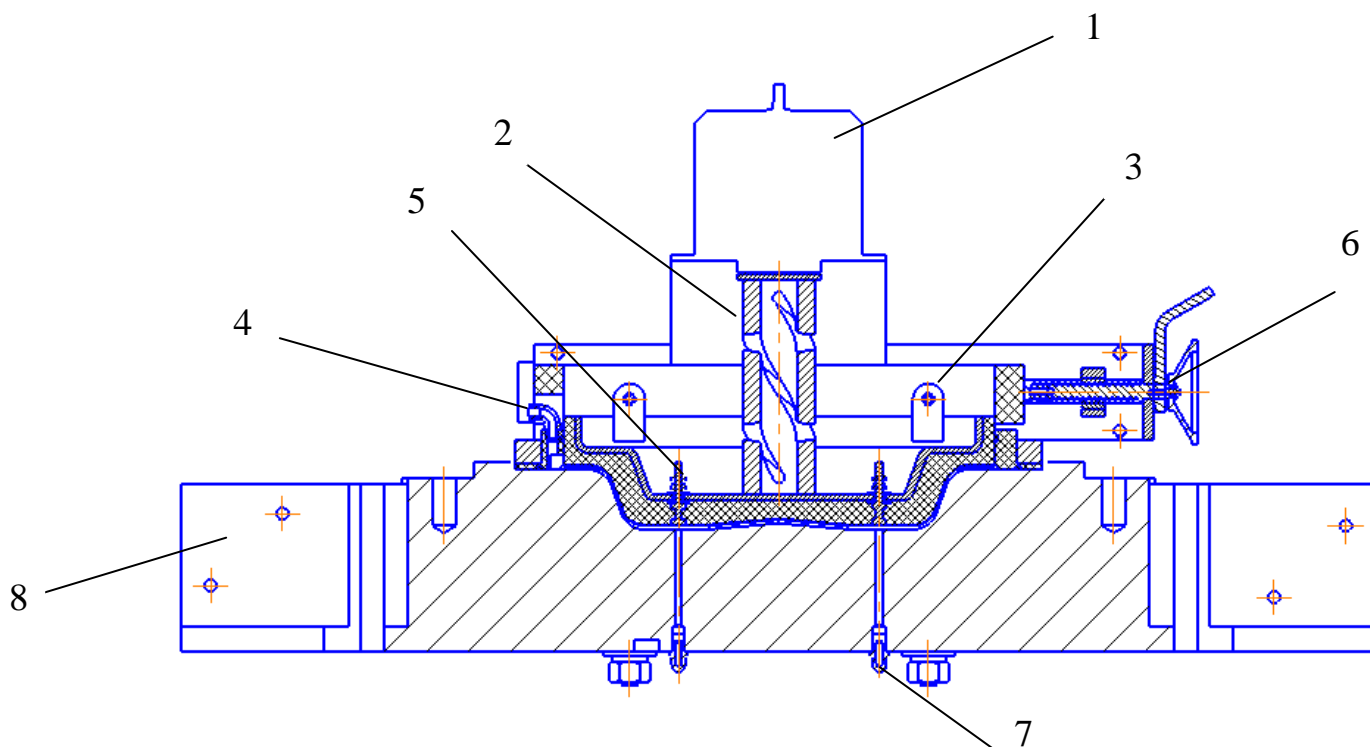
Марка чугуна	Массовая доля элемента, %									
	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор	Сера не более	Хром	Никель	Медь	Ванадий	Титан
ХФ	2,9 - 3,1	0,6 - 0,9	1,6 - 1,8	0,12	0,12	0,3 - 0,5	-	-	0,2 - 0,3	0,05 - 0,1
ХРТД	2,7 - 3,0	0,6 - 0,9	1,55 - 1,75	0,8 - 1,0	0,12	0,25 - 0,4	0,8 - 1,2	0,1 - 0,15	-	0,05 - 0,1

Таблица 20 - Механические свойства чугуна ХФ, ХРТД.

Марка чугуна	Предел прочности σ_b [МПа]	Твердость НВ
ХФ	255	207 - 255
ХРТД	265	217 - 269

Одна из основных операций при изготовлении штампов и пресс форм и получения высокого класса чистоты поверхности является шлифование. Операции шлифование применяется как для предварительного шлифования, так и для чистовой обработки рабочей поверхности штампа после которой штамп готов к эксплуатации. В процессе шлифования поверхности штампа изготовленных из закаленной стали, чугуна или твердого сплава могут образоваться микротрещины и прожоги шлифуемой поверхности причиной которых является перегрев шлифуемой поверхности при шлифовании. Трещины снижают механическую прочность, что приводит к усталостному разрушению, потере ударной вязкости. Прижоги могут возникнуть при шлифовании поверхности штампа кругами высокой твердости. [24] В качестве метода исключаящий механическое воздействие на при обработке на рабочую поверхность штампа предлагается электрохимическая обработка с помощью электрода инструмента.

Электрод инструмент разработан для электрохимической обработки рабочей поверхности штампа. Электрод инструмент монтируется на рабочей поверхности штампа. Конструкция состоит из электромагнитного вибратора 1, который воздействует на волноводный резонатор. Электрод инструмент 2 совершает комплексные колебания, приводящие к изменению межэлектродного зазора, повышение плотности тока, изменение которого влияет на качество обрабатываемой поверхности.

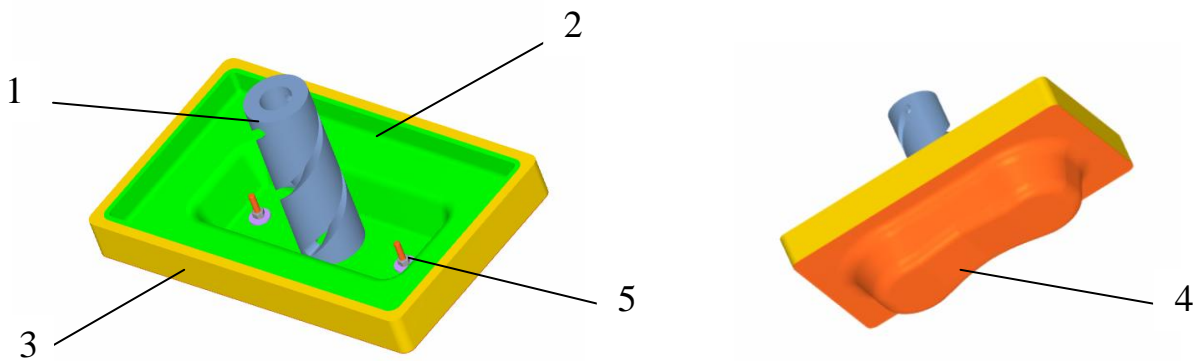


1 - Электромагнитный вибратор; 2 – Электрод инструмент в сборе; 3 - Петля крепления электрод инструмента к рамке; 4 – Штуцер для подвода электролита; 5 – Контакт; 6 – Колесо для регулирования межэлектродного зазора; 7 – Штуцер для отвода электролита; 8 – Штмп

Рисунок 46 - Общая схема конструкции

Электрод инструмент 2 перемещается по вертикали относительно штампа 8 с установлением межэлектродного зазора между электродом инструментом и штампом при помощи колеса для регулирования межэлектродного зазора 6. Отрицательный провод источника питания подсоединяется к контактными стержням 5. Штмп 8 присоединяется к положительному полюсу источника питания. Подвод электролита в межэлектродный зазор осуществляется через штуцер 4. Отвод электролита осуществляется через штуцер 7.

Для электрохимического полирования рабочей поверхности штампа предлагается конструкция электрод инструмента представленная на рисунке 47.



1 – Волновод резонатор; 2 – Короб; 3 - Модель из полиамида; 4 – Медное покрытие; 5 – Контакты

Рисунок 47 - Электрод инструмент для электрохимической обработки

Электрод инструмент состоит из волноводного резонатора. В качестве материала для изготовления волновода резонатора выбираем сплав прецизионный магнитно – твердый 35КФ10Н по ГОСТ 10994 – 74. Химический состав сплава представлен в таблице 21.

Таблица 21 Химический состав сплава 35КФ10Н

В процентах

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	V	Co
48.4 - 52.7	0.06	0.3	0.4	9.5 - 10.5	0.02	0.02	3.5 - 4.5	34.3 - 35.8

Материал, в основе которого сплав железа, никеля и кобальта. Железо, никель и кобальт характеризуются высокой магнитной проницаемостью, т.е. обладают ферромагнетизмом. Магнитно твердый сплав обладает большим значением напряженности магнитного поля в веществе [25]. Интенсивность намагничивания называется магнитной проницаемостью [26].

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (3.1)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; B – магнитная индукция материала, Тл; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Нормальная магнитная проницаемость μ имеет вид:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3.2)$$

где B – магнитная индукция материала, Тл; μ_0 – магнитная постоянная равная 1,257 мкГн/м; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Для изготовления корпуса выбрана углеродистая качественная полуспокойная сталь 08пс лист толщиной 5 мм. На дне корпуса просверлены два отверстия диаметром 10 мм, предназначенные для установки контактов. Материал обладает хорошими механическими, технологическими, физическими характеристиками и параметрами твердости. Выбранный материал обладает хорошей свариваемостью [27].

Таблица 22 - Механические свойства стали 08 пс

Марка стали	Массовая доля углерода, %	Предел прочности σ_B [МПа]	Относительное удлинение δ_5 %	Относительное сужение ψ %	Твердость НВ
08пс	0,05 - 0,12	295 - 330	33	60	131

Таблица 23 - Физические свойства стали 08 пс

Марка стали	Модуль упругости первого рода, $E \cdot 10^{-5}$ [МПа]	Коэффициент температурного расширения, $\alpha \cdot 10^6$ [1/град]	Коэффициент теплопроводности, λ [Вт/(м град)]	Плотность стали, ρ [кг/м ³]	Удельная теплоемкость стали, C [Дж/(кг град)]	Удельное сопротивление, $R \cdot 10^9$ [Ом м]
08пс	2,06	12,5	60	7846	482	178

Низкоуглеродистая сталь 08кп обладает высокой пластичностью, что позволяет изготовить корпус штамповкой. Толщина металла корпуса 5 мм корпус получаем вытяжкой. Соединение элементов конструкции волновода резонатора и корпуса осуществляем с помощью дуговой сварки в среде CO₂ по ГОСТ 14771 – 76 [30]

Таблица 24 - Тип сварного соединения волновода и короба


Тип соединения	Форма подготовленных кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения		Толщина свариваемых деталей b , мм, для способов сварки			Условное обозначение сварного соединения
			Подготовленных кромок	Выполненного шва	ИНп	ИП	УП	
Тавровое	Без скоса кромок	Односторонний			0,8 - 40			T1

Таблица 25 - Конструктивные элементы сварного соединения

Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		Способ сварки	s , мм	b , мм	
	подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения			Номинал	Предельное отклонение
T1			ИНп, ИП, УП	6,0 - 20,0	0	+ 1,5

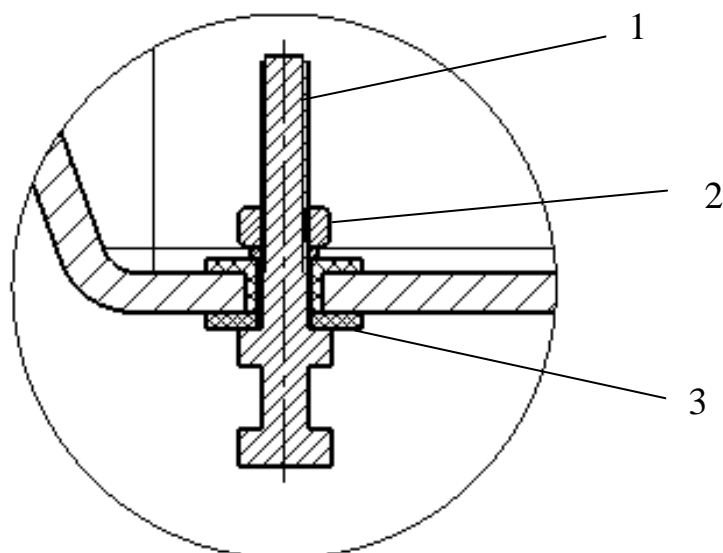
В отверстия короба устанавливаются контакты, предназначенные для крепления минусового провода источника питания. Крепление контактов осуществляется при помощи гаек. Контактный стержень выполнен из медного прутка ДКРНТ 12 НД марки М1 по ГОСТ 1535 – 2005. Пруток холоднокатаный, круглый, нормальной точности изготовления, твердый диаметром 12 мм. Медь обладает высокой электропроводностью и коррозионной стойкостью [31].

Таблица 26 - Химический состав меди марки М1 [32].

Обозначение марки	Массовая доля элемента, %										
	медь + серебро не менее	Примесей, не более									
		Висмут	Железо	Никель	Цинк	Олово	Сурьма	Мышьяк	Свинец	Сера	Кислород
M1	99,9	0,001	0,005	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004	0,05

Таблица 27 - Механические свойства меди марки М1.

Обозначение марки	Предел прочности σ_B [МПа]	Относительное удлинение δ_5 %	Твердость НВ
М1	270	8	70

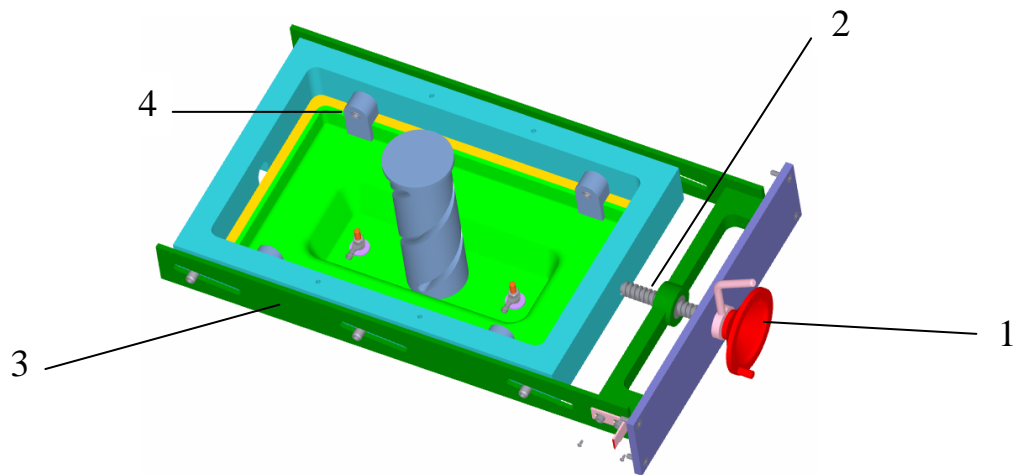


1 – Контакт; 2 – Гайка крепления; 3 – Изолятор

Рисунок 48 - Крепление контактов в коробе

В качестве электроизоляционного материала между контактом и коробом установлен электроизоляционный материал стержень текстолитовый высшего сорта диаметром 20 мм по ГОСТ 5385 – 74.

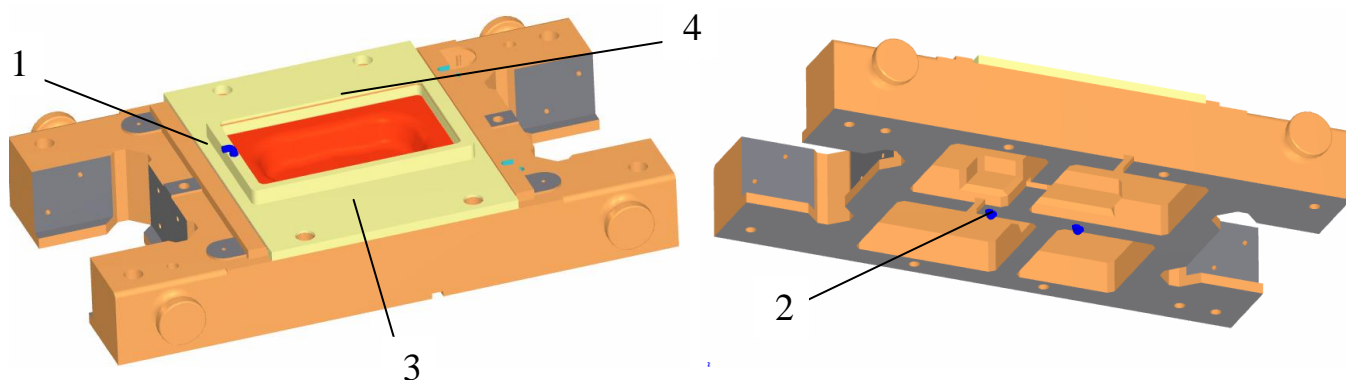
Модель 3 из полиамида покрывает короб 2 (рис.46) поверхность, которой обрабатывается по метамодели с эквидистантой – 0,5 мм. Модель 3 получаем методом отливки в матрице. В качестве материала выбираем полиамид ПА610 – Л литьевой полиамид, обладающий высокими механическими характеристиками и показателями электроизоляции. Полиамид ПА610 – Л стоек к воздействию органических растворителей, углеводородов, щелочей. Покрытие модели 3 медью толщиной 0,5 мм получаем электроосаждением. Перед осаждением меди на поверхности полиамида наносим электропроводный графитный слой называемый (подложкой) [35]. Для регулирования межэлектродного зазора разработано приспособление.



1 – Колесо; 2 – Регулировочный вал; 3 – Рамка; 4 – Петли в сборе с вибро втулками
 Рисунок 49 - Схема устройства регулирования межэлектродного зазора

В конструкцию приспособления для регулирования межэлектродного зазора входит колесо 1 при вращении, которого через регулировочный вал 2 происходит перемещение вибро компенсирующей рамки 3, к которой крепится электрода инструмент. Электрод инструмент крепится к вибро компенсирующей рамке с помощью петель 4.

Подвод электролита осуществляется в замкнутом контуре, что исключает попадание электролита на поверхность штампа.



1 – Штуцер для подвода электролита; 2 – Штуцер для отвода электролита; 3 –
 Направляющая; 4 – Манжета

Рисунок 50 - Схема подвода электролита

Электролит поступает в межэлектродный зазор через штуцер 1. Отвод электролита и продуктов растворения осуществляется через штуцер 2. Для исключения попадания на рабочую поверхность штампа электролита в конструкцию

направляющей изготовленной из материала Полиамид -12Б -20 входит манжета, которая крепится на клей герметик VA3 15 - 74.

Использование в процессе электрохимического полирования комплексных колебаний электрода инструмента с различной амплитудой и частотой влияет на величину межэлектродного зазора. Уменьшение межэлектродного зазора повышает плотность тока на вершинах микронеровностей, что увеличивает скорость растворения металла. Изменение плотности тока влияет на улучшение качества обрабатываемой поверхности. Увеличение плотности тока в межэлектродном зазоре повышает коэффициент выхода по току. Чем выше коэффициент выхода по току, тем меньше энергии затрачивается на удаление единицы массы материала. В процессе электрохимической обработки в межэлектродном зазоре образуются продукты растворения осадок гидроксид металла, который сильно влияет на качество электролита производительности и тем самым влияет скорость удаления материала. Для ускорения удаления продуктов растворения используется вибрация электрода инструмента. Вибрация с большей амплитудой электрода инструмента увеличивает скорость подачи электрода и ускоряет обновление электролита [43].

С увеличением межэлектродного зазора скорость прокачки электролита увеличивается и увеличивается скорость удаления продуктов растворения, отвод теплоты из межэлектродного зазора. Что позволяет оптимизировать технологические процессы электрохимической обработки и сделать их более стабильными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция электрода инструмента и оснастка для электрохимического полирования. В конструкцию электрод инструмента входит волноводный резонатор комплексных колебаний применение, которого позволяет повысить качество обрабатываемой поверхности и стабилизировать показатели технологического процесса электрохимической обработки.

В ходе работы были решены следующие задачи:

1. Проведено изучение процесса электрохимической обработки.
2. Разработана функциональная схема установки для электрохимической обработки.
3. Разработана конструкция электрода – инструмента для электрохимического полирования рабочих поверхностей.

При помощи электрода инструмента осуществляется электрохимическое полирование рабочих поверхностей сложной формы с равномерным межэлектродным зазором между электрод инструментом и обрабатываемой поверхностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Артамонов Б.А., Волков С.Ю., Дрожалова В.И., Седыкин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб.пособие (в 2-х томах). Т.1.Обработка материалов с применением инструмента / Под ред. В.П.Смоленцева. – М.: Высш.шк., 1983. – 247с.,ил.
2. Байсупов И.А., Волосатов В.А. Справочник молодого рабочего по электрохимической обработке.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа,1990 – 176с.: ил.
3. Байсупов И.А. Электрохимическая обработка металлов: Учебное пособие. – М.: Высш. школа,1981 – 152с., ил.
4. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. М. «Машиностроение». 1969 – 297с.
5. Заявка РФ 2015147153. МПК С25F7/00. Устройство для электрохимической обработки тел вращения [Текст] / О.И. Драчев, А.В. Бобровский, заявл. 02.11.2015.
6. А.с. СССР № 1710239, кл. В23Н 7/22.1992. Электрод - инструмент для электрохимической обработки / В.Н.Дмитриев, Г.В.Смирнов.
7. Попилов Л.Я Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400с., ил.
8. Патент РФ № 2338013, кл. С25F 7/00. 2008. Инструмент – электрод для электрохимического полирования пространственно сложных поверхностей / А.В. Сергеев, О.И.Драчев, Д.А.Сазонов.
9. Беренфельд В.В. Изготовление штампов: пер. с латыш. / Пер. Ю.К. Крутика. - М.: Машиностроение., 1984. - 192с., ил.
10. Подураев В.Н. Комалов В.С. Физико-химические методы обработки. М., «Машиностроение», 1973, 346с.
11. Артамонов Б.А. Вишницкий А.Л. Волков Ю.С. Глазков А.В. Размерная электрохимическая обработка металлов: Учеб. пособие для студентов вузов /

- Под ред. Глазкова А.В. – М.: Высш. Школа, 1978. – 336 с., ил.
12. Никифоров В.И. Электрофизические и электрохимические технологии. Лабораторный практикум: учеб. пособие / В.И. Никифоров, Ю.М. Барон, М.Т. Коротких. – СПб.: Изд – во Политехн. ун – та, 2011. – 198с.
 13. Пяндрин Т.Н. Электрохимическая обработка металлов.: Изд – во Государственное научно - техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. – 69с.
 14. Маркова Т.В., Крыжановская И.М. Шероховатость поверхности: Метод. указания. СПб.: Изд – во Политехн. ун – та, 2006. – 32с.
 15. Конакова И.П. Шероховатость поверхности и их практическое применение в программе КОМПАС: учебное пособие / И.П. Конакова, И.И. Пирогова. – Екатеринбург: Изд – во Урал. ун – та, 2014. – 104с.
 16. Попилов Л.Я. Справочник по электрохимическим и ультразвуковым методам обработки металлов. Л., Машиностроение, Табл. 278. Илл. 274. Библ. 369 назв., 1971г. - 544 с.
 17. Мороз И.И. и др., Электрохимическая обработка металлов. М., Машиностроение, 1969г. – 208с.
 18. Данько Е.Т., Чернов Б.Б. Электрохимия: учеб. пособие. – Владивосток: Мор. гос. ун – т, 2009. – 54с.
 19. Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., Полянчикова М.Ю., Тибиркова М.А., Сидякин Ю.И., Кожевникова А.А. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении: учеб. пособие. – ВолгГТУ, Волгоград, 2015. – 240с.
 20. Амитан Г.Л., Байсупов И.А., Барон Ю.М., и др.; Под общ. ред. Волосатова В.А. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд - ние, 1988. – 719 с.: ил.
 21. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков И.В. Способы обработки материалов: Учебное пособие / Калинингр. ун – т - Калининград, 2000. – 448с.
 22. Краснов К.С., Воробьев Н.К., Гордеев И.Н и др.; Физическая химия. В 2 кн. Кн. 2. Электрохимия. Химическая кинетика и катализ: Учеб. для вузов / Под

- ред. К.С.Краснова – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2001. – 319 с.: ил.
23. Малыгин Ф.К., Стариков Н.Е и др.; Технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов / Изд. 2-е испр. и доп. – Тула: Изд – во ТулГУ, 2015. – 243с.
 24. Мендельсон В.С., Рудман Л.И. Технология изготовления штампов и пресс форм. М.: «Машиностроение», 1971, стр.224.
 25. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544с.
 26. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение: Учебник для нач. проф. образования 5-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 352с.
 27. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784с.: ил.
 28. Сорокин В.Г. и др.; Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / Науч. ред. Сорокин В.Г., Гервасьев М.А. – М.: «Интермет Инжиниринг». 2001. – 608с.: ил.
 29. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., и испр. / Под общей ред. А.С.Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. 784с.: ил.
 30. ГОСТ 14771 – 76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. Москва. Стандартиформ, 2007.
 31. Дриц М.Е., Москалев М.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 447с.: ил.
 32. ГОСТ 1535 – 2006 Прутки медные. Москва. Стандартиформ, 2007.
 33. Коваленко В.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. Издательское объединение «Высшая школа», 1975, 236с.
 34. Левинсон Е.М., Лев В.С. Справочное пособие по электротехнологии. Электроэрозионная обработка. Л., Лениздат., 1972. – 327с.

35. Патент РФ № 2322532 С2, МПК. С25D 3/38, С25D 1/04 2006. Способ получения электроосажденной меди / А.А. Викарчук, И.С. Ясников, М.Н. Тюрьков, О.А. Довженко.
36. Сайт www.ans.com.ru. Руководство по основным методам проведения анализа в программе ANSYS.
37. Маслов Л.Б., Сабанеев Н.А. Практикум по курсу вычислительной механики на базе современных программных средств числового анализа ANSYS: Учеб. – метод. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2009. – 76с.
38. Штанько В.М., Карязин П.П. Электрохимическое полирование металлов М., «Металлургия», 1979. 160с.
39. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Электрохимия: Учеб. пособие для хим. фак. ун-тов. – М.: высш. шк., 1987. – 295 с.: ил.
40. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM) Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining K.P. Rajurkara, M. M. Sundaramb, A. P. Malshec - Procedia Cirp, 2013.
41. 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII) Zhengyang Xu, Xuezheng Chen, Zesheng Zhou, Peng Qin, Di Zhu Electrochemical Machining of High-temperature Titanium Alloy Ti60 Procedia CIRP, Volume 42, 2016, pp. 125-130 The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013
42. Characterization of Surface Finish of Electropolished Stainless Steel AISI 316L with Varying Electrolyte Concentrations. P.J. Núñez, E. García-Plaza, M. Hernando, R. Trujillo Characterization of Surface Finish of Electropolished Stainless Steel AISI 316L with Varying Electrolyte Concentrations Procedia Engineering, Volume 63, 2013, pp. 771-778
43. Study on wire electrochemical machining assisted with large-amplitude vibrations of ribbed wire electrodes X.L. Fang, X.H. Zou, M. Chen, D. Zhu Study on wire

electrochemical machining assisted with large-amplitude vibrations of ribbed wire electrodes CIRP Annals, Volume 66, Issue 1, 2017, pp. 205-208

44. Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy Xu Zhengyang, Liu Jia, Zhu Dong, Qu Ningsong, Wu Xiaolong, Chen Xuezheng Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy Chinese Journal of Aeronautics, Volume 28, Issue 4, 2015, pp. 1263-1272

ПРИЛОЖЕНИЯ

Серия
«ПРОГРЕССИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель
Полещиков Ю. Н., д.т.н., проф.
Сербодубицев Ю. П., д.т.н., проф.
(зам. председателя)
Безьялыцкий В. Ф., д.т.н. проф.
(РГАТУ им. П. А. Соловьева,
г. Рыбинск)
Сарычкина А. Г., д.т.н. проф.
(МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)
Мухомов А. В., д.т.н. проф.
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)
Брицковский Б. М., д.т.н. проф.
(СГТУ, г. Саратов)
Королев А. В., д.т.н. проф.
(СГТУ, г. Саратов)
Шумилов В. М., д.т.н., проф. ректор
(ВГПСИ, филиал ВолГАСУ,
г. Волжский)
Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.
Теслер Е. И., д.т.н., проф.
Безозвещенская М. М., д.т.н., проф.
проректор (МГУПП, г. Москва)
Пашков Е. В., д.т.н., проф. первый
проректор (СевНТУ, г. Севастополь)
Попов В. И., д.т.н., проф.
(МГУПП, г. Москва)
Сербодубицев С. П., д.т.н., проф.
(КТУ, г. Калининград)
Плещиков А. Л., д.т.н., проф.
Фролов Б. М., к.т.н., доц.
(ответственный секретарь)

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
60811(ОК+ЭК). По вопросам
подписки обращаться
в издательство.
Тел. издательства ВолГГТУ:
(8442) 24-34-06
Факс (8442) 24-34-06
oa@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 2 (212)
Февраль
2018

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:
Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

*Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,
на отдельные статьи – сохраняется за автором*

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического
университета» категорически запрещена без оформления договора
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского
государственного технического университета» обязательна*

© Волгоградский государственный технический университет,
«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2018

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Вайнер Л. Г.</i> Технологическое управление абразивной обработкой на основе моделирования процессов формообразования.....	7
<i>Драчев О. И., Бобровский А. В., Авдеев О. В.</i> Система автоматического управления процессом электрохимической обработки штампов.....	10
<i>Егоров Н. И., Поляничков Ю. Н., Солодков В. А., Крайнев Д. В., Поляничкова М. Ю.</i> Повышение качества и производительности обработки отверстий путем модернизации хонинговальной головки.....	13
<i>Крышкин Ю. И., Карлов В. И.</i> Математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия диска трения ГМТ и исследование влияния параметров наполнения на прочность его сцепления с основой.....	15
<i>Крышкин Ю. И., Карлов В. И.</i> Математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ и проверка ее испытанием синхронизаторов на изделиях.....	20
<i>Макарова О. А., Алексейчук В. И., Батников А. И.</i> Исследование процесса обработки труб большого диаметра.....	24
<i>Митрофанов А. П., Крутикова А. А., Паршева К. А., Муравьев А. А.</i> Исследование поверхностного слоя титанового сплава после шлифования импрегнированным абразивным инструментом.....	26
<i>Носенко В. А., Фетисов А. В., Ладыгина О. М., Пузырькова В. Е.</i> Влияние скорости микрошарпания на морфологию площадки износа карбида кремния и перенос металла.....	30
<i>Плотников А. Л., Сергеев А. С., Тиханова Ж. С., Елов П. Н., Павлов А. С.</i> Об условиях выбора режима пробного прохода как метода тестирования свойств сменных контактных пар.....	33
<i>Поляничкова М. Ю., Поляничков Ю. Н., Егоров Н. И., Ветлицын Н. Ю., Горбунова Т. А.</i> Формирование упругих характеристик однокомпонентного абразивного инструмента в результате его спекания.....	37
<i>Санинский В. А., Худяков К. В., Смирнова Е. Н., Бураков С. В.</i> Способ повышения точности сборки подшипника качения взаимной компенсацией погрешностей комплектующих деталей.....	40
<i>Сидякин Ю. И., Комаева Ю. Г., Ольштынский С. Н., Руденко А. С., Туников М. М.</i> Динамика многократного контактного соударения тел в процессах упрочняющей обработки деталей чеканкой.....	44
<i>Фам Х. Ч., Чигиринский Ю. Л., Липатов А. А.</i> Неустойчивость стружкообразования при резании высоколегированных сталей твердосплавным инструментом.....	47
<i>Федянов Е. А., Санинский В. А., Старчак Н. А.</i> Совершенствование технологии гидрабразивной обработки трубных заготовок.....	50
<i>Фролов Е. М., Корзун Э. А., Тиханова Ж. С.</i> Адаптация метода управления режимами резания к промышленным условиям.....	53

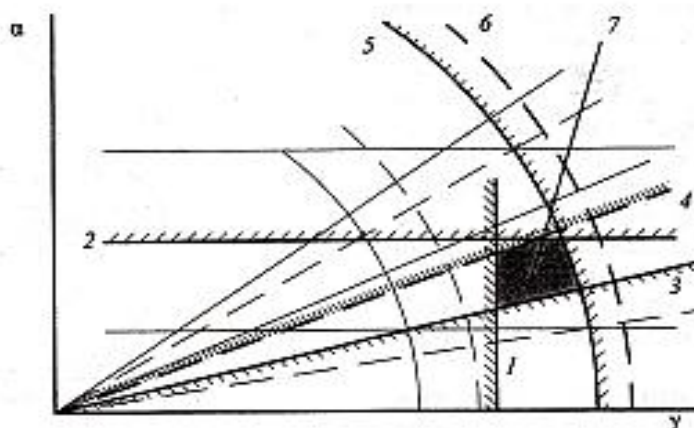


Рис. 3. Графическое отображение синтеза параметров настройки

Эффективность предложенного алгоритма определения технологических управляющих параметров с применением виртуальной имитации процесса взаимного формообразования была подтверждена результатами шлифования в производственных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнер, Л. Г. Методология построения модели реального формообразования в процессе съема припуска на примере шлифования торцевых поверхностей / Л. Г. Вайнер // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 2–6 (292). – С. 21–27.

2. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

3. Vainer L. G., Nosenko V. A. The Regularities of Grinding Wheels Wear at In-Line Machining of Bearing Rings Ends // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems - MEACS 2015, December 1–4, 2015; Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 2015. – 04-17-MERMT.*

4. Вайнер, Л. Г. Характер вращения роликов и точность обработки при двустороннем торцевом шлифовании / Л. Г. Вайнер // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2010. – № 4(19). – С. 111–120.

5. L. G. Vainer. Determining the parameters of the technological space in bilateral end grinding / *Russian engineering research*. 2011, vol. 31, No. 12, pp. 1233-1238.

УДК 621.923 -- 621.9101

О. И. Драчев, А. В. Бобровский, О. В. Авдеев

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ШТАМПОВ

Тольяттинский государственный университет

E-mail: doi05@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной точности пространственно сложных поверхностей штампов. Представлена установка для электрохимической обработки рабочих поверхностей штампа, оснащенная автоматической системой стабилизации межэлектродного зазора.

Ключевые слова: штамп, электрохимическая обработка, электрод-инструмент, пространственно сложные поверхности, система автоматического управления.

О. И. Драчев, А. В. Бобровский, О. В. Авдеев

AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF DIES

Togliatti State University

In the article examined issue of increasing operational accuracy of spatially complex surfaces of dies are considered. An installation for electrochemical machining of the working surfaces of a die is provided, equipped with an automatic system for stabilizing the interelectrode gap.

Keywords: stamp (die), electrochemical machining, electrode - tool, spatially complex surfaces, automatic control system.

© Драчев О. И., Бобровский А. В., Авдеев О. В., 2018

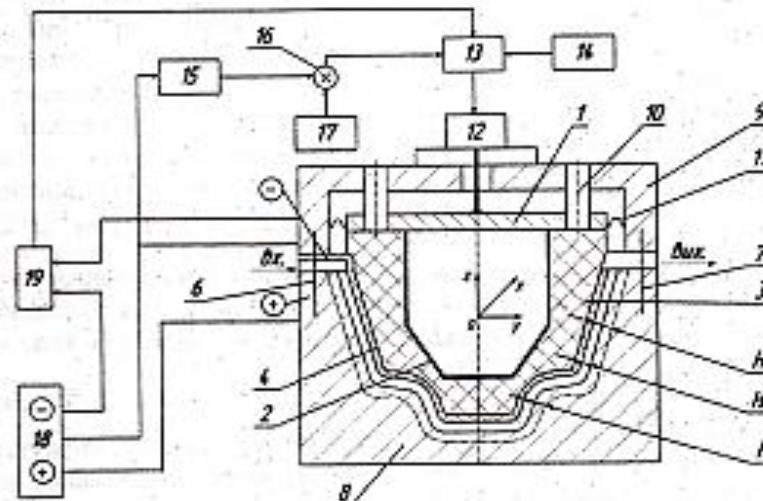
В современном машиностроении постоянно повышаются требования к точности и качеству поверхности изготавливаемых больших габаритных штампов. На долю механической обработки лезвийным и абразивным инструментом приходится до 80 % всего объема обрабатываемых деталей, получение высокой точности и качества поверхности требует значительных дополнительных затрат на проведение финишных отделочных операций. В таких случаях единственными методами могут быть электрохимические [1].

Преимущество последних, по сравнению с механическими, являются высокая размерная и геометрическая точность (до 2 мкм), высокое качество поверхности (R_a до 0,02 мкм), отсут-

ствие поверхностного дефектного слоя и остаточных напряжений на рабочих поверхностях штампов [3].

Повышение требований к точности и качеству штампов позволяет значительно увеличить силовые и температурные нагрузки при эксплуатации последних, повысить срок их службы и их конкурентоспособность.

Предлагаемая разработка установки для ЭХО обработки штампов с пространственно сложными поверхностями и оснащенная системой автоматического управления включает в себя инструмент-электрод, оснащенный линейным электроприводом, датчиками контроля контакта и межэлектродного зазора (МЭЗ) и тремя контурами управления.



Общий вид установки

Особенность разработки инструмента-электрода [2] состоит в том, что он включает в себя пластину 1 (см. рисунок) на которой симметрично относительно вертикальной оси крепится пустотелый короб, а на нем модель из отвердевшего неметаллического, стойкого к воздействию электролита, материала, на наружной объемной поверхности, которой смонтирована металлическая безычеистая сетка, подключенная к отрицательному полюсу источника питания.

Сама модель изготовлена по внутренней поверхности мастер-модели, которой является обрабатываемая заготовка корпуса штампа, с учетом величины зазора для прокачки электролита и диаметра проволоки сетки.

Установка функционирует следующим образом: пластина 1 с моделью 3, на поверхности которой смонтирована сетка 4, устанавливается на торце заготовки 8. С помощью штифтов 6

и крепежных винтов 7 обеспечивают центровку корпуса 9 относительно заготовки 8.

При изготовлении модели 3 на заготовку 8, которая является мастер-моделью для модели 3 наносят тонким слоем силиконовую жидкость или техническое масло и устанавливают на торце заготовки 8 корпуса 9.

Далее объем между внутренней поверхностью заготовки 8 и пластины 1 с пустотелым кожухом 2 заполняют жидким неэлектропроводящим материалом, например эпоксидной смолой с отвердителем или другим полимерным материалом, стойким к действию электролита.

После затвердевания пластина 1, пустотелый кожух 2 и модель 3 представляют единый монолитный инструмент-электрод, трехкоординатная пространственно-сложная поверхность которого механически обрабатывается на фрезерном станке. Глубина снимаемого по-

верхностного слоя эквидистантна величине $H_2 = H_0 + H$, которая включает зазор H_0 для прокатки электролита, необходимый для процесса электрохимического полирования (0,2...2 мм), и глубине H_2 равной диаметру проволоки сетки (1,5...1 мм).

Проволока сетка может быть изготовлена из меди, коррозионно-стойкой стали и т. д. сетка изготавливается по выкройке с учетом объемной конфигурации обрабатываемой полости. На пластине 1 симметрично вертикальной оси короба 2 закреплены две скалки 10 по которым перемещается электрод-инструмент относительно корпуса 9 который крепится с помощью винтов 6 и заготовки штампа 8.

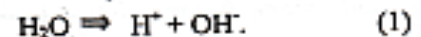
В зазор между пластиной 1 и корпусом 9 вмонтирована одно гофрированное уплотнение 11. Система автоматического управления содержит линейный электропривод 12 жестко соединенный с инструментом-электродом, который управляется блоком управления 13. Величина (МЭЗ) задается задатчиком 14, а контролируется датчиком потери постоянного тока потребления 15, выход которого подключен к входу сравнивающего элемента 16, на вход которого подключен источник эталонного питания. Источник питания 18 соединен с катодом со знаком минус (металлическая сетка) и с анодом (заготовка 8) со знаком плюс. Первый вход датчика контактов 19 подключен к сетке 4, а второй к заготовке 8.

Устройство для электрохимической обработки работает следующим образом. К заготовке 8 подводят электрод-инструмент который жестко закреплен на роторе линейного электропривода 12 и перемещается от блока управления 13 до контакта с заготовкой, причем момент контакта контролируется датчиком контакта 15. Выход, которого подключен к выходу блока управления 13. В момент контакта инструмента-электрода с заготовкой 8 происходит замыкание электрической цепи, которое контролируется датчиком 19. Момент контакта является точкой отсчета при установлении заданного МЭЗ. Далее электрод-инструмент отходит на заданный датчиком 14 зазор H_0 , с помощью линейного электропривода 12. Далее включают пролив электролита (на рисунке показан условно) с расчетной скоростью и источник постоянного тока 18 который своими выходами подключен к заготовке 8 (анод) со знаком плюс и инструментом-электродом со знаком минус к сетке и поддерживает заданный режим ЭХО по току и напряжению.

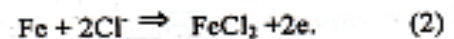
В цепи источника питания 18 включен датчик потери постоянного тока потребления 15, выход которого подключен на вход сравнительного элемента 16, на второй вход которого подключен выход источника эталонного питания постоянного тока 17.

Система автоматического управления начинает работать по принципу астатического регулирования, т. е. поддерживает МЭЗ постоянным и бесконтактно контролирует величину съема металла. При увеличении МЭЗ на величину H равную глубине съема металла, ток потребления падает.

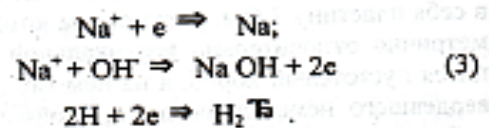
В качестве электролита используют водный раствор поваренной соли (NaCl), при растворении которой в воде образуются положительные ионы Na^+ и отрицательно заряженные ионы хлора Cl^- . При включении источника питания между инструментом-электродом и обрабатываемой деталью возникает постоянный ток, а в электролите происходят следующие химические реакции. Вода частично диссоциирует на ионы водорода и гидроксильной группы:



Анионы хлора движутся к детали, так как она является анодом, и соединяются с железом, образуя растворимый в воде хлорид железа:



Катионы натрия движутся к катоду, получают от него недостающие электроны и образуют металлический натрий. Натрий очень активный элемент, поэтому он сразу же реагирует с водой, образуя растворимый гидроксид натрия и газообразный водород:



Гидроксид натрия и хлорид железа в водном растворе реагируют друг с другом, образуя вновь растворимую поваренную соль и нерастворимый гидроксид железа. Нерастворимые соединения выпадают в осадок и далее в реакциях не участвуют [2]:



При небольшой силе тока (50...100 ампер) анодному растворению подвергаются в первую очередь выступы шероховатости на обрабатываемой поверхности. Вследствие этого выступы удаляются электрохимическим путем и шеро-

ховатость поверхности снижается. Так как зазор между инструментом-электродом и обрабатываемой поверхностью является равномерным то, и обработка происходит равномерно по всей поверхности. Для поддержания равномерного процесса электрохимического полирования и удаления осадков из рабочей зоны электролит прокачивают. Для предотвращения коррозии обрабатываемой детали в электролит добавляют вещества-ингибиторы коррозии, например нитрид натрия Na_2N . После полирования инструмент-электрод извлекают из заготовки 8 путем съема со штифтов 7 и промывается водой полированная поверхность заготовки.

Установка, для ЭХО оснащенная системой автоматического управления стабилизации МЭЭ и контролю величины перемещения инструмента-электрода позволяет повысить точность формы и качество обрабатываемой по-

верхности больше габаритных штампов сложной пространственной формы за счет введения контура обратной связи по бесконтактному контролю и управлению МЭЭ. Одновременно устранит концентраторы напряжения, которые остаются после механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мороз Н. И.* Электрохимическая обработка металлов / Н. И. Морозов, Г. А. Алексеев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 208 с., ил.
2. Патент № 2561556 РФ, МПК В23Н 3/04, С25F 7/00. Инструмент-электрод для электрохимического полирования пространственно-сложных поверхностей / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев ; заявитель Тольяттинский государственный университет. – № 2013142543/02 ; заявл. 17.09.2013 ; опубликован 10.04.2015, Бюл. № 4. – 4 с.
3. *Мендельсон В. С.* Технология изготовления штампов и прессформ / В. С. Мендельсон, Л. И. Рудман. – М. : Машиностроение, 1982. – 208 с., ил.