

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

В. К. ИСАЧЕНКО

Методические указания
к лабораторным работам
по курсу
**«ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ И МИКРОСВАРКА»**

**Выпуск I. Исследование технологических процессов
электроэрозионной обработки материалов
в приборостроении и электронике**

Данные методические указания к лабораторным работам по курсу "Электрофизические методы обработки и микросварка" издаются в соответствии с учебным планом.

Рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 23/1-74 г., Методической комиссией факультета П и Учебно-методическим управлением.

Владимир Кириллович Исаченко

Редактор В.М. Царев

Корректор Л.И.Малютина

Заказ 1026

Л-70797 от 12/VI-74 г.

Объем 2 $\frac{1}{8}$ п.л.

Бесплатно

Тираж 400 экз.

Печ. 1974 г.

Ротапринт МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5

Введение

Данная методическая разработка включает комплекс лабораторных работ по одному из методов электрофизической размерной обработки – электроэрозионному – применительно к курсам "Технология приборостроения" и "Технология ЭВА".

Разработка содержит:

1. Краткие сведения из общих положений теории и технологии электроэрозионной обработки материалов, необходимые для выявления роли и влияния физических явлений и технологических приемов.

2. Конкретную методику и порядок выполнения каждой лабораторной работы с указанием ее особенностей.

3. Методические указания по использованию частных теоретических положений и сведений (электроискровая обработка непрофилированным проволочным и профилированным электродом-инструментом). Сведения позволяют выполнить анализ результатов работы, установить причины полученных погрешностей и дать рекомендации на выбор оптимального режима обработки.

Каждая работа рассчитана на 4 часа занятий. Исключение составляют работы для профилирующей специальности, протяженность которых 6 часов. Дополнительные 2 часа необходимы для составления программы и решения задачи при обработке результатов исследований с использованием ЭЦВМ "Наири".

До выполнения лабораторных работ у каждого студента проверяются знания теоретических основ электроэрозионной размерной обработки. Проверка осуществляется с помощью обучающей машины путем задания 3-4 контрольных вопросов. К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, ответившие на все контрольные вопросы. Студенты, не прошедшие опроса, получают дополнительное задание на изучение определенных разделов теоретического курса, после чего вновь подвергаются контрольному опросу на обучающей машине.

До выполнения работы обязательна вводная лекция протяжен-

ностью не более 30 мин.

Лабораторные работы выполняются студентами в составе бригады из 2 человек. Отчет составляется каждым студентом.

Общие положения теории и технологии электроэрозионной обработки материалов

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) токопроводящих материалов несмотря на общность механизма эрозии условно подразделяется на электроискровую (ЭИС), электроимпульсную (ЭИМ), высокочастотную ЭИС и др. Перечисленные способы различаются достигаемым технологическим эффектом и режимами обработки, требующими использования различного технологического оборудования и оснастки (рис. 1).

ЭЭО основана на эффекте плавления и испарения участков поверхностного слоя обрабатываемого материала, нагреваемого до высоких температур в зоне действия импульсных электрических разрядов, возникающих между электродом-инструментом (ЭИ) и заготовкой (обрабатываемой деталью).

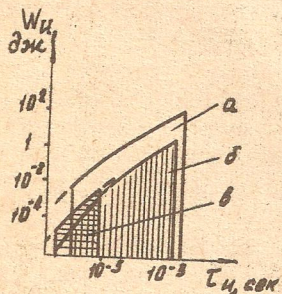


Рис. 1. Способы ЭЭО. Параметры импульсов: а) обработка широкодиапазонными генераторами импульсов

($f = 5 \cdot 10^3 + 400$ гц, $\varphi = 1,2 + 10$); б) ЭИС обработка - генераторы

($f = 2 \cdot 10^5 + 100$ гц, $\varphi = 5 + 20$); в) ВЧ ЭИС обработка ($f = 1,5 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^3$ гц, $\varphi = 3 + 100$), W_n -

энергия единичного разрядного импульса, τ_n - длительность его, f - частота повторения импульсов, φ - скважность

На рис. 2 приведена схема действия единичного импульсного электрического разряда, приводящего к образованию на поверхности ЭИ и детали единичных микролунок. Следующий разряд возникает между двумя точками поверхностей ЭИ и детали с наименьшей электрической прочностью среды между ними в момент возникновения ее пробоя. Образуется новая пара микролунок. При суммарном действии последовательности единичных разрядов ЭИ внедряется в обрабатываемую деталь с образованием полости, копирующей его форму. На количество тепла, выделяющееся на электродах, влияют параметры

разрядных импульсов, полярность их подключения и материалы электродов. Уменьшение эрозии ЭИ по сравнению с эрозией детали достигается преимущественным действием тепловой энергии на поверхность обрабатываемой детали, что повышает точность профилообразования и увеличивает производительность обработки.

Эффект электрической эрозии различных материалов принято оценивать электроэрозионной обрабатываемостью (по критерию фазового превращения Палатника)

$$P = c \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot T_{пл}^2, \quad (I)$$

где c — теплоемкость;
 γ — удельный вес;
 λ — коэффициент теплопроводности;
 $T_{пл}$ — температура плавления.

Наиболее четко материалы разделяются по обрабатываемости при большой длительности единичных разрядных импульсов.

Режим обработки характеризуется сочетанием основных параметров разрядных импульсов — их энергией W_n , длительностью T_n , частотой повторения f и скважностью S .

Величина W_n во многом определяет производительность обработки. Большим W_n соответствуют более глубокие лунки (большая производительность) и большие высоты микронеровностей на обработанной поверхности (низкая чистота поверхности).

Развитие стадий импульсного разряда, тепловые процессы в поверхностных слоях материалов ЭИ и детали и собственно процесс удаления материала с образованием микролунки зависят от величины T_n . Небольшим T_n (до десятков мксек) характерна высокая концентрация тепла и незначительная роль теплопроводности. В результате плавятся и испаряются даже тугоплавкие материалы. Съем

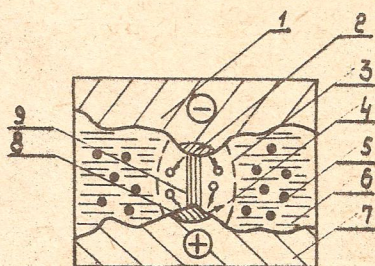


Рис. 2. Схема действия единичного разрядного импульса:
 1, 7 — поверхностные слои материала ЭИ и детали; 2, 8 — микроразрывы материала, удаляемого с ЭИ и детали; 3 — газочный пузырь; 4 — расплавленные частицы, удаленные с ЭИ и детали; 5 — затвердевшие частицы; 6 — рабочая жидкость; 9 — разрядный канал

материала протекает взрывообразно без дополнительных мер воздействия на удаляемый материал. При значительных τ_n действие теплопроводности вызывает нагрев меньшей интенсивности с распространением тепла на большую глубину, что сопровождается образованием дефектного слоя.

Рост величины φ при прочих равных условиях сопровождается увеличением производительности обработки. Чрезмерное увеличение φ вызывает ухудшение условий деионизации межэлектродного промежутка и затруднения в его очистке от токопроводящих продуктов обработки. Это снижает производительность или вообще останавливает процесс эрозии.

Производительность обработки зависит от режима и эрозионной обрабатываемости материала детали. При максимальных режимах большое влияние оказывает площадь обработки. Небольшая площадь приводит к шлакованию межэлектродного промежутка, нарушению стабильности и снижению производительности. Ухудшение условий эвакуации продуктов обработки при чрезмерно большой площади (или глубине) обработки также снижает производительность. Повышению производительности способствует прокачка рабочей жидкости, вибрация или вращение ЭИ.

Точность ЭЭО зависит от нестабильности межэлектродного промежутка, износа ЭИ, погрешностей при установке ЭИ и детали и при их нагреве в процессе обработки.

Качество обработки (шероховатость поверхности и глубина дефектного слоя) зависит от обрабатываемости материала детали и от величины W_n , τ_n , φ .

Необходимые для ЭЭО импульсы электрической энергии формируются специальными генераторами с использованием нелинейных свойств межэлектродного промежутка (I тип генератора) или специальных коммутирующих устройств (II тип). Режимы с короткими τ_n и большой скважностью и мощностью характерны для генераторов с накопителями энергии I и II типа (рис. 3).

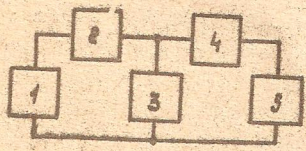


Рис. 3. Схема генерирования импульсов малой длительности с большой скважностью: 1 - источник питания, 2 - токоограничивающее сопротивление, 3 - накопитель электрической энергии, 5 - межэлектродный промежуток (элементы 1, 2, 3 входят в зарядную цепь, 3, 4, 5 - в разрядную)

Генераторы II типа позволяют получать более высокую частоту следования импульсов малой длительности и большой мощности по сравнению с генераторами I типа.

Поддержание оптимальной величины межэлектродного промежутка стабилизирует процесс ЭЭО. Эту задачу выполняют системы автоматической подачи ЭИ со взвешенными или жесткими исполнительными устройствами. В процессе ЭЭО увеличение межэлектродного промежутка сопровождается возрастанием напряжения (снижением тока) на нем. Обычно один из этих параметров служит задающим для САР величины межэлектродного промежутка.

Формообразование при ЭЭО выполняется тремя основными способами (рис. 4).

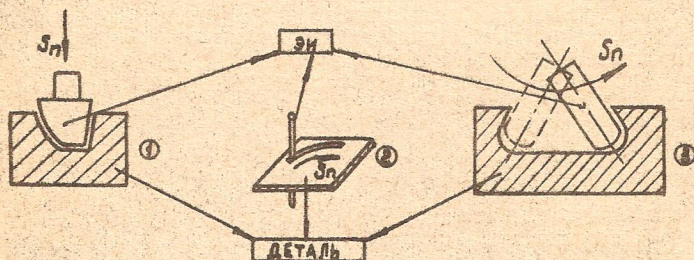


Рис. 4. Схемы способов формообразования при ЭЭО: 1 - схема копировально-прошивочной операции профилированным ЭИ, 2 - схема ЭЭ резания непрофилированным проволочным ЭИ, 3 - схема ЭЭО при сложном движении профилированного ЭИ

1) Способ копировально-прошивочных операций при копировании профиля ЭИ, характеризующийся прямолинейным поступательным перемещением специально профилированного ЭИ с внедрением его в деталь.

2) Способ с использованием непрофилированного проволочного ЭИ. Получение заданного профиля достигается относительным взаимным перемещением детали и ЭИ.

3) Способ с более сложным законом взаимного перемещения ЭИ и детали (по сравнению с I-м) и получением более сложного профиля, не повторяющего профиль ЭИ.

Работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ЭИС ОБРАБОТКЕ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭИ

Цель работы

1. Ознакомиться с электроэрозионными процессами при ЭИС обработке непрофилированным проволочным ЭИ.
2. Ознакомиться с влиянием различных факторов на технологические характеристики ЭИС обработки непрофилированным ЭИ.

Задание

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия ЭИС установки модели ХК.207.2М.
2. Исследовать производительность, точность и качество обработки при использовании непрофилированного проволочного ЭИ.

Методика и порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия установки, используя описание и руководство по ее эксплуатации, уделив достаточное внимание указаниям по охране труда и правилам работы на установке.
2. Проверить положение всех тумблеров и коммутирующих элементов передней панели (перед началом работы они должны быть в выключенном состоянии).
3. Ознакомиться с содержанием лабораторной работы. Получить у преподавателя вариант задания. После краткого собеседования с преподавателем, подтверждающего достаточные знания для работы на установке, по полученному варианту необходимо проделать следующие операции.
 - а) Выполнить расчет кинематики перемещения ЭИ в соответствии с заданием. При этом необходим учет номинального диаметра проволоки и величины бокового межэлектродного промежутка в зависимости от режима обработки и свойств обрабатываемого материала. Для расчета использовать теоретические рекомендации настоящих указаний и справочные сведения - (22) теоретической части и

рис. 5. Начало координат выбирают произвольно, руководствуясь удобством обработки. В таблице координат узловых точек траектории перемещения ЭИ указать также координаты в делениях шкалы отсчетного устройства установки (цена малого деления лимба I малое дел. = 10 мкм; цена деления линейной шкалы I большое дел. = 1000 мкм).

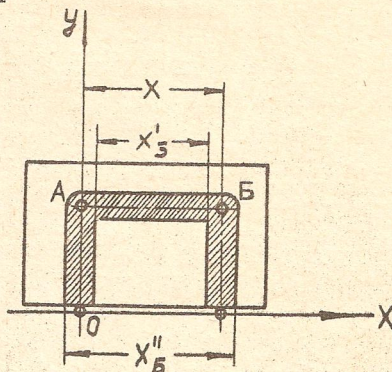


Рис. 5. Схема расчета кинематики перемещения проволочного ЭИ:
 X'_B - размер по внутреннему контуру паза, X''_B - по наружному контуру, $X = X'_B + d_{эл} + 2\delta_d$ - координата т. Б, по X

Примерное содержание таблицы координат

Точка координат	Расчетная формула		Координаты в дел. шкалы по оси	
	внутренний размер	внешний размер	X	Y
Б	$X'_B = X - d_{эл} - 2\delta_d$	$X''_B = X + d_{эл} + 2\delta_d$	2 в.д. + 15 м.д.	5 в.д. + 27 м.д.

б) Получив разрешение преподавателя, включить установку в сеть и подготовить ее к работе по заданному варианту.
 Для этого включить тумблер "сеть-вкл". (загорается Л-1); установить заданную емкость конденсаторов-накопителей тумблерами панели конденсаторов; подать напряжение на электрод-инструмент и деталь кнопкой "питание электродов вкл." (загорается Л-3); установить по вольтметру заданное напряжение на электродах вращением ручки ЛАТР "рег. U электр."; установить величины $J_{к.д.}$ и $U_{д.}$ с помощью потенциометра "рег. U_{д.}" и реостата "рег. J_{к.д.}"

(тумблер $J_{к.з.}$ после установки величины $J_{к.з.}$ обязательно перевести в положение "выкл."); поставить тумблер скорости обработки в положение "мост" и фиксирующим устройством ввести в зацепление зубчатые передачи перемещения рабочего столика. На этом подготов-ка установки к полуавтоматическому режиму обработки заканчивается.

в) Выполнить тренировочный цикл обработки по полной программе основного цикла на выставленном режиме. При выполнении тренировочного цикла обязательно присутствие преподавателя или учебного мастера. В начале обработки включается перемotka проводочного ЭИ тумблером "перемotka". Затем с помощью кнопок "вперед, назад, влево, вправо, стоп" осуществляется обработка по траектории рассчитанного перемещения ЭИ. Необходимо обратить внимание на правильность включения указанных кнопок - кнопка "вправо", например, обеспечивает перемещение заготовки и рабочего столика влево, что при неподвижности в горизонтальной плоскости ЭИ вызывает образование реза по направлению от левой кромки заготовки вправо.

Особое внимание необходимо в момент окончания реза, осуществляемого нажатием кнопки "стоп". Несвоевременное прекращение обработки вызывает увеличение длины реза и искажение расчетного обрабатываемого профиля. Переход от одного из направлений реза к другому обязателен с предварительной остановкой установки кнопкой "стоп". Недопустим такой переход непосредственным переключением, например, с включенного положения кнопки "назад", минуя кнопку "стоп", - к включению кнопки "влево".

После практического ознакомления с работой установки при выполнении тренировочного цикла выполняется основной цикл обработки.

г) Выполнить полный объем заданного варианте обработки, используя полученный опыт и рекомендации указаний пп. б, в. При этом исследовать зависимости производительности, точности и качества обработки от материала детали и параметров заданного режима. В процессе исследований произвести визуальные наблюдения за параметрами разрядных импульсов (их формой, длительностью, частотой повторения) и за стабильностью процесса обработки. Для этой цели использовать осциллограф типа РБ-1 или С1-16. Обратить особое внимание на развертку и синхронизацию в связи с несинусоидальной формой разрядных импульсов и наличием большого

числа гармоник. Результаты наблюдений зафиксировать в виде графиков, воспроизводящих форму основной гармоники разрядного импульса. По временным меткам установить длительность импульса и частоту их повторения f . Величину f определить также с помощью цифрового счетчика импульсов типа Ф-552. Подключение осциллографа и счетчика импульсов произвести в соответствии со схемой на рис. 6. Синхронизацию осциллографа выполнить по схеме с внешней синхронизацией, используя для этой цели напряжение, снимаемое с разрядного промежутка.

Для последующего определения экспериментальной производительности по скорости обработки отметить длительности прорезания каждого паза по секундомеру.

д) Выполнить обработку

полученных результатов. Производительность оценить по производству скорости обработки на толщину детали без учета ширины получаемого паза:

$$Q = \frac{l}{t} \cdot h, \quad (2)$$

где Q - скорость обработки, мм²/сек;
 l - длина реза в мм, получаемого за время t , сек;
 h - толщина детали, мм.

Допустимость более простой оценки производительности обработки по приведенной зависимости обосновывается в теоретической части работы. Длина каждого реза устанавливается с помощью микроскопа типа БМИ. Измерения выполняются на промытом и высушенном образце, снятом с рабочего столика установки после окончания всего цикла обработки.

Точность обработки оценить по радиусу округления внутренних углов каждого паза и по действительным размерам межэлектродного промежутка и длине каждого реза:

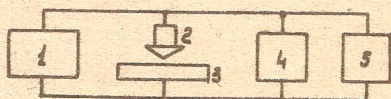


Рис. 6. Схема подключения контрольных приборов к ЭИ и детали: 1 - функциональные узлы установки, 2 - проволочный ЭИ, 3 - обрабатываемая деталь, 4 - осциллограф, 5 - цифровой счетчик импульсов Ф-552

$$\delta_s = \frac{b - d_{эи}}{2}, \quad (3)$$

где δ - боковой межэлектродный промежуток, мм;
 b - ширина паза, мм;
 $d_{эи}$ - диаметр проволочного ЭИ, мм.

Качество обработанной поверхности оценить по величине R_z (рис. 7) боковой поверхности полученных пазов.

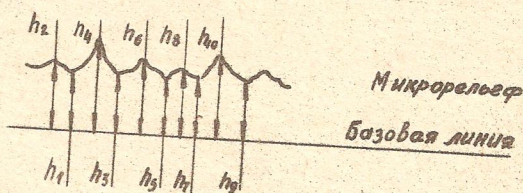


Рис. 7. Определение высоты микронеровностей поверхности детали, обработанной ЭИС методом

Отметить величины R_z для каждого паза. При измерениях использовать микроскоп типа МБИ,

$$R_z = \frac{(h_1 + h_2 + \dots + h_9) - (h_2 + h_4 + \dots + h_{10})}{5}, \quad (4)$$

где h_1, h_3, \dots, h_9 - высота 1, 3, ... 9-го микровыступов,
 h_2, h_4, \dots, h_{10} - высота 2, 4, ... 10-й микровпадин.
 Измерение указанных высот производить от базовой линии, выбираемой произвольно (рис. 7).

е) Выполнить анализ результатов эксперимента по сравнению с возможными теоретическими результатами, расчет которых произвести по зависимостям теоретической части работы.

Рассчитать производительность по скорости обработки, используя (I3), (I4) и (I5); по объему (дополнительный поверочный расчет) - (II), (I2). Значение f рассчитать по (I0) и по результатам визуальных наблюдений при выполнении обработки, а также по показаниям цифрового счетчика импульсов.

Точность обработки по радиусу округления внутренних углов пазов и по величине межэлектродного промежутка рассчитать по (17), (19), (22).

Качество обработанной поверхности по величине R_a рассчитать по (24). Глубина дефектного слоя определяется только расчетным путем по (25).

Анализ неустойчивости реального процесса обработки, выражающийся в низкой повторяемости параметров единичных разрядных импульсов (отклонения по величине амплитуды напряжения и длительности зарядки конденсаторов - накопителей), выполнить с использованием результатов, полученных на ЭЦВМ "Наури" в виде графиков, характеризующих теоретически процесс зарядки при различных параметрах зарядной цепи. Составление программы и решение задачи на машине выполняют студенты групп профилирующей специальности под непосредственным наблюдением преподавателя или учебного мастера. Все студенты других специальностей используют результаты, полученные на машине заранее. Графическая зависимость (теоретическая) сравнивается с реальной, просматриваемой на экране осциллографа. Процесс зарядки описывается выражением

$$u_c = u(1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (5)$$

где u - напряжение источника питания,
 t - время, прошедшее с начала зарядки,

R и C - параметры зарядной цепи установки.

В идеальном случае состояние межэлектродного промежутка не влияет на повторяемость параметров процесса зарядки конденсаторов для любого по очередности разрядного импульса. В реальных условиях неустойчивость проявляется в изменении параметров процесса - изменяется форма кривой, характеризующей зарядку конденсаторов для различных по следованию импульсов.

Обоснование всех полученных результатов и выявленных расхождений с теоретическими расчетными результатами выполнять с учетом физических явлений и теоретических зависимостей, характерных для выполняемого варианта. Для этой цели ис-

пользовать теоретическую часть работы.

ж) Выполнить отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать:

описание принципа действия установки (по упрощенной электрической и кинематической схеме);

исходные сведения по заданному варианту работы;

расчет кинематики перемещения ЭИ для получения заданного контура прорезаемых пазов;

результаты эксперимента - таблицы значений по исследованным зависимостям $V, Q, f, R_a, a, z = \varphi (U_c, C, J_{кл}, U_n)$ - материал детали);

графики, построенные по значениям таблиц;

масштабное изображение реальной и теоретической формы кривой процессов зарядки конденсаторов-накопителей;

результаты анализа выявленных погрешностей - таблицы значений их и графики, характеризующие погрешности;

рекомендации по выбору оптимального режима на основе проведенного анализа.

Теоретическая часть

I. Особенности установки для электроискровой обработки непрофилированным ЭИ на примере установки модели КК.207.2М.

Назначение - изготовление прецизионных деталей из токопроводящих и некоторых полупроводниковых материалов.

Обработка - электроискровая непрофилированным проволочным ЭИ при использовании генератора I типа (RC - генератор релаксационных колебаний) с емкостным накопителем.

Упрощенная схема и принцип действия генератора дан на рис. 8.

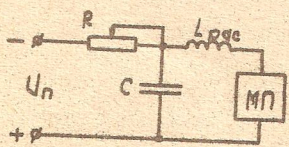


Рис. 8. Принцип действия генератора:
 U - напряжение источника питания,
 R - токоограничивающее сопротивление,
 C - конденсатор-накопитель,
 $L_{расп}$ - распределенная индуктивность разрядной цепи (условно показана сосредоточенной), $МП$ - межэлектродный промежуток

При включении источника питания через R происходит зарядка

С (необходимое условие - зазор между ЭИ и деталью). Как только U_c достигает величины $U_{пр}$, электрическая прочность межэлектродного промежутка нарушается и возникает токовый разрядный импульс через образовавшийся разрядный клапан. Энергия, запасенная конденсатором, расходуется с одновременным уменьшением величины U_c . После снижения этого напряжения до значения, не достаточного для поддержания разрядного канала в проводящем состоянии, разрядный ток резко уменьшается до нуля. Электрическая прочность межэлектродной среды в зоне существования разрядного канала восстанавливается. Начинается новый цикл зарядки конденсатора. Создаются условия для возникновения очередного единичного разрядного импульса.

Частота повторения разрядных импульсов f зависит от параметров схемы (величин R , C , $U_{пит}$) и от величины $U_{пр}$. Высокая f возможна при большой скорости зарядки конденсатора, что достигается уменьшением величины R . Однако, если скорость роста U_c будет превышать скорость деионизации, то процесс генерирования срывается в связи с переходом из импульсного в непрерывный дуговой. Этому способствует при небольших значениях R незначительная скорость деионизации в начальный промежуток времени непосредственно после прекращения токового разрядного импульса, а также наличие остаточного напряжения на конденсаторе. Распределенная индуктивность L разрядной цепи позволяет увеличить значение f при небольшой величине R . Это достигается действием явления самоиндукции в разрядной цепи, поддерживающим разрядный ток прежнего направления и приводящим к быстрому снижению остаточного напряжения U_c до нуля. В результате величина U_c будет в каждый момент времени меньше, чем величина $U_{пр}$. Это создает необходимые условия для зарядки C .

П. Особенности ЭИС обработки непрофилированным проволочным ЭИ. Способ позволяет получать сквозные отверстия с прямолинейными образующими и изготавливать детали с точностью до 0,002 мм при высоком качестве обработанной поверхности (не ниже $\nabla 7$). В качестве ЭИ используется медная, латунная, вольфрамовая проволока диаметром от 20 до 500 мкм. В процессе обработки проволока непрерывно перематывается. В результате исключается влияние ее износа на точность обработки (в каждый момент времени в рабочую зону подаются еще не изношенные участки проволо-

ки). Перемотка устраняет также возможность обрыва проволоки, уменьшившейся по сечению в результате поперечного износа.

Обработку обычно выполняют в керосине (наиболее целесообразно для немагнитных материалов). При обработке сталей процесс нестабилен и сопровождается частыми обрывами проволоки. Это объясняется загрязнением зоны резания продуктами обработки в результате пиролиза керосина с выделением твердых частиц углерода и намагничиванием стали в зоне реза. В этом случае можно применять в качестве диэлектрической жидкости дистиллированную или деионизованную воду.

Производительность обработки

Производительность оценивается объемом материала, снятого с обрабатываемой детали в единицу времени,

$$\Delta V_g = v_{\text{ср}} \cdot l \cdot h, \quad (6)$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя ширина получаемого паза;
 l — длина паза, прорезанного за единицу времени;
 h — толщина детали;

$$v_{\text{ср}} \approx d_{\text{ЭИ}} + 2a', \quad (7)$$

Здесь $d_{\text{ЭИ}}$ — диаметр проволочного ЭИ,
 a' — величина межэлектродного промежутка;

$$\Delta V_g \approx (d_{\text{ЭИ}} + 2a') \cdot l \cdot h. \quad (8)$$

Влияние электрических режимов обработки. Производительность обработки зависит от энергии единичных импульсов и от частоты их повторения. С некоторой ошибкой можно считать, что производительность пропорциональна величине средней мощности единичных разрядов $P_{\text{ср}}$:

$$P_{\text{ср}} \approx W_{\text{и}} \cdot f, \quad (9)$$

где W_n - энергия единичного разрядного импульса,
 f - частота повторения импульсов.

Необходим некоторый оптимальный режим обработки, определяющий оптимальные значения W_n и f при соответствующем значении U_{np} и U_n . Действительно, при достаточно близких значениях U_n и U_{np} величина f стремится к нулю, т.е. разрядный режим обработки срывается:

$$f = \frac{1}{2,3RC \cdot \ln \frac{U_n}{U_n - U_{np}}}, \quad (10)$$

где R и C - параметры RC -генератора,

U_n - напряжение источника питания,

U_{np} - напряжение пробоя межэлектродного промежутка.

Одновременно с этим энергия единичного импульса максимальна при $U_n = U_{np}$, так как пробой межэлектродного промежутка происходит при $U_c = U_{np}$, но чем больше U_c , тем больше энергия, запасаемая конденсатором W_c . Максимальное же значение U_c равно U_n , поэтому энергия W_c максимальна при $U_n = U_{np}$.

Емкость конденсаторов-накопителей влияет на величину энергии импульсов W_n и частоту их повторения f , т.е. на производительность

$$\Delta V_g = K_4 \cdot W_n \cdot f, \quad (11)$$

где K_4 - коэффициент влияния рабочей среды, размеров и материала электродов, длительности разрядных импульсов;
 W_n - средняя энергия единичного импульса,

$$W_n = \frac{C \cdot U_c^2}{2} \quad \text{мкдж} \quad (12)$$

(C - емкость конденсаторов-накопителей, мкф;
 U_c - напряжение зарядки конденсаторов, в);
 f - частота повторения импульсов.

Максимальная производительность при стабильном процессе обработки достигается оптимальным сочетанием f и $W_{и}$, т.е. выбором определенной величины C . Увеличение емкости сверх оптимальной снижает производительность и качество обработанной поверхности.

Ток короткого замыкания $J_{к.з.}$ влияет на величину f , а напряжение - на $W_{и}$ и f . В общем случае производительность обработки в равной мере зависит от $J_{к.з.}$ и U_c (при оптимальном режиме величина $J_{к.з.}$ близка величине емкости C). Для чистовых операций целесообразны величины U_c , равные 100-110 в (для сталей и твердых сплавов), так как качество обработанной поверхности в большей мере зависит от U_c , чем от C .

Влияние диаметра и материала ЭИ, а также длины рабочего участка (длина участка проволоки между токоподводящими контактами). При обработке твердых сплавов и сталей скорость подачи ЭИ не зависит от диаметра проволоки. С увеличением диаметра сопротивление проволоки уменьшается и повышается коэффициент использования подводимой к зоне резания энергии. Это компенсирует рост объема материала, снимаемого с детали в единицу времени, т.е. сохраняет скорость подачи неизменной. Поэтому при определении производительности можно не учитывать ширину получаемого паза.

Расчетным путем значение производительности можно определить из соотношения, устанавливающего зависимость производительности от режима обработки, причем оценка ведется без учета ширины паза, а только по скорости обработки:

$$Q = K_{10} \cdot K_{12} \cdot J_{к.з.} \cdot U_c \quad \text{мм}^2/\text{сек}, \quad (I3)$$

где Q - скорость обработки,

K_{10} и K_{12} - коэффициенты влияния (см. табл. I,2 приложения).

Наиболее справедливо это соотношение для оптимальных режимов обработки, при которых ток короткого замыкания подбирается по значению емкости конденсатора-накопителя:

$$\text{для твердых сплавов } J_{к.з.} = 0,5 + 0,62 C; \quad (I4)$$

$$\text{для сталей } J_{к.з.} = 0,2 + 0,72 C. \quad (I5)$$

Аналогичное по результату влияние оказывает на производительность материал проволоки (его удельное сопротивление) и

длина рабочего участка (его сопротивление).

Диаметр применяемой проволоки определяет допустимый $J_{кз}$ при минимальном натяжении ее. С увеличением диаметра растет допустимая величина $J_{кз}$ и верхний предел производительности. Однако при этом необходимы большие емкости накопителя, что снижает качество обработки. Проволока большого диаметра целесообразна при заготовительных операциях (максимальная производительность при возможности получать невысокое качество обработки).

Влияние натяжения проволоки и скорости перемотки. Натяжение проволоки определяет стабильность процесса обработки, т.е. ее производительность. Увеличение натяжения вплоть до определенного сопровождается ростом производительности, после чего производительность стабилизируется.

Скорость перемотки влияет на интенсивность удаления продуктов эрозии из зоны действия разрядов. Рост скорости сопровождается увеличением производительности (особенно для деталей большой толщины). Однако повышение скорости снижает эффективность использования ЭИ.

Влияние толщины детали. С ростом толщины детали происходит снижение производительности обработки в связи с ухудшением условий удаления продуктов обработки из зоны резания. Это особенно сказывается при прорезании узких пазов с использованием проволоки диаметром менее 0,1 мм в деталях толщиной более 10 мм.

Точность обработки

Точность обработки непротравленным проволочным ЭИ зависит от износа ЭИ, величины межэлектродного промежутка, точности изготовления и установки шаблона (при обработке по шаблону) и от точности копирования.

Влияние износа ЭИ. Режим обработки, толщина детали, скорость перемотки проволоки определяют величину ее износа. Уменьшение сечения проволоки после ее выхода из зоны обработки устанавливает минимально необходимое для устойчивого процесса натяжение ее, исключаящее обрыв,

$$P_{н\text{ мин}} = \frac{K_0 \cdot A \cdot P_{уа} \cdot (W_n)^{\frac{3}{2}}}{2 \epsilon} + P_{ч_0}, \quad (16)$$

где A - расстояние между токопроводящими опорами-контактами;
 $P_{\text{вн}}$ - среднее за импульс давление на единицу поверхности лунки, образующейся на поверхности проволоки;
 $P_{\text{н0}}$ - начальное натяжение проволоки, необходимое для ее правки и для компенсации сил упругости;
 ϵ - величина прогиба проволоки в зоне обработки;
 $W_{\text{и}}$ - средняя энергия единичного импульса;
 K_0 - коэффициент, зависящий от рабочей среды, материала электродов, продолжительности импульсов и др.
 Минимально допустимая величина сечения проволоки после ее износа для стабильной работы без обрыва

$$S_{\text{min}} = K_5 \frac{P_{\text{нmin}}}{\sigma}, \quad (17)$$

где K_5 - коэффициент влияния концентрации напряжений от воздействия эрозии;
 σ - удельная сила разрыва для проволоки.
 Наименьшая скорость перемотки проволоки, при которой максимальна эффективность ее использования и гарантируется прочность проволоки не ниже ее прочности на разрыв,

$$V_{\text{нрmin}} = \frac{K_4 \cdot W_{\text{и}} \cdot f}{\frac{\pi \cdot d_{\text{эл}}^2}{4} - S_{\text{min}}} \quad \text{мм/сек}, \quad (18)$$

где K_4 - коэффициент влияния рабочей среды, материала, размеров электродов и продолжительности импульсов;
 $d_{\text{эл}}$ - диаметр проволоки до ее износа.
 Радиус скругления внутренних углов паза для проволоки диаметром от 0,1 до 0,3 мм с погрешностью не больше 10-12%

$$r_g = \sqrt{\frac{S_{\text{min}}}{\pi}}. \quad (19)$$

Влияние межэлектродного промежутка. Расчет действительных размеров получаемого контура необходимо выполнять с учетом ве-

личины межэлектродного промежутка

$$a' = a_1 + (h_n - R_z), \quad (20)$$

где a_1 - разрядный промежуток;
 h_n - приведенная глубина единичной лунки, равная сумме глубин лунок на ЭИ и детали;
 R_z - приведенная высота шероховатостей (определяется аналогично).

В общем случае величина межэлектродного промежутка зависит от емкости конденсатора-накопителя и напряжения, т.е. от электрического режима обработки:

$$a' = K_6 \cdot c^{\frac{1}{4}} \cdot u^{\frac{3}{4}}, \quad (21)$$

где K_6 - коэффициент влияния значительного количества факторов; принимая величину K_6 постоянной; выражение для a' изменяется:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для твердых сплавов } a' = 0,62 \cdot c^{\frac{1}{4}} \cdot u_c^{\frac{3}{4}} \quad \text{мкм.} \\ \text{для сталей } a' = 0,535 \cdot c^{\frac{1}{4}} \cdot u_c^{\frac{3}{4}} \quad \text{мкм.} \end{array} \right\} (22)$$

Для деталей толщиной до 1,5 мм не наблюдается разницы между зазорами на входе и выходе проволоки из детали в связи с интенсивным удалением продуктов обработки и сокращением числа разрядов между боковыми стенками пазов через частицы отходов. Для больших толщин величина зазора на выходе проволоки из детали:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для твердых сплавов } a = 0,62 \cdot c^{\frac{1}{4}} \cdot u_c^{\frac{3}{4}} \cdot (1 + 0,014 h) \text{ мкм.} \\ \text{для сталей } a = 0,535 \cdot c^{\frac{1}{4}} \cdot u_c^{\frac{3}{4}} \cdot (1 + 0,014 h) \text{ мкм.} \end{array} \right\} (23)$$

где h - толщина детали.

Погрешность расчета - не больше 7% во всем интервале изменения скорости перемотки проволоки и ее натяжения.

Качество обработанной поверхности

При ЭИС обработке качество поверхности оценивается шерохо-

ватостью (глубиной единичных лунок) и толщиной измененного слоя. Природа образования единичных лунок и поверхностного измененного слоя определяется одинаковыми физическими законами термического характера. Толщина измененного слоя значительно больше высоты микронеровностей, создаваемых единичными лунками.

Влияние шероховатости. Рельеф обработанной поверхности зависит от размеров единичных лунок, т.е. от материала электродов, режима обработки и др. Основное влияние оказывает режим обработки (емкость конденсатора-накопителя и напряжение). При прочих равных условиях в материалах с более высокой температурой плавления глубина лунок меньше. Увеличение W_H и снижение f приводит к увеличению размера лунок.

Оценка шероховатости поверхности более объективна по наибольшей высоте микронеровностей. Однако применяют и оценку по классам чистоты поверхности по ГОСТ 2789-59:

$$R_a = K_8 \cdot c^{\frac{1}{2}} \cdot u_c^{\frac{1}{2}} \quad \text{мкм}, \quad (24)$$

где K_8 - коэффициент влияния материала детали, учитывающий и коэффициент перекрытия лунок.

Влияние поверхностного измененного слоя. Поверхностный слой имеет материал, отличающийся от основного структурными и фазовыми изменениями. Толщина этого слоя зависит от режима обработки и свойств обрабатываемого материала, но мало зависит от толщины детали, диаметра проволочного ЭИ и скорости его перематки,

$$T = K_9 \cdot c^{\frac{1}{2}} \cdot u_c^{\frac{1}{2}} \quad \text{мкм}, \quad (25)$$

где K_9 - коэффициент влияния материала детали и рабочей среды,
 T - толщина измененного слоя.

Измененный слой образуется в результате химического взаимодействия части расплавленного материала, остающегося в лунке, с парами и продуктами пиролиза рабочей жидкости в зоне действия импульса. Для сталей при обработке в рабочей среде, содержащей жидкие углеводороды (керосин), характерно насыщение слоя углеродом и закалка его.

Литература

1. В.П. Смоленцев. Изготовление инструмента непрофилированным электродом. М., "Машиностроение", 1967, гл.Ш, IV, У.
2. А.Л. Лившиц, А.К. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. Электроимпульсная обработка металлов. М., "Машиностроение", 1967.
3. Е.М. Левинсон, В.С. Лев, Б.Г. Руткин, А.Л. Лившиц, Л.А. Юткин. Электроразрядная обработка материалов. Л., "Машиностроение", 1971, разд. "Электроэрозионная обработка металлов".
4. Технология материалов в приборостроении. Под ред. А.Н. Малова. М., "Машиностроение", 1969.

Работы № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРИ ЭИС ОБРАБОТКЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЭИ
(КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ)

Цель работы

1. Ознакомиться с электроэрозионными процессами при ЭИС обработке профилированным ЭИ.
2. Ознакомиться с влиянием различных факторов на технологические характеристики ЭИС обработки профилированным ЭИ.

Задание

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия ЭИС установки 4В721.
2. Исследовать производительность, точность, качество обработки и износ ЭИ при использовании **RC**-генератора импульсов и профилированного ЭИ.

Методика и порядок проведения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия установки, используя описание и руководство по ее эксплуатации. Специфика обработки на ЭИС установках требует особого внимания по выполнению правил охраны труда.
2. Проверить положение всех коммутирующих элементов передней панели (до начала работы на установке они должны быть выключены).
3. Ознакомиться с содержанием лабораторной работы. Получить у преподавателя вариант задания. После краткого собеседования с преподавателем, подтверждающего достаточные знания для работы на установке, по полученному варианту необходимо:
 - а) Выполнить расчет заданного взаимного положения отверстий с учетом рекомендаций по использованию оптической отсчетной системы установки. Для этого необходимо выставить заготовку вращением поворотного стола установки таким образом, чтобы последующие перемещения ЭИ производились в предварительно нанесенных на заготовку координатных осях. Выставление заготовки

осуществляется методом последовательного приближения с помощью иглообразного указателя. Достаточно добиться перемещения указателя хотя бы по одной из осей координат. После замены иглоуказателя на ЭИ последний устанавливается в положение для прошивки I-го отверстия. Координаты центров отверстий указаны в таблице вариантов задания. Точность получаемых межцентровых расстояний, определяется точностью выставления ЭИ и его перемещения в горизонтальной плоскости для прошивки всех заданных отверстий. Эта точность обеспечивается оптическими отсчетными устройствами установки (паспортная точность составляет 10 мкм).

б) Получив разрешение преподавателя, включить установку в сеть и подготовить ее к работе по заданному варианту. Для этого установить напряжение питания ручкой переключения режимов, а переключатель регулятора подачи ЭИ - для работы с *РС* -генератором. Затем кнопкой "пуск" автоматического выключателя силовой панели установки подать сетевое напряжение (загорается зеленая лампочка), поднять ванну и установить заданный режим ступенчатым переключателем емкости конденсаторов, включить тумблеры "рабочая цепь" и "приспособление", установить заданную скорость подачи ЭИ (в делениях шкалы потенциометра). После проверки преподавателем или учебным мастером правильности подготовки установки к работе наполнить ванну рабочей жидкостью, включив кнопку "пуск-насос".

Уровень жидкости над поверхностью заготовки должен быть не менее 30 мм. Включив подачу ЭИ (переключатель "инструмент" в положение "подвод", а тумблер подачи - в положение "подача вниз"), приступить к выполнению тренировочного цикла обработки при прошивке I-го отверстия. Начало процесса эрозии фиксируется по резкому замедлению стрелки индикаторной головки, а также по появлению характерного звука и отклонениям стрелки амперметра рабочего тока. Окончание сквозной прошивки фиксируется по резкому ускорению стрелки индикаторной головки. Длительность прошивки устанавливается по секундомеру. После образования сквозного отверстия выключить установку (кнопкой "стоп-насос" и переводом тумблеров "рабочая цепь" и "приспособление" в положение "выключено"). Опустив ванну и подняв ЭИ из полученного отверстия, произвести установку ЭИ в положение для прошивки 2-го отверстия (по данным таблицы координат). 2-е, 3-е и 4-е отверстия проши-

ваются аналогично I-му.

в) Выполнить полный объем заданного варианта обработки, используя полученный опыт и рекомендации п. б). При этом исследовать зависимости производительности, точности, качества обработки и износа ЭИ от параметров режима и материала обрабатываемой заготовки. При обработке с вращением ЭИ или с его вибрацией строго соблюдать правила включения электродовращателя или вибратора (см. описание лабораторной работы). В процессе исследований производить визуальные наблюдения за параметрами разрядных импульсов (форма, длительность, частота повторения) и за стабильностью процесса эрозии. Для этой цели использовать осциллограф типа С1-16 или РБ-1. Обратить особое внимание на синхронизацию и развертку в связи с несинусоидальной формой разрядных импульсов и наличием большого числа гармоник. Результаты наблюдений зафиксировать в виде графиков, воспроизводящих форму основной гармоники разрядного импульса. По временным меткам установить длительность импульсов и частоту их повторения f . Величину f для сравнения определить также с помощью цифрового счетчика импульсов типа Ф-552. Подключение осциллографа и счетчика импульсов производить по схеме рис. 6 (см. работу № I). Применить схему внешней синхронизации осциллографа напряжением, снимаемым с разрядного промежутка.

Для последующего сравнения с результатами обработки при использовании генератора релаксационных колебаний (РС - генератор) зафиксировать форму разрядных импульсов при обработке на генераторе типа ШГИ 40-440 (высокочастотный генератор униполярных импульсов). Для этого использовать те же осциллографы и счетчик разрядных импульсов. Их подключение аналогично схеме, приведенной ранее. При обработке фиксировать длительность прошивки отверстия по секундомеру. Обработку на ВЧ-генераторе выполняет непосредственно учебный мастер!

г) Выполнить обработку полученных результатов. Производительность определяется по объему материала, удаленного в единицу времени. Для этого необходимо четко фиксировать начало и окончание обработки по секундомеру. Объем всего удаленного материала рассчитывается по толщине детали и входному и выходному диаметрам полученного отверстия.

Точность обработки определяется по точности полученного

профиля. Для этого измеряются диаметры входного и выходного отверстий ($d_{вх}$ и $d_{вых}$). Отношение их разности к толщине детали служит мерой оценки точности формы:

$$\Delta_{ср} = \frac{d_{вх} - d_{вых}}{h}, \quad (26)$$

где $\Delta_{ср}$ - погрешность формы полученного отверстия,
 h - толщина обрабатываемой детали.

Погрешности получаемых горизонтальных размеров вызываются образованием бокового межэлектродного промежутка, поперечным износом ЭИ, биениями ЭИ при обработке с его вращением и паразитными боковыми колебаниями при использовании вибрации ЭИ. Величину погрешности можно определить сравнением диаметров ЭИ и полученного отверстия:

$$\delta_{\delta} = \frac{d_0 - d_{ЭИ}}{2} \quad \text{мкм}, \quad (27)$$

где δ_{δ} - боковой межэлектродный промежуток,
 d_0 - диаметр полученного отверстия,
 $d_{ЭИ}$ - диаметр ЭИ.

Измерение диаметров отверстия и ЭИ необходимо производить в различных плоскостях по углу полнорота, а среднее значение диаметра определять с точностью до 0,01 мм.

Качество обработки устанавливается по одному из показателей - величине микронеровностей обработанной поверхности (измеряются микронеровности кромки полученного отверстия) с использованием методики по работе № I.

Поперечный износ ЭИ выявляется по конусности его торцевой рабочей части (необходимо определить абсолютный и относительный износ). Продольный износ, не искажающий профиля получаемого сквозного отверстия, не рассматривается.

Все измерения при обработке полученных образцов выполнять на микроскопе типа БМИ.

д) Выполнить сравнение полученных результатов с возможными теоретическими, расчет которых производить по рекомендациям

теоретической части работы.

До настоящего времени для копировально-прошивочных операций не разработаны основные обобщающие соотношения по зависимостям технологических характеристик от различных факторов - режимов обработки, материалов ЭИ и детали и др. Исключение составляют только соотношения (32) и (34), имеющие относительно частный характер. Имеется обширная справочная литература, содержащая большое число конкретных и частных сведений. Поэтому, чтобы не затруднять выполнение лабораторной работы достаточно трудоемкой работой со справочниками, необходимо выполнить расчет по качеству обработанной поверхности, используя (34) и (35), а результаты экспериментов по производительности, точности и износу ЭИ только обосновать с учетом физических явлений, характерных для выполняемого варианта обработки. Установить возможные причины погрешностей обработки и дать рекомендации для повышения технологических характеристик.

При сравнении необходимо использовать результаты обработки 5-го отверстия, выполненного учебным мастером на генераторе ШГИ 40-440. Кроме того, сравниваются параметры процесса зарядки конденсатора-накопителя (RC-генератор), полученные с помощью осциллографа и характерные для реального процесса, с теми же параметрами, характерными для теоретического расчетного процесса. Этот расчет производится с помощью цифровой вычислительной машины "Наири". Сравнение необходимо для выявления роли нестабильности процесса обработки в связи с низкой повторяемостью параметров единичных разрядных импульсов.

Для студентов групп профилирующей специальности обязательным является составление программы расчета параметров процесса зарядки по выражению

$$u_c = u_n (1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (28)$$

где u_n - напряжение источника питания;

t - время, прошедшее с начала зарядки;

R и C - параметры зарядной цепи генератора.

В идеальном случае состояние межэлектродного промежутка на

влияет на повторяемость параметров процесса зарядки конденсатора для любого по очередности разрядного импульса. В реальных условиях нестабильность проявляется в изменении параметров процесса — изменяется форма кривой, характеризующей зарядку различных по следованию импульсов.

Студенты всех других специальностей используют данные машинного расчета, полученные заранее.

е) Составить отчет по выполненной работе. Отчет должен содержать:

описание принципа действия установки по упрощенной схеме, приведенной в лабораторной работе;

исходные данные варианта задания;

расчет и чертеж взаимного положения отверстий; таблицу координат центров отверстий;

результаты исследований и расчетов, иллюстрированные графиками и таблицами, раскрывающими зависимости:

$V, Q, f, R_a, h_{с.к}, a', \Delta\varphi = \varphi (U_c, C, J_{кз}, A_{вигр}, V_{вращ}, \text{материал ЭИ и детали});$

масштабное изображение формы зарядного импульса для каждого режима (реального и теоретического);

обоснование полученных результатов. Рекомендации по улучшению технологических характеристик на основе проведенных исследований.

Теоретическая часть

I. Особенности установки для электроискровой обработки профилированным ЭИ на примере установки модели 4В-72I. Назначение — обработка деталей из токопроводящих материалов при выполнении копировально-прошивочных операций повышенной точности.

Обработка — электроискровая профилированным ЭИ с применением генератора I типа (RC — генератор релаксационных колебаний) с емкостным накопителем. Возможна высокочастотная ЭИС обработка с применением ВЧ-генератора модели ВГИ-3 (из комплекта установки) или любого другого, например ШГИ 40-440. Возможна обработка непрофилированным проволочным ЭИ при использовании специальной приставки из комплекта установки.

Упрощенная схема и принцип действия RC — генератора, а также описание установки рассмотрены в работе № I.

П. Особенности обработки профилированным ЭИ при выполнении копировально-прошивочных операций. В настоящее время наибольшее применение находит способ формообразования обрабатываемых поверхностей копированием формы ЭИ при его поступательном (обычно вертикальном) перемещении - подаче относительно обрабатываемой поверхности. Необходимое формообразование достигается использованием специально профилированного ЭИ, негативно отображающего заданный профиль. Технологические возможности ЭИ копировально-прошивочных станков, ограниченные только поступательным перемещением ЭИ, значительно расширяются применением различных приспособлений и оснасток - электродовращателей, вибраторов и т.п. Весьма целесообразны также широкодиапазонные генераторы импульсов, обеспечивающие необходимый для копировально-прошивочных операций диапазон режимов обработки. Релаксационные RC-генераторы, наиболее простые в обслуживании и обеспечивающие плавную пере-стройку режимов вплоть до прецизионных особо мягких, также нахо-дят широкое применение.

Наиболее целесообразны копировально-прошивочные операции для получения сложнофазонных сквозных и глухих отверстий и по-лостей, а также отверстий небольших диаметров и узких пазов в деталях из твердых и вязких материалов. Такие операции неосущест-вимы или чрезвычайно сложны для обычной механической обработки.

При копировально-прошивочных операциях использование в ка-честве ЭИ стандартно-профильного материала (трубки, прутки и т.п.) не всегда возможно. Для изготовления ЭИ применяют сле-сарно-механическую обработку, литье, штамповку, металлизацию на-пылением, гальванопластику и др. Метод гальванопластики является наиболее прогрессивным, особенно при жестких требованиях к точнос-ти изготовления ЭИ.

Производительность, точность и качество обработанной по-верхности и износ ЭИ составляют технологические характеристики ЭИС обработки. Износ ЭИ при копировально-прошивочных операциях может оказать комплексное влияние на остальные характеристики: производительность и точность обработки. Поэтому необходимо исключить или уменьшить износ ЭИ. Это достигается направленным использованием физических явлений, характеризующих так называе-мый полярный эффект. Направленное преимущественное действие раз-рядов на материал детали и сравнительно незначительное - на ЭИ.

создается при определенной полярности подключения ЭИ и детали к источнику импульсного напряжения. Для РС-генераторов характерна отрицательная полярность у ЭИ и положительная – у обрабатываемой детали. Кроме того, на проявление полярного эффекта влияют материал ЭИ и детали, свойства рабочей жидкости, параметры разрядных импульсов и относительная скорость перемещения электродов.

В зависимости от требований к технологическим показателям обработки операции прошивания можно выполнять за один проход с высокой производительностью при невысоких точности и качестве обработанной поверхности. Жесткие требования к точности и качеству обработки вынуждают применять несколько проходов со сменой инструмента (глухая прошивка) или использовать ступенчатый ЭИ. Основная цель первого прохода (первой ступени) – максимально возможная производительность с обработкой на черновом режиме; финишного прохода (последней ступени) – наиболее высокое качество обработанной поверхности при использовании мягкого чистового режима. Параметры режима на промежуточных ступенях выбираются по оптимальному соотношению производительности и оставляемому припуску под последующую ступень обработки.

Производительность обработки при копировально-прошивочных операциях оценивается количеством материала ($\text{мм}^3/\text{мин}$ или $\text{г}/\text{мин}$), снимаемого с обрабатываемой детали в единицу времени. Повышению производительности способствует принудительное удаление продуктов обработки из межэлектродного промежутка в результате низкочастотных колебаний ЭИ в направлении подачи, вращения ЭИ при прошивании цилиндрических отверстий или принудительного нагнетания рабочей жидкости в зону действия разрядных импульсов.

Вибрация ЭИ или детали вызывает интенсивный обмен рабочей жидкости в межэлектродном промежутке и удаление продуктов эрозии и газовых пузырей. Кроме того, стабилизируется процесс обработки. Это позволяет применить более жесткий режим, т.е. увеличить производительность. Однако на мягких режимах величина межэлектродного промежутка мала, и значительные амплитуды вибрации могут вызвать частые короткие замыкания ЭИ и детали, а также уменьшить общее число разрядных импульсов. Последнее возможно в связи с увеличением времени, в течение которого величина межэлектродного промежутка слишком велика для возникновения пробоя. В целом это

может уменьшить производительность. Поэтому при обработке на мягких режимах необходима точная величина амплитуды вибраций. Наиболее целесообразна вибрация ЭИ при обработке на грубых режимах и при возможной нестабильности процесса эрозии.

Вращение ЭИ при прошивании цилиндрических отверстий улучшает условия эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, что особенно важно при получении глубоких отверстий. Стабилизация процесса обработки вызывает увеличение производительности.

Наиболее неблагоприятные условия стабильного процесса обработки создаются при получении отверстий и пазов небольших размеров (площадь обработки до 1 мм^2). Возможность обработки обеспечивается использованием маломощных режимов, применением проволочного или ленточного ЭИ, ограничением глубины обработки величиной, не превышающей 10 диаметров ЭИ, вибрацией ЭИ. Амплитуда вибраций определяется в соответствии с диаметром ЭИ (до 5-7 мкм для микроотверстий). Перечисленные приемы и применение РС-генератора с наиболее благоприятными режимами (большая скважность с увеличением пауз между единичными импульсами и уменьшенная скорость подачи ЭИ) создают оптимальные условия удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка. Это приводит к достаточной для обработки производительности несмотря на небольшие величины межэлектродного промежутка, неблагоприятные для стабильного процесса эрозии.

Нагнетание рабочей жидкости в некоторых случаях целесообразнее вибраций ЭИ, так как уменьшает число коротких замыканий и пропусков разрядных импульсов. Однако усложняется конструкция ЭИ и установки. Кроме того, нагнетание жидкости неосуществимо при прошивании отверстий диаметром до 1 мм.

Площадь обработки оказывает влияние на производительность. При неизменном рабочем токе с ростом площади производительность в начале растет, затем рост ее прекращается и с определенного момента времени начинает снижаться в связи с ухудшением условий удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка. Увеличение рабочего тока сопровождается возрастанием оптимальной величины площади обработки. При получении профиля сложной объемной формы с горизонтальными участками за площадь обработки принимается проекция обрабатываемой поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению подачи. При отсутствии го-

горизонтальных участков расчетная площадь определяется из соотношения

$$F_{расч} = \frac{F_{пр}}{\cos \psi}, \quad (29)$$

где ψ — наименьший угол наклона поверхности к горизонтальной плоскости.

В зависимости от профиля заданного для обработки сквозного отверстия возможно применение пустотелого (трепанующего) ЭИ, что увеличивает производительность. Однако необходим такой режим обработки, при котором не происходит шлакования и заполнения межэлектродного промежутка газовым пузырем, снижающим производительность.

При прямом копировании точность получаемых размеров зависит от точности изготовления ЭИ, перпендикулярности оси подвижного шпинделя и неподвижной головки установки к плоскости стола, точности установки ЭИ и детали относительно стола и относительно друг друга, от жесткости всей системы, стабильности напряжения за время обработки, от постоянства амплитуды колебаний вибратора и ЭИ (при работе с вибрациями).

Характерной особенностью копирования — прошивания — является воспроизведение в детали профиля, соответствующего проекции ЭИ на обрабатываемую поверхность (рис. 9). Такая особенность определяет возможные погрешности обработки. Необходимая взаимная ориентация ЭИ, детали и стола установки достаточно просто обеспечивается для получаемого осесимметричного отверстия. При более сложном профиле необходимо выставить деталь по отдельным образующим ЭИ с помощью специальных мерительных призм.

Полученный профиль обработанного отверстия отличается от формообразующего профиля ЭИ на определенную величину суммарной погрешности

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{ст} + \Delta_{г} + \Delta_{и} + \Delta_{пр}, \quad (30)$$

где $\Delta_{ст}$ — составляющая, обусловленная неточностями собственно ЭИ установки (деформация элементов в процессе обработки и т.п.);

- Δ_r — температурная погрешность в связи с нагревом ЭИ и детали;
- Δ_u — составляющая в результате неточности взаимной установки ЭИ и детали;
- $\Delta_{пр}$ — погрешность, возникающая в процессе эрозии в связи с износом ЭИ и образованием межэлектродного промежутка.

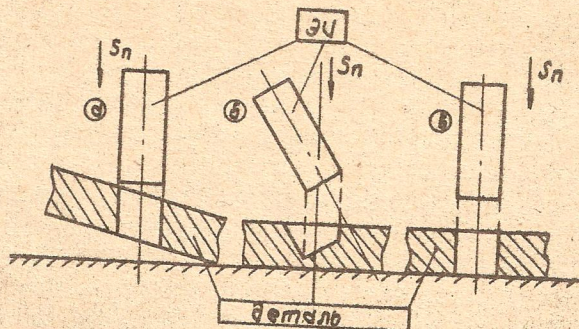


Рис. 9. Схемы формообразования некоторых погрешностей отверстия:
 а — деталь перпендикулярна поверхности стола,
 б — направление подачи перпендикулярно осевым линиям шпинделя и ЭИ,
 в — обработка без погрешностей

Профиль формообразующей поверхности ЭИ строится в соответствии со схемами формообразования, требованиями к точности и качеству обработанной поверхности, схемой образования межэлектродного промежутка. В связи с этим точность размеров ЭИ должна быть на класс выше точности получаемых размеров детали.

Поперечные сечения рабочей части ЭИ представляют собой эквидистанты соответствующих сечений обрабатываемого отверстия. Размеры сечений чернового ЭИ и детали должны различаться на величину Δ (рис. 10):

$$\Delta = z_1 + z_0 + \delta_1, \quad (31)$$

где z_1 — толщина слоя, который необходимо снять для удаления

дефектного поверхностного слоя после черновых и промежуточных операций ЭЗ прошивания;

Z_0 - толщина слоя, удаляемого для компенсации погрешности обработки;

δ_s - боковой межэлектродный промежуток.

Боковой межэлектродный промежуток образуется в результате действия паразитных разрядов между боковыми поверхностями ЭИ и образующейся в детали полости. Величина

δ_s зависит от интенсивности очистки среды в рабочей зоне, от величины напряжения, тока и емкости конденсатора-накопителя.

В общем случае поперечные размеры чистового ЭИ должны быть меньше размеров получаемого отверстия только на величину δ_s .

Зависимость величины

δ_s от электрического режима обработки выражается соотношением

$$\delta_s = C_s \cdot W_n^q \text{ мкм,} \quad (32)$$

где C_s - постоянный коэффициент (для сталей $C_s = 240$ мкм/дж);

q - показатель степени (для сталей $q = 0,36$);

W_n - энергия единичного импульса, дж.

Возможно нахождение величины δ_s по значениям U_c и C :

$$\delta_s = 0,75 \cdot U_c \sqrt{C}, \quad (33)$$

где U_c - напряжение зарядки конденсатора, в;

C - емкость конденсатора-накопителя.

На точность обработки глухих отверстий существенное влияние

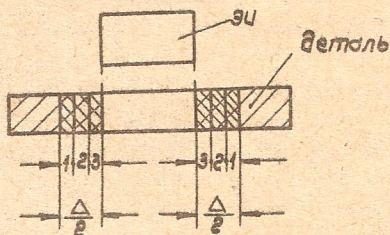


Рис. 10. Схема определения размеров профилированного ЭИ при прошивании чернового отверстия: 1 (Z_0) - дефектный слой, снимаемый после черновых и промежуточных операций; 2 (Z_0) - слой, удаляемый для компенсации погрешностей предварительной обработки; 3 (δ_s) - боковой межэлектродный промежуток

оказывает износ ЭИ. Торцевой износ уменьшает глубину получаемого отверстия. Величина торцевого износа зависит от режима обработки и от свойств материала детали и ЭИ.

По мере затлубления ЭИ в образующуюся полость детали становится неодинаковой длительность действия эрозии на участки боковой поверхности ЭИ и полости. Участки, расположенные вблизи от торца ЭИ, изнашиваются сильнее в связи с большей длительностью действия боковых разрядов. В результате образуется конусность отверстия, на величину которой влияют материал ЭИ и детали, режим обработки. Искажения формы сквозного отверстия устраняют калиброванием его еще не изношенной частью ЭИ. Для глухого отверстия применяют повторную чистовую обработку ЭИ с размерами, увеличенными против размеров чернового. Снижению износа способствует также принудительное очищение межэлектродного промежутка от продуктов эрозии нагнетанием рабочей жидкости в зону обработки. Это значительно снижает количество паразитных боковых разрядов. При повышенных требованиях к прямолинейности и параллельности образующих поверхностей отверстия к его оси целесообразен помимо нагнетания еще и отсос рабочей жидкости из зоны обработки.

Износ острых кромок и углов значительно больше по сравнению с плоскими поверхностями (особенно при прошивании глухих отверстий). Поэтому часто целесообразна обработка сложнопрофильного отверстия несколькими ЭИ простой формы отдельно, поочередно с получением в результате заданного профиля отверстия с более высокой точностью.

Одним из показателей качества обработки является высота микронеровностей на полученной поверхности, зависящая от режима обработки, свойств материала ЭИ и детали, степени очистки от продуктов эрозии рабочей жидкости, поступающей в межэлектродный промежуток. Последняя особенность прежде всего характерна для обработки на высокочастотных режимах при незначительной мощности разрядных импульсов.

При прошивании глухих отверстий чистота торцевой поверхности обычно ниже, чем при разрезании или шлифовании перемещающимся ЭИ. Прошиванию характерно образование на торцевой поверхности ЭИ микронеровностей, копирующихся на торцевую поверхность получаемой полости. Это снижает качество обработанной поверхности.

Соотношение между высотой микронеровностей H и энергией импульсов $W_{\text{и}}$ имеет вид

$$H = C_{\text{и}} W_{\text{и}}^p \quad \text{мкм,} \quad (34)$$

где $C_{\text{и}}$ - коэффициент влияния материала детали, мкм/дж;
 p - показатель степени при обработке поверхностей, перпендикулярных к каналу разряда.

Для случая обработки медным ЭИ в диэлектрической среде - кerosине - среднее квадратичное отклонение микронеровностей от средней линии профиля можно определить из выражения

$$h_{\text{к}} = 0,4 \cdot C_{\text{к}}^{\frac{1}{2}} \cdot U_{\text{к}}^{\frac{1}{2}} \quad \text{мкм,} \quad (35)$$

где $C_{\text{к}}$ - емкость конденсатора-накопителя, мкф;
 $U_{\text{к}}$ - напряжение зарядки его, в.

Литература

1. Е.М. Левинсон, В.С. Лев, Б.Г. Гуткин, А.Л. Лившиц, Л.А. Юткин. Электроразрядная обработка материалов. Л., "Машиностроение", 1971, разд. "Электроэрозионная обработка металлов".
2. А.Л. Лившиц, А.К. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. Электроимпульсная обработка металлов. М., "Машиностроение", 1967.
3. Технология материалов в приборостроении. Под ред. А.Н. Малова. М., "Машиностроение", 1969.

Содержание

Введение	3
Общие положения теории и технологии электроэрозионной обработки материалов	4
Работа № 1. Исследование технологических характеристик при ЭИС обработке непрофилированным проволочным ЭИ	8
Работа № 2. Исследование технологических характеристик при ЭИС обработке профилированным ЭИ (копировально-прошивочные операции)	24