

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Учреждение образования
"Витебский государственный технологический университет"**

В.В. Савицкий

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

**Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов специальности
«Оборудование и технологии высокоэффективных процессов
обработки материалов» учреждений, обеспечивающих получение
высшего образования**

**Витебск
2006**

УДК 621.9.048.4(075.8)

ББК 34.431

С13

Рецензенты: доктор технических наук, профессор **М.Г. Киселев**,
заведующий кафедрой «Конструирование
и производство приборов» БНТУ

доктор технических наук, профессор **П.Н. Богданович**,
заведующий кафедрой «Материаловедение, обработка и
упрочнение материалов» БелГУТа

Савицкий, В.В.

С13 Электроэрозионные методы обработки материалов : учеб. пособие для вузов / В.В. Савицкий.
– Витебск : УО "ВГТУ", 2006. – 276 с.

ISBN–985–6655–74–9

Рассматриваются методы электроэрозионной обработки материалов в различных диэлектрических жидкостях, физическая сущность и условия протекания. Приведена классификация оборудования, используемого для осуществления электроэрозионных методов обработки, а также устройство и конструктивное исполнение основных частей электроэрозионных станков. Даны технические возможности электроэрозионной обработки и области ее применения при изготовлении деталей различного назначения вырезанием, контурной и прошивочной обработкой. Приведены материалы, используемые для изготовления электродов-инструментов. Рассматриваются вопросы выбора сочетания материала обрабатываемой заготовки и электрода-инструмента, а также технологические процессы обработки заготовок, порядок выбора и расчета режимов, электродов-инструментов, рабочих жидкостей. Разбираются принципы программирования обработки на станках и некоторые языки программирования, приводятся примеры составления программ.

Учебное пособие составлено в соответствии с учебными программами «Теоретические основы электрофизических методов обработки», «Электроэрозионные методы обработки материалов», «Электроэрозионное оборудование» для студентов специальности 1-36 01 04 «Технология и оборудование высокоэффективных процессов обработки материалов». Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.9.048.4(075.8)

ББК 34.431

ISBN–985–6655–74–9

© Савицкий В.В., 2006 г.

© Издательство УО «ВГТУ»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Раздел 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	9
1.1. Технические термины.....	9
1.2. Этапы развития электроэрозионной обработки.....	20
1.3. Технологические возможности и области применения электроэрозионной обработки.....	27
1.4. Преимущества электроэрозионной обработки.....	49
1.5. Основы электроэрозионной обработки.....	58
1.5.1. Общее описание электрической эрозии.....	58
1.5.2. Способы генерирования импульсных разрядов и их характеристики.....	65
1.5.3. Электрофизические процессы в межэлектродном промежутке.....	72
1.5.4. Тепловые процессы на электродах.....	75
1.5.5. Механизм удаления продуктов эрозии.....	79
1.5.6. Взаимосвязь геометрических характеристик детали и электрических параметров обработки.....	82
1.5.7. Частотные характеристики обработки.....	85
1.6. Конструкции электроэрозионных станков.....	89
1.6.1. Классификация электроэрозионного оборудования.....	91
1.6.2. Производители электроэрозионного оборудования.....	93
1.6.3. Устройство вырезных станков.....	95
1.6.4. Устройство станков для объемного копирования.....	100
1.6.5. Приводы электроэрозионных станков.....	103
1.6.6. Генераторы импульсов.....	115
1.6.7. Приспособления и инструментальная оснастка для электроэрозионной обработки.....	120
1.7. Устройство и функционирование станка с ЧПУ.....	132
1.8. Рабочие жидкости.....	143
1.9. Прокачка диэлектрической жидкости.....	151
1.10. Электроды-инструменты и материалы, применяемые для их изготовления.....	157
Раздел 2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК	163
2.1. Общие понятия и определения.....	163
2.2. Технологические показатели электроэрозионной обработки.....	164
2.2.1. Производительность.....	165
2.2.2. Точность обработки.....	173
2.2.3. Качество поверхности.....	180
2.3. Формообразование поверхностей при электроэрозионной обработке.....	189
2.4. Последовательность переходов при электроэрозионной обработке заготовок.....	194
2.5. Сочетания материала электрода-инструмента и заготовки.....	196
2.6. Выбор режимов обработки.....	201
2.7. Особенности обработки и доводки поверхностей при использовании различных электродных материалов.....	215
2.8. Автоматизированный расчет режимов прошивочной обработки.....	226
2.9. Электроды-инструменты для прошивочной обработки.....	229

2.10.	Обработка заготовок на вырезных станках.....	235
2.11.	Программирование обработки на электроэрозионных станках.....	242
2.12.	Технологические процессы электроэрозионной обработки заготовок.....	254
2.12.1.	Обработка деталей штампов и литьевых форм.....	254
2.12.2.	Обработка рабочих колес насосов, турбин и компрессоров.....	259
2.12.3.	Прошивочная обработка щелей, пазов, глубоких отверстий.....	260
2.12.4.	Обработка заготовок из твердых сплавов.....	261
2.12.5.	Клеймение и гравирование. Исправление брака в деталях различного назначения.....	262
	Литература.....	264
	Приложения.....	267

Витебский государственный технологический университет

ВВЕДЕНИЕ

Уровень техники определяется совершенством технологических процессов изготовления деталей и узлов. Основную долю в производственных процессах до недавнего времени занимали традиционные методы обработки металлов резанием. Такие методы технически просты, обеспечивая при этом достаточную шероховатость поверхностей и точность обработки.

Технический прогресс выводит в последнее время на первое место новые технологические процессы обработки материалов. К ним относятся способы электрофизической и электрохимической обработки. Среди электрофизических методов наиболее широкое распространение получили различные способы обработки заготовок путем эрозии их материала (электроискровой и электроимпульсный, электроконтактный, ультразвуковой и др.). Наиболее часто при изготовлении сложных деталей из токопроводящих материалов применяется электроэрозионная обработка в диэлектрических жидкостях. Сущность электрической эрозии состоит в разрушении поверхности заготовки за счет электрических разрядов, возникающих между инструментом и заготовкой, которые находятся под напряжением в жидкости (масле, воде и др.). В зависимости от схемы обработки и применяемых инструментов различают объемное копирование, прошивочную, вырезную и контурную электроэрозионную обработку.

При прошивочной обработке электрод-инструмент имеет форму, обратную профилю углубления в детали. Таким способом обычно получают отображение формы поверхности электрода-инструмента на поверхности заготовки, отверстия постоянного сечения. Существуют методы прямого и обратного копирования. Вырезание контуров осуществляется непрерывно перематываемым проволочным инструментом определенного диаметра, перемещаемым по заданной траектории. Контурную обработку осуществляют с помощью электродов простой формы, которые перемещают по сложной пространственной траектории. Весь припуск удаляется за счет последовательных проходов электрода-инструмента, благодаря чему в заготовках получают полости и отверстия практически любой формы.

При осуществлении каждого из приведенных способов производительность обработки выше, чем при традиционной обработке металлов резанием.

Только обдирочное и глубинное шлифование, а также высокоскоростная фрезерная обработка могут обеспечить примерно одинаковую (а в ряде случаев и бóльшую) с электроэрозионной обработкой производительность. Электроэрозионная обработка дает существенные преимущества особенно на чистовых и доводочных операциях технологического процесса получения сложных поверхностей, точных деталей, а также при обработке больших площадей (500 – 10000 см² и более), например, полостей литьевых форм, используемых для изготовления деталей из пластмасс (корпусов и крышек телевизоров и т.п.), прессовой оснастки для изготовления деталей в автомобильной, авиастроительной и др. отраслях промышленности.

В пособии рассматриваются основные термины и определения, используемые в электроэрозионной обработке материалов. Часть приведенных терминов стандартизована. Приводятся также определения, которые широко используются в руководствах по эксплуатации, паспортах на оборудование и технологических инструкциях иностранных производителей. Необходимость их рассмотрения связана с тем, что за последние 10-15 лет оборудование импортного производства находит все более широкое применение на предприятиях Беларуси, России и других государств СНГ. Причем наибольшее применение получили электроэрозионные станки производства Швейцарии, Японии, Тайваня и некоторых других стран.

В предлагаемом пособии рассматриваются в основном вопросы применения электроэрозионной обработки для изготовления деталей из различных материалов. Приводятся основы электрической эрозии электрода-инструмента и заготовки, которые находятся под напряжением в диэлектрической жидкости. Поясняются основные условия, при которых возникает, протекает и затухает импульсный разряд, а также факторы, оказывающие влияние на электрическую эрозию заготовки и электрода-инструмента.

Рассматривается устройство станков и их отдельных узлов на примере электроэрозионного оборудования, произведенного на заводах Европы, Японии и других стран. Для выполнения операций электроэрозионной обработки применяют широкую гамму станков. Основными мировыми производителями в настоящее время являются Япония (фирмы «Sodick», «Makino», «Mitsubishi» и др.) и Швейцария («Charmilles Technologies», «AGIE»), выпускающие основную долю электроэрозионных станков с развитыми системами числового программ-

ного управления (около 87% мирового производства). Приведенные фирмы имеют предприятия не только в Японии и Швейцарии, но и на Тайване, в Китае, Таиланде и др. странах. На мелких предприятиях широко применяется электроэрозионное оборудование с ручным управлением. Одним из лидеров в производстве такого недорогого оборудования, в том числе и с ЧПУ, является Тайвань (по данным на 2004 г.).

В состав электроэрозионного оборудования обычно входят: механическая часть с приводами, на которой закреплена ванна для обработки, генератор импульсов, агрегат для хранения и охлаждения диэлектрической среды, система ЧПУ и другие части. Некоторые электроэрозионные станки не содержат ванн для диэлектрических жидкостей, а обработка происходит в струе рабочей жидкости.

Характерной особенностью электроэрозионного оборудования является наличие в их составе мощных систем ЧПУ, позволяющих осуществлять обработку сложных поверхностей, получение которых другими методами в ряде случаев практически невозможно. При разработке технологии обработки заготовок составляют управляющие программы, которые используют для задания перемещений электроду-инструменту и заготовке, а также электрических параметров обработки. Для составления управляющих программ применяют различные языки программирования, которые обеспечивают связь системы ЧПУ с исполнительными органами станков. Рассматриваются основы программирования обработки на электроэрозионном оборудовании и некоторые языки программирования. В последнее время начали широко использоваться системы автоматизированного составления программ. Такие системы позволяют получить программу обработки заготовки в инвариантных кодах, использовать которую на имеющемся оборудовании можно с помощью так называемых постпроцессоров. Постпроцессором является специальная программа, позволяющая перевести программу в инвариантных кодах в машинную программу станка, оснащенного конкретной системой ЧПУ.

Электроэрозионная обработка сокращает количество операций технологического процесса обработки и позволяет в большинстве случаев изменить последовательность обработки заготовок, что существенно уменьшает количество используемого технологического оборудования, обслуживающего персонала, инструментов и т.п. Кроме этого обеспечивается изготовление деталей из

предварительно термически обработанных заготовок. Причем твердость исходных заготовок не оказывает какого-либо воздействия на процесс обработки.

Электроэрозионная обработка обладает широкими технологическими возможностями и обеспечивает получение деталей с высокой точностью размеров (с допуском в пределах 1,5 – 10 мкм) и минимальными параметрами шероховатости поверхности 0,04 – 0,32 мкм (по Ra). Использование специальных режимов обработки и диэлектрических жидкостей на окончательных операциях технологического процесса изготовления деталей позволяет получать поверхности с высокими механическими свойствами (твердостью), а также коррозионной стойкостью, износостойкостью, малой адгезионной способностью и т.д.

Высокая степень автономности работы электроэрозионного оборудования позволяет использовать его для обработки различных деталей по программе практически без перерывов (по 50-100 часов непрерывной работы) и без участия обслуживающего персонала.

При подготовке пособия использованы данные стандартов, справочных материалов и ряда научных публикаций по электроэрозионной обработке, рекламные и технические материалы фирм «Sodick», «Charmilles Technologies», «AGIE», CHMER EDM, OSCARMAX и др., данные сравнительных испытаний обработки деталей, а также материалы, полученные на сайте <http://www.sodick.ru> и других компаний.

Пособие предполагается использовать при подготовке инженеров по специальности 1 – 36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» специализации 1 – 36 01 04 03 «Технология электрофизической и электрохимической обработки материалов» по дисциплинам «Теоретические основы электрофизических методов обработки», «Электроэрозионные методы обработки материалов», «Электроэрозионное оборудование».

Раздел 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ

Рассмотрим основные термины и определения, которые используются для описания электрической эрозии, условий ее протекания, режимов обработки, электроэрозионного оборудования, генераторов импульсов, числового программного управления.

Часть терминов стандартизована (ГОСТ 25331 – 82). Однако за последние 10 – 15 лет на промышленных предприятиях стран СНГ начали широко применяться электроэрозионные установки импортного производства. Некоторые термины, которые используют иностранные производители электроэрозионных станков в паспортах, руководствах по эксплуатации и технологических инструкциях к оборудованию, не отражены в действующем стандарте.

Электроэрозионная обработка (Electric discharge machining – EDM, англ.) – обработка, заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под действием электрических разрядов в результате электрической эрозии.

Электрическая эрозия – разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между электродами электрических разрядов.

Электрод-инструмент (ЭИ) – электрод, являющийся при обработке инструментом.

Электрод-заготовка (заготовка) – электрод, являющийся при обработке заготовкой.

Электрический разряд – пробой в газе или жидкости.

Рабочая жидкость – жидкость, поступающая при электроэрозионной обработке в межэлектродный промежуток.

В качестве рабочих жидкостей применяются вода, углеводородные среды (керосин, масла различных марок, дизельное топливо), специальные углеводородные жидкости. Вода применяется в основном при черновой вы-

резной обработке заготовок, углеводородные жидкости – при черновом и чистовом объемном копировании полостей и отверстий, специальные углеводородные жидкости – при доводочных операциях и полировании.

Деионизированная вода – техническая вода, используемая при электроэрозионной обработке, с добавками ионообменной смолы после прекращения действия импульсного разряда.

Ионообменная смола – синтетический сетчатый полимер, в котором закреплены ионогенные группы, предназначенный для подготовки воды.

Ионообменная смола – вещество, используемое для уменьшения электрической проводимости воды, ускорения процесса деионизации межэлектродного промежутка после действия импульсного разряда и удаления минеральных примесей.

Диэлектрик – рабочая жидкость, не пропускающая электрический ток, предназначенная для создания условий, обеспечивающих протекание электрической эрозии материала заготовки, удаления продуктов эрозии и охлаждения зоны обработки.

Пробой диэлектрика – нарушение прочности диэлектрика при определенном значении напряженности электрического поля, приблизительно равном приложенному напряжению, деленному на расстояние между электродами.

Пробой диэлектрика является начальной стадией разряда, вызывающего электрическую эрозию.

Нормальный режим электроэрозионной обработки – совокупность параметров, при поддержании которых эффект эрозии материала заготовки наибольший, а съем материала происходит за счет действия источника тепла, которым является канал разряда.

Канал разряда – узкая цилиндрическая область между электродами, в которой при пробое диэлектрика образуется плазма.

Плазма – ионизированный газ, образующийся при электрическом разряде, в котором объемные плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, а концентрация заряженных частиц сравнительно велика.

При электроэрозионной обработке образуется низкотемпературная плазма с температурой в канале разряда 5000 – 40000 °С.

Межэлектродный промежуток (МЭП, промежуток, GAP, англ.) – пространство, заключенное между взаимодействующими поверхностями электрода-инструмента и заготовки при обработке.

Шлам – продукты эрозии электрода-инструмента и заготовки, пиролиза диэлектрика и другие частицы, находящиеся в МЭП.

Для стабильного протекания электроэрозионной обработки содержание шлама в МЭП не должно превышать определенной величины (масс. %).

Аномальный разряд – электрический разряд между электродами, при котором невозможен нормальный режим электроэрозионной обработки.

К такому типу разрядов относятся электрические разряды между ЭИ и заготовкой через эрозированные частицы и короткое замыкание электродов при обработке.

Режим электроэрозионной обработки – совокупность параметров, при которых выполняется электроэрозионная обработка.

К параметрам относят частоту и форму импульсов, их скважность, ток, напряжение, скорость движения подачи.

Электроискровая обработка – режим электроэрозионной обработки, протекающий при длительности импульса тока 0,01 – 1 мкс, энергии разряда 4 – 5 Дж, скважности 5 – 10 и частоте следования импульсов до 10 МГц.

Электроискровая обработка применяется преимущественно при выполнении черновой и последующих видов обработки на вырезных станках, а также при чистовой и доводочной обработке заготовок на станках для объемного копирования (прошивочных) и выполняется при прямой полярности включения электродов.

Электроискровая обработка при выполнении объемного копирования обладает малой производительностью и применяется при чистовой обработке заготовок.

Электроимпульсная обработка – режим электроэрозионной обработки, протекающий при длительности импульсов тока 0,1 – 100 мкс, энергии разряда до десятков Дж, скважности до 5 и частоте следования импульсов от десятков Гц до десятков кГц.

Электроимпульсная обработка применяется при черновой обработке заготовок на станках для объемного копирования и осуществляется при обратной полярности включения электродов.

Полярность – возможный вариант подключения электрода-инструмента и заготовки к полюсам генератора импульсов, определяющий условия разрушения включенных в цепь электродов.

Прямая полярность – вариант подключения электродов, при котором ЭИ подключен к отрицательному полюсу, а заготовка - к положительному полюсу генератора импульсов.

Обратная полярность – вариант подключения электродов, при котором ЭИ подключен к положительному, а заготовка – к отрицательному полюсу генератора импульсов.

Генератор импульсов – источник питания электроэрозионного станка периодическим импульсным электрическим током.

Импульсный разряд – электрический разряд, длящийся в течение интервала времени, сравнимого или меньшего, чем постоянная времени процесса в разрядном промежутке.

Рабочий импульс – кратковременный электрический разряд, производящий съем металла с заготовки вследствие электрической эрозии и характеризующийся прохождением через межэлектродный промежуток импульса электрического тока под напряжением, изменяющимся за время импульса.

Импульс зажигания (поджига) – кратковременное увеличение напряжения, способствующее пробоем межэлектродного промежутка.

Напряжение поджига (зажигания) – величина напряжения, при которой происходит пробой межэлектродного промежутка.

Холостой импульс – электрический разряд, не вызывающий эрозии материала заготовки.

Импульс тока короткого замыкания – кратковременное увеличение силы тока до значений, не предусмотренных режимом работы, при соприкосновении электрода-инструмента и заготовки (при их непосредственном контакте либо через эрозированные частицы).

Скважность – отношение периода повторения импульсов к их длительности.

В технологических инструкциях к импортному оборудованию этот термин не применяется. В них указываются только режимы настройки генератора импульсов (положение регулятора величины тока в импульсе и регулятора длительности импульса).

Скорость съема – отношение количества материала, снятого с заготовки, к интервалу времени, за которое он удален при электроэрозионной обработке.

Различают объемную и массовую скорость съема ($\text{мм}^3/\text{мин}$ и $\text{г}/\text{мин}$).

Приведенное выше определение используют для оценки производительности объемного копирования и прошивочной обработки.

В качестве критерия производительности при обработке непрофилированным электродом-инструментом (вырезной электроэрозионной обработке) принимают отношение площади боковой поверхности паза ко времени его вырезания ($\text{мм}^2/\text{мин}$).

Выдержка поджигания – время между моментом подачи напряжения и прохождением электрического разряда через МЭП.

В некоторых случаях характеризует время, необходимое для образования канала разряда.

Обрабатываемая поверхность – часть поверхности заготовки, на которую во время электроэрозионной обработки воздействуют электрические разряды.

Межэлектродный зазор (зазор) – расстояние в рассматриваемом месте межэлектродного промежутка между поверхностями электрода-инструмента и заготовки, измеренное по нормали к обрабатываемой поверхности.

Межэлектродная среда (среда) – вещества, заполняющие межэлектродный промежуток при обработке.

Прокачка рабочей жидкости – принудительная подача рабочей жидкости в МЭП.

Погружная электроэрозионная обработка – электроэрозионная обработка, при которой ЭИ и заготовка располагаются в ванне с рабочей жидкостью.

Струйная электроэрозионная обработка – электроэрозионная обработка, при которой проволочный электрод-инструмент находится в струе рабочей жидкости.

Давление рабочей жидкости в этом случае может достигать от 1 до 6...8 МПа.

Струйная электроэрозионная обработка в некоторых источниках называется инъекционной электроэрозионной обработкой.

Боковая прокачка – подача жидкости, выполняющаяся вдоль части боковой поверхности электрода-инструмента.

Коаксиальная прокачка – подача жидкости в МЭП, выполняющаяся вдоль всей боковой поверхности электрода-инструмента.

Такой вид прокачки используют при вырезании контуров проволочным ЭИ, а также при контурной и прошивочной обработке полостей и углублений, выполняемой электродами-инструментами в виде трубки (стержня) определенной формы.

Вязкость – свойство жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Вязкость оказывает влияние на возможность быстрого восстановления рабочих свойств диэлектрической жидкости, т.е. требуемой электрической прочности, и на удаление примесей.

Торцовый межэлектродный зазор – расстояние между противоположными участками поверхности ЭИ и заготовки, измеренное перпендикулярно к направлению подачи.

Боковой межэлектродный зазор – расстояние между противоположными поверхностями ЭИ и заготовки, измеренное параллельно к направлению подачи.

Динамический зазор – торцовый межэлектродный зазор, изменяющийся при электроэрозионной обработке в пределах погрешности регулятора межэлектродного зазора.

Статический зазор – боковой межэлектродный зазор в режиме установившейся электроэрозионной обработки.

Движение подачи – движение ЭИ и (или) заготовки для распространения электрической эрозии на всю поверхность, подлежащую обработке.

Лунка при электроэрозионной обработке (лунка) – углубление на поверхности ЭИ или заготовки, образующееся в результате воздействия электрического разряда.

Недопустимо использование термина «кратер» при определении характера разрушения электродов действием единичного импульса тока.

Зона термического влияния – поверхностный слой металла заготовки или ЭИ после электроэрозионной обработки с измененными структурой и свойствами в результате теплового воздействия канала разряда.

Износ электрода – количество материала ЭИ, отделившееся при электроэрозионной обработке.

Различают износ объемный, линейный и массовый.

Относительный износ электрода – отношение износа ЭИ к количеству материала, удаляемого за это же время с заготовки.

Различают объемный, массовый и линейный относительный износ электрода.

Релаксация электрода – периодически повторяющийся принудительный подвод и отвод электрода-инструмента для промывки межэлектродного промежутка.

Релаксация ЭИ составляет от нескольких десятков секунд до нескольких минут в зависимости от глубины обрабатываемой полости.

Релаксация электрода может отсутствовать при использовании линейных двигателей электроэрозионных станков, обеспечивающих в процессе обработки быстрое перемещение электрода-инструмента относительно заготовки со скоростями до 600 мм/с и более при ускорении до 2G, в результате которого за счет помпового эффекта обеспечивается удаление продуктов эрозии из МЭП.

Электроэрозионное объемное копирование – электроэрозионная обработка, при которой на заготовке отображается форма электрода-инструмента.

Электроэрозионное прошивание – электроэрозионная обработка, при которой ЭИ, углубляясь в заготовку, образует отверстие постоянного сечения.

Производители импортного электроэрозионного оборудования не используют понятие «объемное копирование», а объединяют обработку отверстий и полостей различной формы в понятие «координатно-прошивочная обработка».

Контурная электроэрозионная обработка – обработка последовательными проходами, при которой полость сложной формы в заготовке получают путем перемещения по заданной траектории ЭИ простой формы.

Контурную обработку можно использовать вместо электроэрозионного объемного копирования и прошивания.

DOWN (англ.) – электроэрозионное объемное копирование.

Орбитальное движение электрода-инструмента (ОДЭИ) – электрод-инструмент совершает круговые плоскопараллельные, фасонные и другие движения относительно обрабатываемого контура в заготовке.

В современных электроэрозионных станках некоторые фасонные орбитальные движения (осцилляции) заложены в виде стандартных программных продуктов и выполняются системами числового программного управления.

ORB (англ.) – орбитальное движение электрода-инструмента.

Планетарная электроэрозионная обработка – электроэрозионная обработка, при которой электрод-инструмент совершает движения в соответствии с формой обрабатываемого контура в заготовке и одновременно вращается.

Электроэрозионный станок с числовым программным управлением – электроэрозионный станок, на котором управление режимами обработки и перемещением рабочих органов производится системой числового программного управления (ЧПУ, CNC - англ.).

Числовое программное управление (ЧПУ, CNC – англ.) – управление обработкой заготовки на станке по программе, заданной в цифровой форме, а также с использованием специальных функций.

Числовое программное управление обеспечивается системой ЧПУ. Под системой ЧПУ понимают совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление станком. Системы ЧПУ электроэрозионных (и других типов) станков выдают управляющие воздействия на исполнительные органы в соответствии с программой обработки и учетом информации о состоянии МЭП.

В программах обработки задают режимы работы генератора импульсов, координаты точек обрабатываемого контура на заготовке и соответствующие перемещения, которые выполняют при обработке электрод-инструмент и заготовка.

Перемещение – изменение положения электродов в процессе обработки относительно выбранной системы отсчета (координат) в рассматриваемый промежуток времени.

Перемещение характеризуется координатами, т.е. числами, определяющими положение электрода-инструмента и заготовки. Перемещение ЭИ и заготовки может быть задано на плоскости и в пространстве. Наиболее широко применяют прямоугольную систему координат в пространстве (3 взаимно перпендикулярных направления X, Y, Z). В некоторых случаях используют систему полярных координат.

Приращение – расстояние между текущим положением ЭИ или заготовки и выбранной начальной точкой (или началом координат).

Относительное приращение – расстояние между текущим положением ЭИ и его предыдущим положением за время одного управляющего импульса.

Абсолютное приращение – разность расстояний между текущим положением ЭИ или заготовки и нулем станка (началом абсолютной системы координат станка).

Ноль станка – начало абсолютной системы координат станка.

Электроэрозионный станок с адаптивным управлением – электроэрозионный станок, система управления которого обеспечивает автоматическое приспособление режима обработки к изменяющимся условиям обработки.

Электроэрозионная установка – электроэрозионный станок с адаптивным управлением.

Регулятор подачи – автоматическое устройство, управляющее движением ЭИ и заготовки для поддержания межэлектродного зазора в пределах, необходимых для прохождения электрических разрядов.

Привод регулятора подачи – механизм, обеспечивающий функционирование регулятора подачи.

Привод состоит из гидроцилиндров, гидромоторов, двигателей постоянного или переменного тока, связанных с помощью кинематических или иных передач с исполнительными органами электроэрозионного станка, на которых закреплены ЭИ и заготовка. В современных электроэрозионных станках и устройствах различного назначения начали широко применяться линейные

двигатели, обеспечивающие непосредственное управление движением исполнительных органов без промежуточных передач и кинематических звеньев.

Регулирующее воздействие (сигнал) для функционирования привода может подаваться непосредственно от датчика, определяющего положение исполнительных органов, либо после предварительного усиления.

Позиционирование – установка электрода-инструмента и заготовки относительно друг друга перед выполнением обработки.

В электроэрозионных станках с числовым программным управлением чаще всего используется автоматическое контактное позиционирование ЭИ по центру отверстия в заготовке, поиск поверхностей, поиск углов заготовки, установка по центру колонны станка, по искре и т.д.

Депорт – ошибка в позиционировании электрода-инструмента или заготовки.

Длительность импульса – время действия импульсного разряда от момента пробоя диэлектрика до восстановления его прочностных характеристик.

Ионизация – образование свободных носителей заряда под действием сильного электрического поля.

ИСО – Международная Организация по Стандартизации. Эта аббревиатура обозначает также язык программирования системы числового программного управления, включающей геометрические (G) и машинные (M) функции.

САПР – система автоматизированного проектирования – технологический комплекс всего процесса автоматизированного проектирования.

CAD (Computer-Aided Design) – автоматизированное проектирование, включающее создание геометрических компьютерных моделей изделий и частей таких изделий (плоских – двумерных, объемных – трехмерных, каркасных, поверхностных, твердотельных, комбинированных и т.п.), а также разработку чертежей и документации на изделия.

CAE (Computer-Aided Engineering) – класс инженерных систем для аналитического исследования, расчетов, симуляции и оптимизации компьютерных моделей или различных процессов.

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – технологическая система, система автоматизации производства, обеспечивающая подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ, технологических процессов и другой технологической документации.

CAD/ CAM – система сквозного автоматизированного проектирования и технической подготовки производства изделий.

На выходе таких систем содержится полная информация об изделии и технологический процесс его изготовления, включая применяемую нестандартную технологическую оснастку.

DXF-формат, **DXF**-файл и др. (Drawing eXchange Format) – открытый формат файлов для обмена двухмерной графической информацией между приложениями САПР.

Офсет – величина смещения траектории движения ЭИ относительно обрабатываемой поверхности при прошивании, объемном копировании с ОДЭИ, вырезании непрофилированным электродом, разрезании и контурной обработке, учитывающая межэлектродный зазор и размер электрода-инструмента.

Параметр – предварительно рассчитанная или выбранная величина энергии импульса, тока, напряжения, скорости движения подачи и др., задаваемая при электроэрозионной обработке.

Серворегулировка – воздействие на привод электроэрозионного станка, осуществляемое микропроцессором ЧПУ при изменении условий электрической эрозии.

Термическая стабилизация – поддержание температуры в зоне обработки в определенном интервале.

Обеспечивается в основном за счет охлаждения рабочей жидкости в специальных агрегатах.

Технология – представляет собой, во-первых, совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката в процессе производства, а во-вторых, науку о способах воздействия на сырье, материалы или полуфабрикаты соответствующими орудиями производства.

Технология в электроэрозионной обработке предусматривает выбор материала ЭИ, рабочей жидкости, задание параметров режима работы гене-

ратора импульсов, а также составление управляющих программ для осуществления соответствующих перемещений электрода-инструмента и заготовки.

Температура вспышки (воспламенения) – температура, при которой газообразные продукты диэлектрика воспламеняются (начинают гореть).

Частота – величина, обратная периоду повторения электрического разряда; измеряется в Гц (1/с), кГц и МГц.

Шероховатость – совокупность неровностей, образующих рельеф поверхности и рассматриваемых в пределах определенного ее участка.

Предпочтительным параметром, характеризующим шероховатость поверхности, является среднее арифметическое отклонение профиля Ra (в мкм).

Эталон – образец, позволяющий определить параметры шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки.

Эталоны чаще всего входят в комплект поставки электроэрозионного станка.

1.2. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В 1770 году английский ученый Б.Пристли констатировал эрозионный эффект электрического разряда при размыкании электрических контактов, что приводило к их разрушению. Спустя более 165 лет советские ученые, супруги Борис Романович и Наталья Иосифовна Лазаренко, проводя в конце 30-х годов исследования с целью исключения эрозионного эффекта на металлических контактах, выдвигают идею использования этого разрушающего эффекта и развития контролируемого процесса обработки металлов. В 1943 году они внедрили процесс обработки, при котором под действием электрических разрядов, происходящих между двумя проводниками тока, погруженными в диэлектрик, разрушалась поверхность одного из электродов. Используемый в то время генератор разрядов, названный «Контур Лазаренко», применялся долгое время в конструкции машин для электроискровой обработки. В состав зарядной цепи такого генератора, формирующей импульсные разряды, входит источник питания, токоограничивающий резистор и конденсатор. После зарядки, время которой подбирается с помощью регулируемого резистора,

конденсатор обеспечивает подачу коротких искровых импульсов в разрядную цепь, в которую включены электрод-инструмент и заготовка. Генераторы приведенного типа называют RC-генераторами (или релаксационными генераторами). Этот тип генераторов используется в некоторых случаях и в настоящее время, особенно при выполнении чистовых и доводочных работ. За разработку и внедрение нового метода обработки супруги Борис Николаевич и Наталья Иосифовна Лазаренко были удостоены Государственной премии СССР.

Впечатляющая эволюция электроискровой обработки стала возможной благодаря трудам большого числа исследователей, которые способствовали появлению на свет фундаментальных разработок этого метода обработки и его использования с максимальной эффективностью.

В СССР работала сильная школа ученых, занимавшихся разработкой научных основ электроэрозионной обработки. К числу наиболее известных следует отнести работы Гуткина Б.Г., Афанасьева Н.В., Золотых Б.Н., Зингермана Д.Т., Мещерякова Г.Н., Красюка Б.А., Некрашевича И.Г., Палатника Л.С., Лившица А.Л. по теории электроэрозионной обработки материалов, оригинальные разработки Левинсона Е.М., Попилова Л.Я., Льва В.С., Веромана В.Ю. и др., а также исследования сотрудников ЭНИМСа в области теории и технологии электроэрозионной обработки. Среди зарубежных ученых и основателей школ электроэрозионной обработки следует отметить Кёси Иноуэ, Тошихико Фурукава (Япония) – создателей фирм JAPAX и Sodick и представителей других государств мира. Они продолжили работы, начатые Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

Разработка новых типов генераторов импульсов (машинных, вентильных, ламповых, магнитонасыщенных, тиратронных, на управляемых полупроводниковых приборах, широкодиапазонных и др.) позволила использовать в процессах электроэрозионной обработки более продолжительные дуговые разряды. Благодаря этому появилась возможность значительно (в 4 и более раз по сравнению с электроискровой обработкой) повысить производительность электроэрозионной обработки. Процессы, при осуществлении которых используются импульсные дуговые разряды, стали называть электроимпульсной электроэрозионной обработкой. Наряду с терминами «электроискровая» и «электроимпульсная» обработка широко применяется термин «электроэрози-

онная» обработка (EDM, англ.). Это обстоятельство связано с тем, что как при электроискровой, так и при электроимпульсной обработке эрозия материала заготовки происходит в результате прохождения между ЭИ и заготовкой импульсных разрядов, различающихся приложенной энергией импульса, величиной тока и продолжительностью импульса.

Использование научных разработок позволило СССР в недалеком прошлом производить всю гамму электроэрозионного оборудования, включающую вырезные установки и станки для объемного копирования. Причем в ряде случаев уровень выпускавшегося оборудования был выше, чем уровень станков, производившихся в Западной Европе, США и Японии. Так, например, в 1963 г. во Францию была продана лицензия на производство электроимпульсной системы, состоящей из станков, средне- и высокочастотных генераторов импульсов, электроэрозионного графитового материала (ЭЭГ) для изготовления электродов-инструментов, вихрекопировального станка для обработки последнего и устройств регулирования.

За границей проблемы электроэрозионной обработки наиболее успешно решались в Японии и Швейцарии. Предприятия этих государств вовремя рассмотрели преимущества, которые обеспечивает электроэрозионная обработка, и уделили разработке этого метода наибольшее внимание. В Швейцарии разработкой и изготовлением электроэрозионного оборудования до недавнего времени занимались, не считая более мелких предприятий, две наиболее крупные фирмы – «Charmilles Technologies» и «AGIE», которые впоследствии вошли в состав концерна «Georg Fischer». В Японии наиболее известной фирмой, производившей электроэрозионные станки, была фирма JAPAX, вошедшая впоследствии в состав Sodick. Технический уровень продукции, выпускавшейся приведенными компаниями примерно до 1975 – 1978 г.г., несколько уступал уровню оборудования, производившегося в СССР. Мощным толчком, способствовавшим дальнейшему развитию электроэрозионной техники, стал период широкого внедрения в станкостроение систем числового программного управления. Причем предприятия иностранных государств получили в этой области техническое преимущество с опережением 8 - 10 лет. Кроме этого, существовал запрет на поставку в СССР высоко-технологичного оборудования и комплектующих к нему, принятый координационным комитетом по контролю над экспортом стратегических товаров –

КОКОМ (CCEWP – Coordinating Committee for East-West Policy), который был создан ЕЭС, США и Японией в разгар периода холодной войны. Все это позволило впоследствии японским и швейцарским производителям разработать более совершенное электроэрозионное оборудование, чем производившееся станкозаводами СССР, и использовать его в технологических процессах обработки заготовок.

В настоящее время электроэрозионные станки на территории бывшего СССР производят некоторые предприятия России. В Беларуси к настоящему времени электроэрозионное оборудование не выпускается. Ранее станки, в которых использовался метод электроэрозионной чистки режущей поверхности абразивного и алмазного инструмента, производились станкозаводом «ВИЗАС». Алмазно-эрозионные станки для заточки резцов, фрез, сверл производили и другие предприятия, например, Мукачевский станкостроительный завод. При возникновении электрических разрядов обеспечивалась чистка рабочей поверхности круга от продуктов резания, вскрытие новых режущих лезвий и удаление затупившихся, увеличение свободных поверхностей между зернами, оплавление, сжигание и испарение стружки, термическое упрочнение и дробление поверхностного слоя на заготовке. Использование электрической эрозии позволило увеличить режущую способность более чем в 2 раза, в 1,3 – 1,5 раза уменьшить силы резания и средние температуры при резании, повысить качество обработанных поверхностей. Станкозавод «Красный борец» (г. Орша) производил станки для электрохимической обработки заготовок.

В последнее время на территории стран СНГ, Беларуси и России в том числе, начали широко использоваться высокопроизводительные установки импортного, преимущественно японского и швейцарского, производства.

Наиболее известны следующие фирмы, выпускающие электроэрозионное оборудование: «Charmilles Technologies», «AGIE» (Швейцария); «Sodick», «Mitsubishi», «Makino», «Fanuc» (Япония), Herbert Walter, Elotherm (Германия), CHMER EDM, OSCARMAX (Тайвань), из стран СНГ – станкозавод НПП «ЭЛС-Исток», Троицкий станкостроительный завод (ОАО), Санкт-Петербургский завод прецизионного станкостроения (ОАО), завод «Станкоконструкция» (ОАО), научно-промышленная корпорация «Дельта» (ОАО),

расположенные в городах Фрязино, Смоленске, Троицке, Санкт-Петербурге, Ульяновске, Ржеве (Россия).

Наиболее важными этапами в развитии электроэрозионной обработки за рубежом, в соответствии с данными японских производителей электроэрозионного оборудования – Sodick, JAPAX, Mitsubishi и др., следует отметить следующие:

1953 г.: Образование фирмы JAPAX, INC.

1954 г.: Выпуск в СССР первого в мире вырезного электроэрозионного станка.

1955 г.: Использование в первых станках следящих систем с электро-механическим и электрогидравлическим управлением.

1957 г.: Применение магнитного электрододержателя, что позволило сократить время на установку и закрепление электрода.

1959 г.: Создание и применение генератора импульсов на транзисторах.

1968 г.: Оснащение станков шпинделями на гидростатических подшипниках, обеспечивающих оптимальное функционирование привода. Такие системы характеризуются достаточно высокой точностью перемещений и малым трением.

1972 г.: Использование мониторов, которые предназначались, с одной стороны, для помощи оператору в оптимизации условий обработки, и, с другой стороны, для анализа результатов обработки и исправления в автоматическом режиме некоторых параметров настройки генератора импульсов и управляющей программы обработки заготовки.

1973 г.: Разработка электроискрового проволочного вырезного станка JAPAX с числовым программным управлением.

1975 г.: Выпуск прошивочных станков (для объемного копирования) с новой системой вспомогательного оборудования, позволяющей производить осевое и угловое позиционирование электрода.

1976 г.: Создание фирмы Sodick Co. Ltd. Разработка установки, позволяющей вести орбитальную обработку.

1979 г.: Создание многоосевого координатно-прошивочного станка с компьютерным (микропроцессорным) числовым программным управлением (КЧПУ).

1980 г.: Использование быстрорежущей и молибденовой проволоки для увеличения скоростей вырезания.

1981 г.: Внедрение устройств автоматической заправки проволоки. Создание полностью автоматически программируемых станков для объемного копирования с магазином инструментов и устройством для их смены.

1982 г.: Выпуск вырезных станков, позволяющих вести обработку сложных контуров по координатам UV, расположенным в плоскости, отстоящей на некотором расстоянии от плоскости координат XY (плоскости стола станка).

1983 г.: Разработка составов диэлектрических жидкостей и генераторов импульсов, обеспечивающих обработку поверхностей до зеркального блеска (Ra 0,04 мкм).

1986 г.: Применение интегрированной стратегии: возможность создания программы для электроэрозионного объемного копирования сложной полости и ее обработки с использованием орбитального движения ЭИ (DOWN/ORB). Возможность автоматического получения информации о точном местоположении детали и смещении электрода-инструмента.

1989 г.: Разработка системы автоматической перезаправки проволоки в случае обрыва, повышающая автономность работы станков. Разработка системы трехмерной обработки заготовок на станках (планетарной и контурной).

1990 – 1996 гг.: Применение в конструкциях электроэрозионных станков термо- и электроизолирующих керамических материалов (FineXCera (Япония), полимербетон (Швейцария)) с малым коэффициентом линейного расширения (меньшим, чем у стали, гранита и др. материалов). Керамические материалы предотвращают деформацию заготовки и частей станка из-за их нагрева, что позволяет существенно повысить точность обработки прецизионных деталей. В настоящее время точность обработки деталей на электроэрозионных станках в зависимости от типоразмера и назначения станков составляет от $\pm 1,5$ –3 до ± 5 мкм. Причем вырезные ЭЭ установки обеспечивают гарантированную точность при работе на относительно недорогих типах проволоки и ионообменных смолах.

Разработка и использование в электроэрозионных станках систем чистовой доводки и полирования деталей, что существенно сокращает время на

выполнение таких видов работ вручную либо на другом оборудовании. В настоящее время используются вырезные станки и электроэрозионные установки для объемного копирования с системами чистовой доводки деталей, например, Ultra SF – для выхаживания поверхностей в воде до 0,04 мкм (по Ra), Super Pika – для выхаживания в масле до 0,03 мкм (Ra). Наряду с приведенными, разрабатывались системы подавления электролитической коррозии и эрозии (Super BS (Япония) и т.д.), которые не требуют увеличения удельного сопротивления воды перед чистовыми проходами, благодаря чему снижаются расходы на ионообменную смолу. Такие системы практически полностью подавляют электролитическую эрозию и коррозию в зоне обработки и позволяют доводить шероховатость поверхности реза до 0,17 мкм Ra за 2 – 3 прохода, в то время как при обработке без таких систем аналогичные параметры шероховатости поверхности достигаются минимум за 6 проходов.

1997 – 2000 г.г.: Разработка и внедрение в конструкциях электроэрозионных станков линейных двигателей, позволяющих поддерживать МЭП в оптимальных пределах, что значительно повышает точность обработки, качество поверхностей и производительность вырезной, прошивочной обработки и объемного копирования.

Приведенные этапы характеризуют развитие электроэрозионной обработки и станкостроения в основном в японской промышленности. Швейцарские производители имеют некоторое отставание по уровню технических решений, заложенных в основном в конструкции и приводы электроэрозионных станков.

1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионный процесс – сравнительно молодой метод, обеспечивающий максимальную точность обработки деталей в пределах 1,5 – 10 мкм (в зависимости от габаритов обрабатываемых деталей и типоразмеров станков) и параметры шероховатости поверхностей 0,04 – 0,08 мкм (по Ra при полировании) различных по сложности деталей, большинство из которых невозможно обработать другими методами. Благодаря этому электроэрозионная обработка занимает важное место в производстве инструментов, литейных и прессовых форм, при изготовлении различных по назначению деталей. Возможности электроэрозионной обработки определяются техническим уровнем оборудования, используемого на конкретном предприятии. Чем современнее оборудование в станочном парке предприятия, тем более сложные производственные задачи могут быть решены при изготовлении деталей. Широкое внедрение в другие, кроме инструментального производства, отрасли стало возможным благодаря разработке новых конструкций приводов, систем числового программного управления, программного обеспечения к станкам, генераторов импульсов, диэлектрических жидкостей.

Остановимся на технологических возможностях электроэрозионного оборудования, оснащенного системами ЧПУ и оборудованного магазинами и автосменщиками ЭИ, устройствами автоматической заправки и перезаправки проволоки (для вырезных станков), механизмами смены заготовок и переустановки палет, поворотными (вращающимися) столами, комбинированными диэлектрическими системами, генераторами импульсов, управляемыми от компьютерного ЧПУ.

В настоящее время используют следующие виды электроэрозионной обработки: *объемное копирование, прошивочную, контурную и вырезную электроэрозионную обработку.*

Для определения положения ЭИ и заготовки при обработке вводят понятия координатных направлений (осей), под которыми понимают направления, по которым перемещаются электрод-инструмент и заготовка, закрепленные на соответствующих исполнительных частях станка. Вдоль каждого направления отсчитываются величины выполняемых перемещений. Максимально возможное число направлений, по которым могут перемещаться электрод-инструмент и заготовка от-

носительно друг друга, для современных станков с ЧПУ составляет от 8 до 12. Меньшее число относится к станкам для объемного копирования.

Направления возможных перемещений образуют систему координат соответствующего станка. Координатным направлениям XU в такой системе соответствуют перемещения заготовки, закрепленной на столе станка, в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1.1).

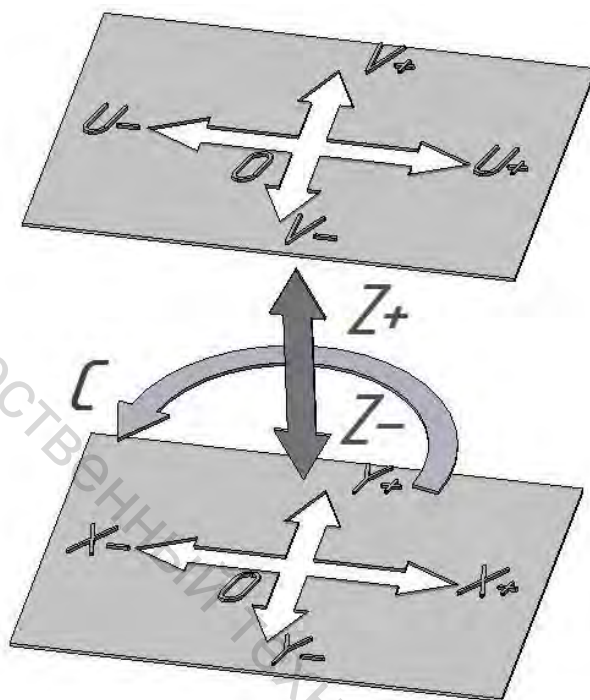


Рис. 1.1. Схема определения координатных направлений при обработке

В вертикальной плоскости по координатному направлению Z перемещается электрод-инструмент, закрепленный в шпинделе станка. Координатным направлениям UV соответствуют перемещения электрода-инструмента в двух взаимно перпендикулярных направлениях на плоскости, отстоящей от плоскости XU на некотором расстоянии. Под координатой C понимают вращательное движение электрода-инструмента, закрепленного в шпинделе станка, либо его поворот на заданный угол относительно оси Z . Ось W обозначает возможность перемещения ЭИ в вертикальном направлении для станков, предназначенных для объемного копирования, координатно-прошивочной обработки и снабженных дополнительными шпиндельными головками, закрепленными на ползунах. Ползуны таких станков перемещаются вдоль оси Z . Для вырезного оборудования координате W соответствует поворот заготовки относительно координатной оси X или Y . Если же приспособление, в котором установлена заготовка, обеспечивает возможность ее поворота относительно

каждой из осей (X, Y и т.д.), то такие направления обозначают как координаты W, A, и т.д.

Электроэрозионное объемное копирование (или координатно-прошивочная обработка, как называют объемное копирование за рубежом) могут обеспечить:

- получение полостей различной формы при перемещении фасонного электрода-инструмента в вертикальном направлении, а также за счет его орбитальных осцилляций или одновременного перемещения заготовки по другим направлениям (рис. 1.2, а, б).

На приведенных ниже рисунках стрелками показаны движения в выбранной системе координат, которые выполняют в процессе обработки электрод-инструмент и заготовка, закрепленные на подвижных частях станков.

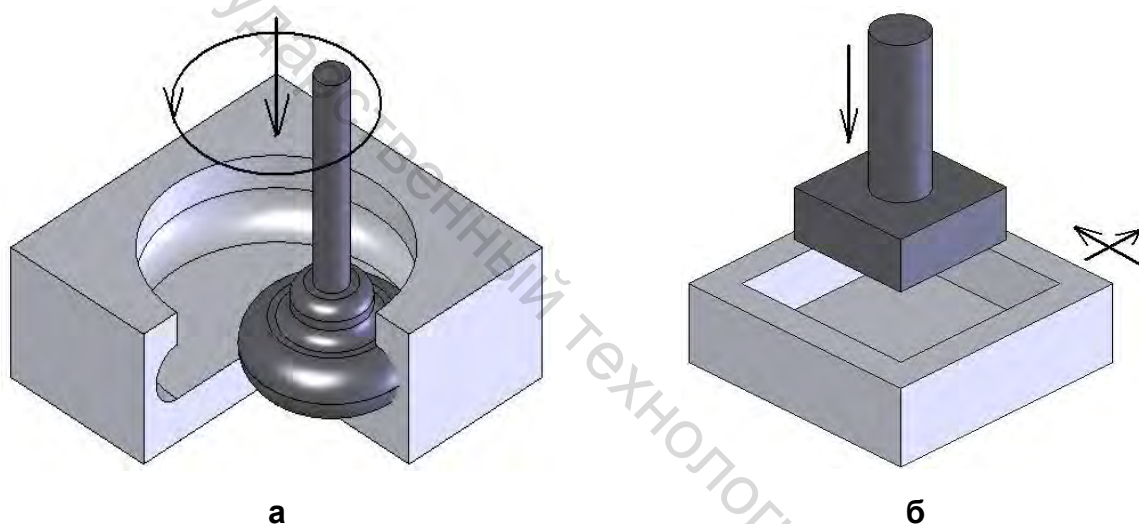


Рис. 1.2. Примеры осуществления объемного копирования:

а – прошиванием с одновременным ОДЭИ; б – перемещением ЭИ и заготовки по трем взаимно перпендикулярным направлениям

При обработке в заготовке вначале прошивают полость (рис. 1.2, а). Затем в процессе орбитального или планетарного движения электрода-инструмента полученное углубление увеличивают в размерах. Таким способом обрабатывают полости различной формы, а также канавки и другие заглабления в деталях из закаленных сталей, твердых сплавов, композиционных и других материалов. Задание кругового движения обеспечивается перемещением заготовки с разными скоростями одновременно по двум направлениям (координатным осям) X и Y. ЧПУ станков обеспечивает в настоящее время программирование орбитального движения в соответствии с произвольной формой углубления в заготовке. Одновременное перемещение ЭИ и заготовки по трем (и более) координатным направлениям обеспечивает обра-

ботку полостей простой и сложной формы бóльшего размера, чем первоначальные размеры электрода-инструмента (рис. 1.2, б). Используя приведенные выше способы, изготавливают детали вытяжных штампов, кокилей, литевой оснастки для выдувных машин, прошивают окна в матрицах вырубных и пробивных штампов и плитах таких штампов для установки пуансонов, съемников, упоров и других деталей.

Достаточно часто возникает необходимость обработки отверстий различного диаметра, которые могут использоваться для заправки проволочного ЭИ при последующем вырезании контуров, в форсунках для подачи топлива и в др. целях в деталях самого различного назначения. При обработке отверстий вначале производят правку электрода-инструмента при его вращении для уменьшения погрешности изготовления и затем прошивают отверстия в детали (рис. 1.3, а).

Обработку отверстий круглого поперечного сечения проводят обычно на специальных электроэрозионных станках, называемых дрелями или супердрелями, в шпинделях которых электроды-инструменты зажимают, например, с помощью цанговых патронов. В качестве электродов-инструментов применяют в основном латунные трубки различного диаметра (от 0,03 до 6 мм). Отверстия сложного профиля обрабатывают на станках для объемного копирования при вертикальном перемещении электрода-инструмента. Шпиндели таких станков, как и дрелей, могут вращаться с различной частотой (от 0 до 3000 мин⁻¹ – в зависимости от модели станка и его комплектации), либо дискретно поворачиваться на заданный угол.

Отверстия сложной формы в вырубных или пробивных штампах часто обрабатывают с угловым позиционированием электрода-инструмента относительно оси Z (рис. 1.3, б). При повороте на фиксированный угол появляется возможность использовать только один ЭИ для прошивания любого заданного количества отверстий. При этом отпадает необходимость изготавливать электроды-инструменты по количеству прошиваемых в заготовке отверстий, что существенно снижает стоимость изготовления инструментов. Точность расположения отверстий в этом случае определяется точностью датчиков углового позиционирования соответствующего привода. В современных электроэрозионных станках поворот электрода-инструмента, закрепленного в шпинделе станка, и заготовки, установленной на поворотном, управляемом от ЧПУ, столе осуществляется с точностью до 0,001⁰, в некоторых станках – до 0,0005⁰ (по данным Sodick, Charmilles и др. производителей электроэрозионного оборудования).

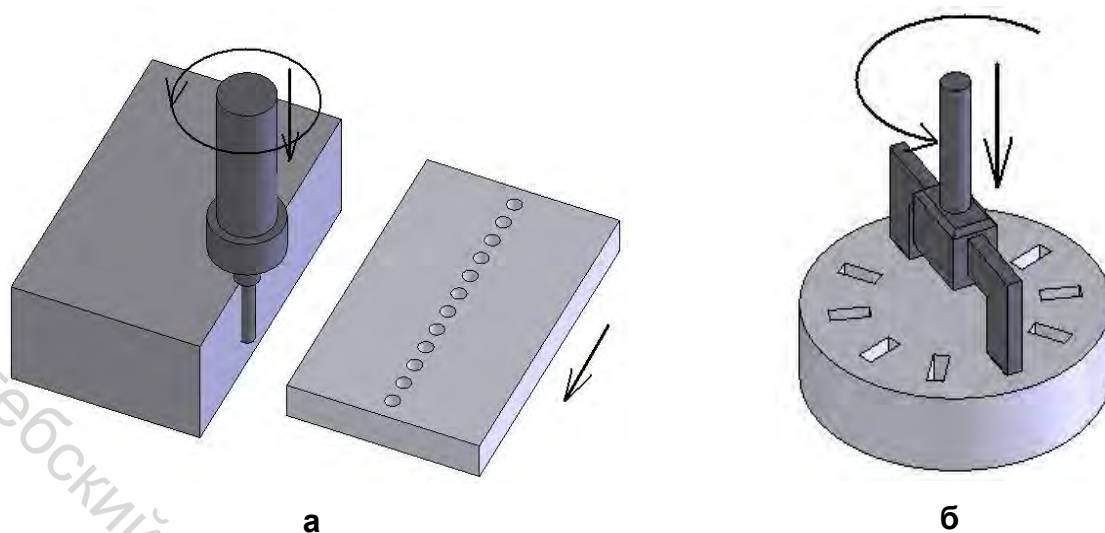


Рис. 1.3. Примеры прошивочной обработки отверстий круглого поперечного сечения (а) и объемного копирования некруглых отверстий (б)

При прошивании отверстий и полостей сложного профиля можно использовать электрод-инструмент соответствующей формы, одновременно перемещая его по направлениям $Z + C$ (рис. 1.4, а), т.е. по винтовой линии с заданным шагом.

В некоторых случаях при обработке сложного контура в пуансонах и матрицах целесообразно использовать электроды-инструменты простой формы. Причем обработка производится как с вращением ЭИ, так и без его вращения (рис. 1.4, б, в). Приведенные схемы относят к контурной электроэрозионной обработке. Сущность контурной обработки заключается в формировании на заготовке полости или отверстия произвольной формы за счет снятия припуска последовательными проходами электрода-инструмента. Обработка может быть выполнена при перемещении электрода-инструмента и заготовки одновременно по нескольким координатным направлениям: X, Y, Z, U, V, C, W, A , что расширяет возможности электроэрозионной обработки и значительно сокращает затраты на изготовление фасонных электродов-инструментов. Вращение ЭИ компенсирует погрешности его изготовления и повышает точность обработки деталей. При обработке деталей многоместных форм и штампов производят позиционирование заготовки в двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно электрода-инструмента сложной формы (рис. 1.4, г). Шпиндели станков для выполнения такой обработки чаще всего перемещаются в вертикальном направлении. Возможно задание орбитального движения электроду-инструменту. При вертикальном перемещении ЭИ в заготовке образуется полость, форма которой может быть окончательно обработана с использованием ОДЭИ. После прошивания одной полости или отверстия производят

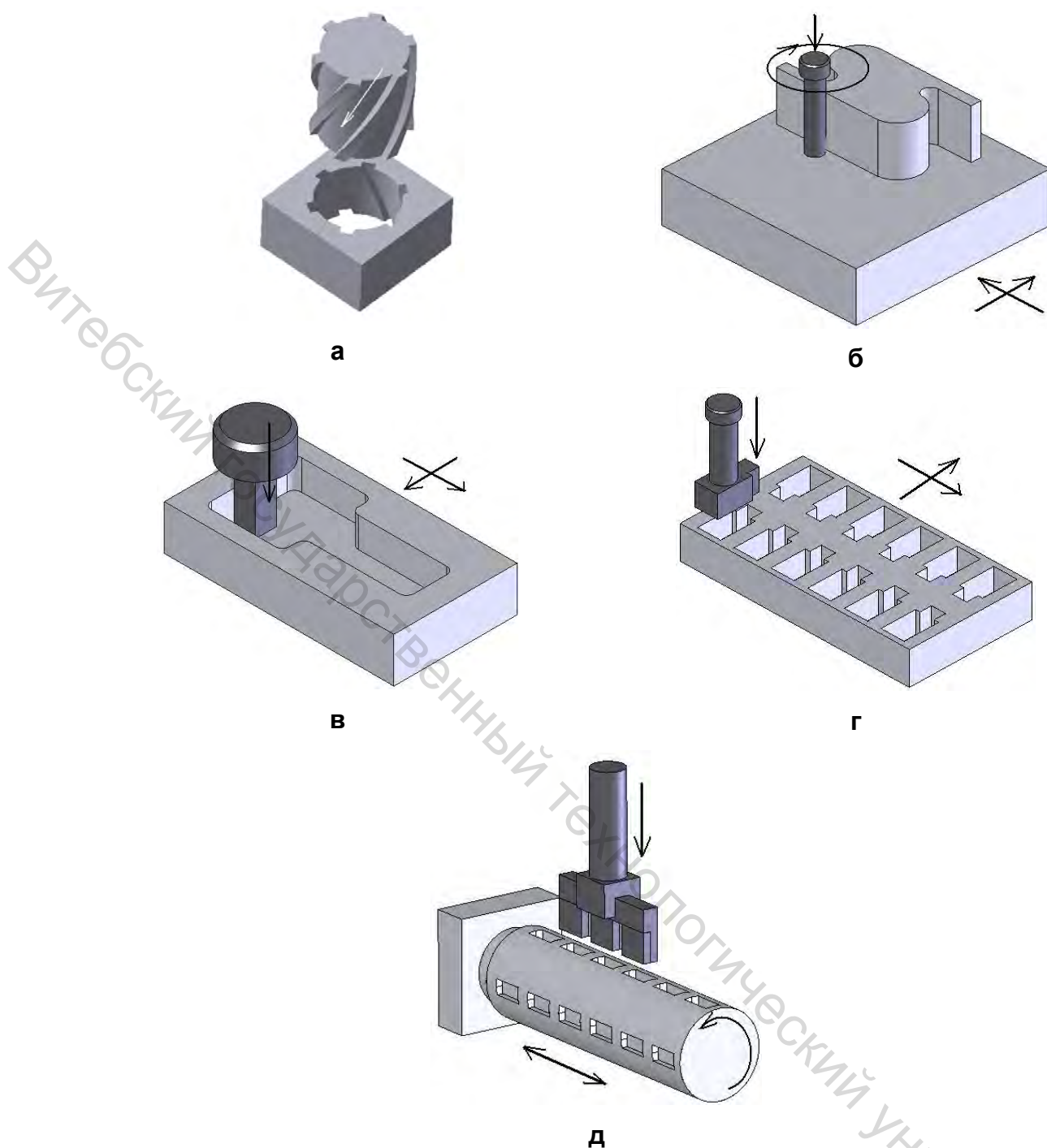


Рис. 1.4. Примеры контурной обработки и объемного копирования: а – полости сложной формы фасонным ЭИ, б – пуансона электродом-инструментом простой формы, в – полости матрицы ЭИ квадратного профиля, г – многоместной матрицы фасонным ЭИ, д - углублений на цилиндрической детали ЭИ сложной формы

перемещение заготовки для обработки аналогичных полостей в других ее частях. При этом отверстия могут быть обработаны не только на станках для объемного копирования, но и с помощью вырезного оборудования. Полученные детали применяются в качестве матриц вытяжных и пробивных штампов для листовой штамповки, прессовой оснастки для горячей объемной штамповки, деталей кокилей, форм для литья под давлением и т.п.

При обработке валков прокатных и гибочных станков, валков для изготовления печеня, конфет, для нанесения рисунков на изделия различного назначения и т.д. производят продольное (по оси X) и угловое (по оси W) позиционирование заготовки с помощью поворотного стола (рис. 1.4, д). Электрод-инструмент обычно имеет сложную форму, его перемещают относительно заготовки в вертикальном направлении. В некоторых случаях используют электроды-инструменты простой формы, которые вместе с заготовкой одновременно перемещают по нескольким направлениям (в ряде случаев до 8), обеспечивая тем самым обработку полостей и деталей практически любой сложности, например, лопаток турбин, насосов, гребных винтов и т.п. Взамен электроэрозионной обработки в некоторых случаях может применяться также гравировальная обработка заготовок, закаленных до HRC 35 – 50.

Большое количество деталей различного назначения может быть обработано на станках для электроэрозионного вырезания. Вырезанием можно получать:

- отверстия различной формы в матрицах вырубных и пробивных штампов (рис. 1.5, а), а также одновременно вырезать пуансоны и матрицы таких штампов;
- контуры сложной формы в фильерах для экструзии изделий из алюминия (используемых затем для изготовления каркасов оконных систем, дверных блоков) и других цветных металлов и сплавов (рис. 1.5, б);
- полости в вытяжных формах, отдельные части таких форм, например, как показано на рис. 1.5, в (на рис. приведена форма, состоящая из двух частей);
- отверстия практически любой формы в различных по назначению деталях (рис. 1.5, г), а также сложные по форме детали из листового материала, например, высокопрочных, нержавеющих сталей, твердых сплавов, магнитных или других материалов. Такие детали используют затем в таких областях, например, как микроэлектроника. Электродом-инструментом при обработке служит проволока диаметром от 0,03 до 0,36 мм, которую непрерывно протягивают через зону резания. Кроме этого электрод-инструмент и заготовка перемещаются относительно друг друга в разных взаимосвязанных направлениях, число которых может достигать восьми-двенадцати. Для выполнения вырезания в заготовках должны быть предварительно обработаны отверстия для проводки проволочного электрода-инструмента.

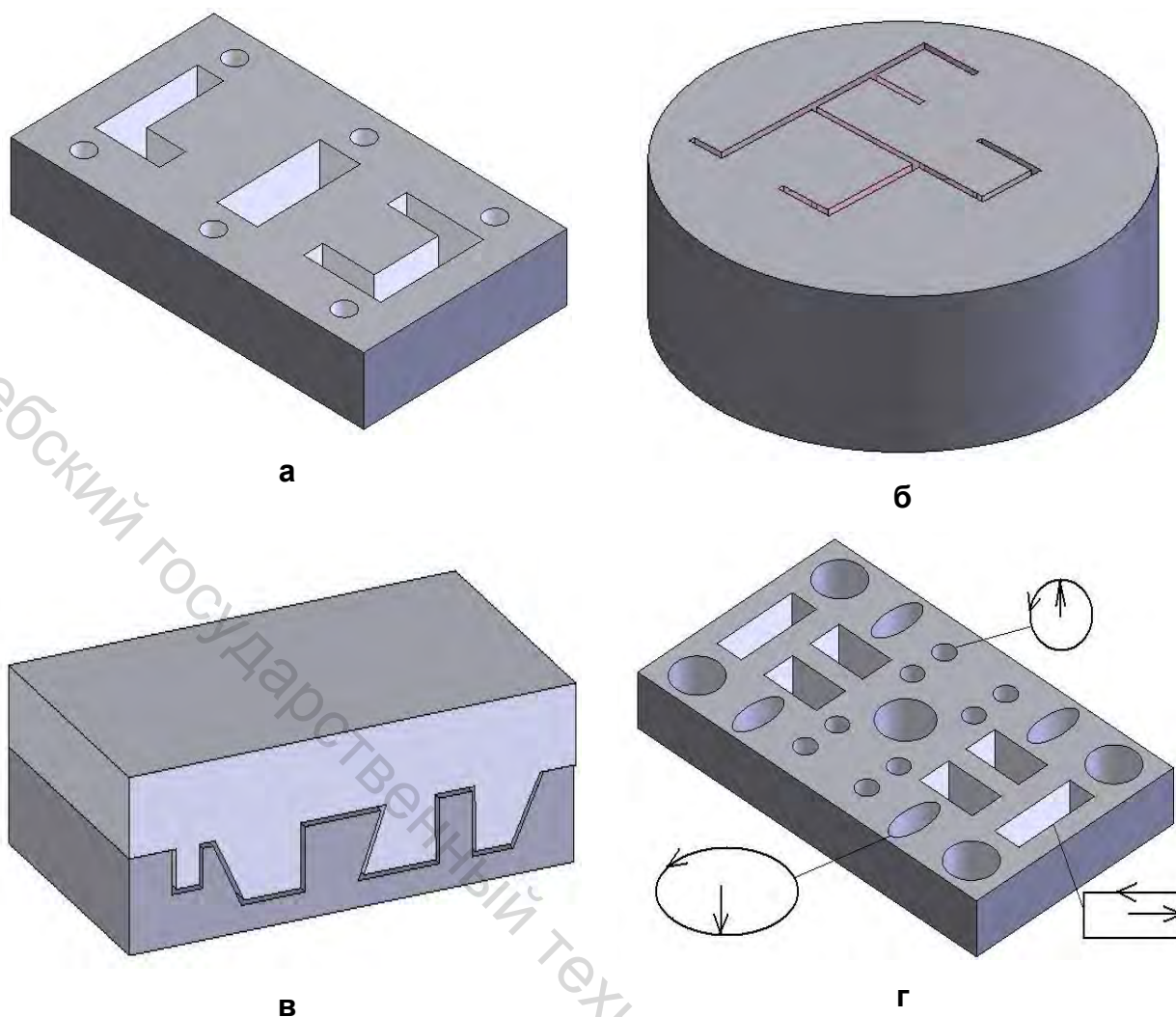


Рис. 1.5. Примеры вырезной обработки деталей различного назначения: а – матриц вырубных и пробивных штампов, б – фильер для экструзии, в – полостей в вытяжных формах, г – деталей из специальных сплавов

В некоторых случаях можно изготавливать:

- зубчатые колеса планетарных и других передач (рис. 1.6, а), особенно мелкомодульных (модуль может составлять 0,052 мм и менее), матрицы прессовой оснастки из твердых сплавов и закаленных сталей;
- резьбу на деталях из твердых сплавов, закаленных, нержавеющей сталей и других трудно обрабатываемых материалов (рис. 1.6, б);
- электроды-инструменты из графита, которые используют затем для прошивочной обработки (объемного копирования) полостей и отверстий в заготовках различного назначения (рис.1.6, в);
- косозубые колеса, колеса с винтовым зубом и другие детали, которые могут быть вырезаны при наличии на станках поворотных столов (рис. 1.6, г);

- окна сложной формы малых размеров – в доли миллиметра (рис. 1.6, д), которые затруднительно обрабатывать другими методами;

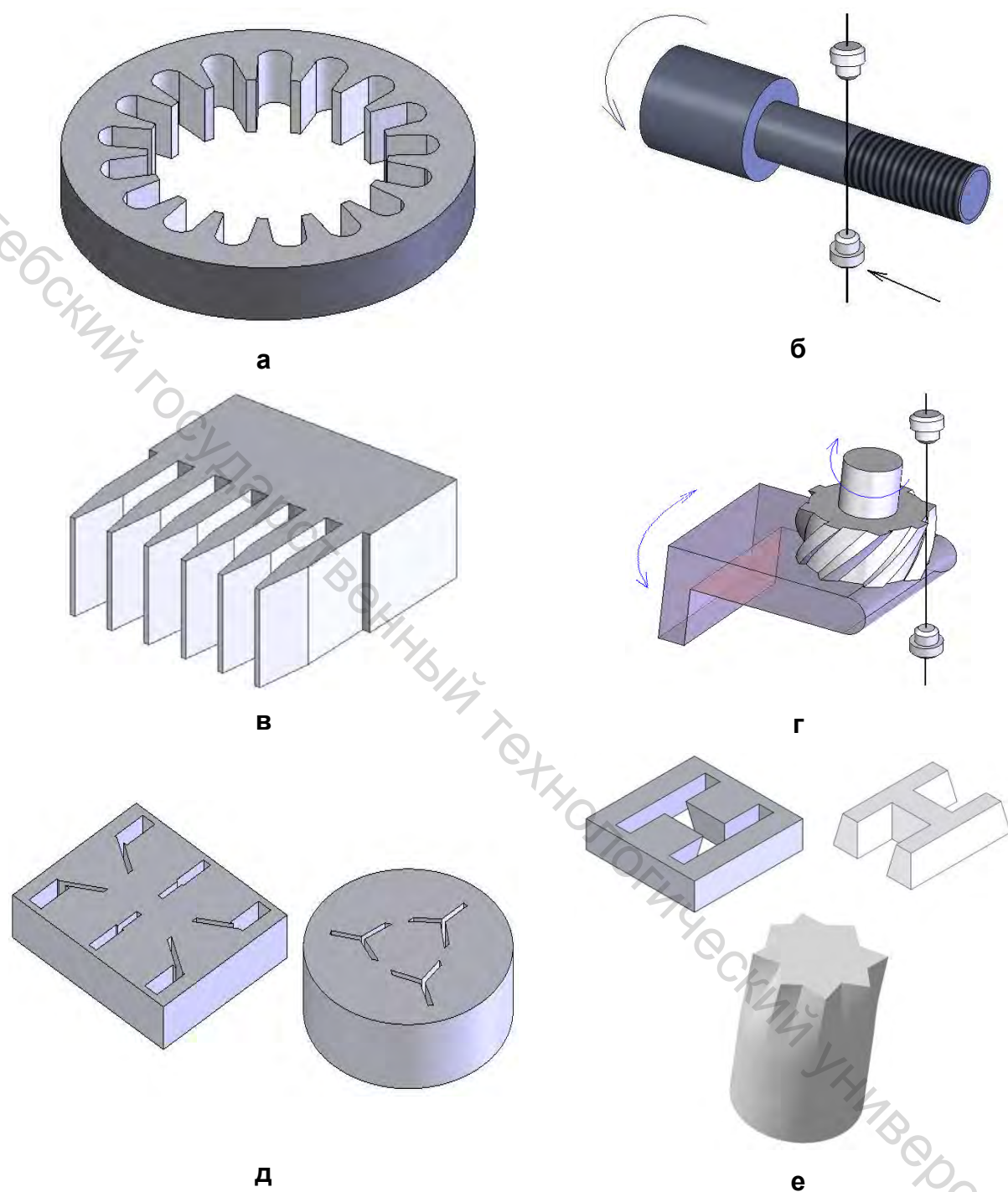


Рис. 1.6. Примеры выполнения вырезной обработки: а – мелкозубчатых колес, б – нарезания резьбы на деталях из твердых сплавов, в – электродов-инструментов из графита, г – косозубых колес, д – окон сложной формы малых размеров, е – деталей литейной оснастки

- производить конусное резание при обработке деталей литейной оснастки (матриц и пуансонов) (рис. 1.6, е). При конусном вырезании контур детали или от-

верстия в разных сечениях отличается друг от друга, а образующие, связывающие различные контуры, прямолинейные.

Угол конусного резания может быть как положительным, так и отрицательным, постоянным по длине выполняемого реза, либо переменным. При положительном угле конусного резания размеры вырезанного контура на выходе проволочного ЭИ из заготовки меньше, чем на входе ЭИ в зону резания, и, соответственно, наоборот, при отрицательном угле конусного резания размеры сечения на выходе ЭИ из заготовки больше, чем на входе в зону резания. Величина угла определяется моделью станка и возможностями ЧПУ и колеблется в пределах $\pm 15 - \pm 25^\circ$ на длине от 30 до 500 мм (по данным Sodick и Charmilles Technologies).

Вырезную обработку в ряде случаев целесообразно использовать вместо объемного копирования отверстий сложной формы как больших, так и малых размеров, т.к. отпадает необходимость затрачивать значительное количество времени на изготовление электродов-инструментов сложной формы.

Приведенные схемы и примеры позволяют оценить возможности объемного копирования, прошивочной, контурной обработки и вырезания. Рассмотрим некоторые из деталей, которые могут быть изготовлены на электроэрозионном оборудовании.

Электроэрозионную обработку целесообразно использовать при изготовлении деталей из закаленных сталей и других твердых материалов. Могут обрабатываться твердые сплавы, например, матрицы выводных рамок больших интегральных схем для электроники (рис. 1.7).



Рис.1.7. Пример вырезной обработки контура в детали из твердого сплава: материал – твердый сплав, ЭИ – $d=0,07$ мм (латунь), рабочая жидкость – масло (30 Neutral, Япония), шероховатость поверхности детали – $0,05$ мкм (Ra), геометрическая точность – $-0,7 - +0,5$ мкм

Такие детали имеют высокую твердость и, как правило, малые размеры. При этом предъявляются высокие требования к точности размеров и параметрам шероховатости поверхностей. Вырезная обработка обеспечивает изготовление деталей, размеры которых колеблются в пределах от нескольких миллиметров до десятых и

даже сотых долей миллиметра при шероховатости поверхностей до 0,04 мкм (по Ra).

Большое количество различных по назначению деталей изготавливают из нержавеющей стали, которые относят к числу высокопрочных трудно обрабатываемых материалов. Пример обработки 30 отверстий в распылителе из нержавеющей стали с применением поворотного приспособления (делительной головки) показан на рис. 1.8. Обработка отверстий в таких материалах затруднительна, а отверстия особенно малых диаметров традиционными методами, например, сверлением обработать практически невозможно. Использование прошивочной электроэрозионной обработки при изготовлении отверстий и полостей в деталях из приведенных материалов позволяет существенно расширить возможности существующего производства.

Для изготовления отверстий в лопатках турбин (рис. 1.9) из хромоникелевых сталей применяют прошивочную обработку, проводимую на специальных электроэрозионных станках (дрелях или супердрелях). Производительность электроэрозионной обработки деталей по сравнению с традиционными видами обработки резанием возрастает в 3 – 10 раз. Такой же вид обработки используют для получения отверстий в деталях из карбида вольфрама, используемых для изготовления выводов интегральных схем (рис. 1.10), при обработке отверстий для подачи топлива в форсунках из закаленных сталей (рис. 1.11) и т.д.

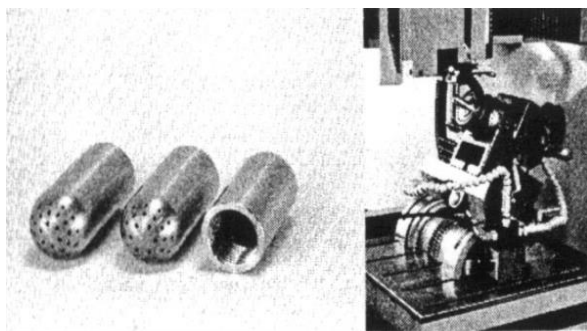


Рис. 1.8. Обработка отверстий малого диаметра в детали из нержавеющей стали с применением управляемого стола: ЭИ - $d=0,8$ мм; отверстия $d=0,92$ мм; глубина обработки – 7,5 мм; время на одно отверстие – 10 с.

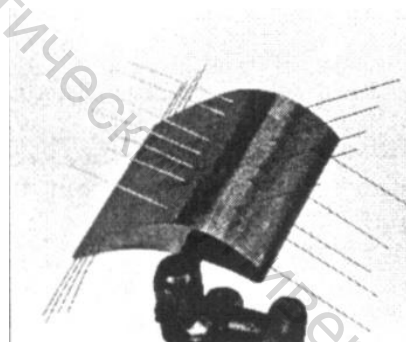


Рис.1.9. Обработка отверстий в турбинной лопатке: заготовка – хромоникелевая сталь, глубина с наклоном – 4 – 5 мм; электрод $d=0,3$ мм; износ ЭИ – 20%; время на одно отверстие – 11 с.

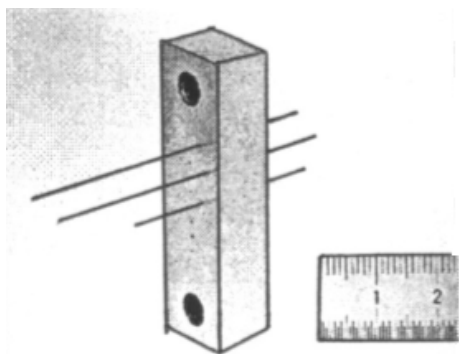


Рис. 1.10. Скоростная обработка твердого сплава: ЭИ $d=0,3$ мм, заготовка – твёрдый сплав, глубина – $3,2$ мм (с наклоном), износ ЭИ – 15% , время обработки одного отверстия: $7 - 8$ с.

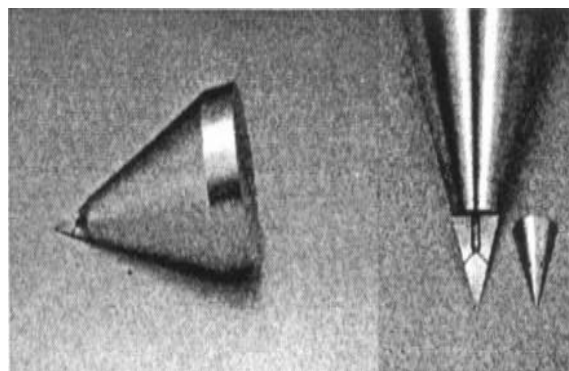
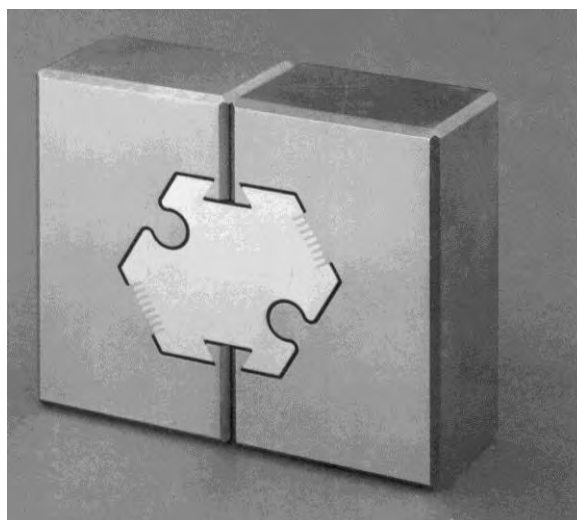


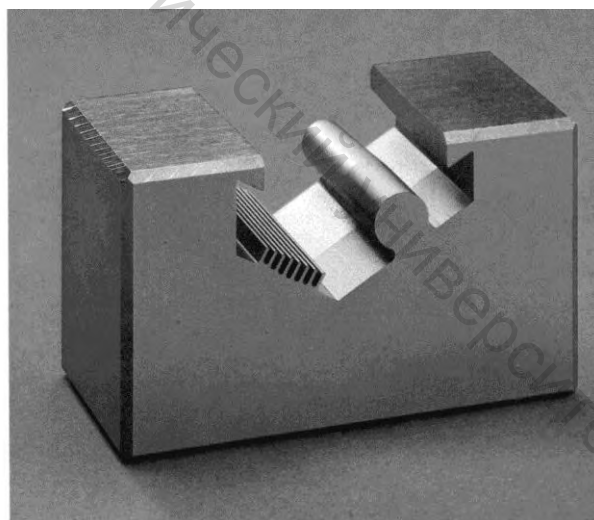
Рис. 1.11. Пример обработки отверстий разной длины и диаметра в форсунке: размеры отверстий – $d=1,86$ мм/ $d=0,34$ мм, длина – $18,5$ мм/ $5,2$ мм, время прошивки – 4 мин/ 12 с

Установки для электроэрозионной обработки являются универсальными системами и используются в самых различных отраслях промышленности.

Наиболее часто электроэрозионная обработка применяется в инструментальном производстве при изготовлении пресс-форм, штампов, литейного инструмента. На рис. 1.12 показана матрица с взаимозаменяемыми элементами конической формы. Точность, достигаемая при чистовом электроэрозионном вырезании, обеспечивает получение зазора в сопряжении $0,003$ мм. Для вырезания применяется проволока диаметром $0,25$ мм. Шероховатость поверхности после обработки профиля составляет $0,35$ мкм (Ra).



а



б

Рис. 1.12. Пример вырезной обработки матрицы с взаимозаменяемыми элементами: а – в сборе из трех элементов, б – один из сопрягаемых элементов

На рис. 1.13 приведена форма, используемая в качестве фильеры в литейных машинах для изготовления изделий сложного профиля. Программное обеспечение станков для электроэрозионной обработки позволяет получать плавный переход от входного участка круглого сечения к выходному профилю.

Программирование сложной поверхности осуществляется на периферийном оборудовании либо непосредственно на станке с помощью стандартного программного обеспечения. Могут обрабатываться алюминий, латунь, закаленная сталь, твердые сплавы, композиционные и др. материалы.

Методы электроэрозионной обработки позволяют изготавливать электроды-инструменты из графита, используемые затем для прошивания, например, ребер охлаждения. Пример такой обработки показан на рис. 1.14. Графит, чувствительный к выкрашиванию, обрабатывается в приведенном случае с использованием поворотного стола за одну установку. Поверхности ребер, которые имеют уклон, получают конусным вырезанием, и окончательно обрабатывают уклоны даже на тонких ребрах, причем в автоматическом режиме. Ранее для обработки графита применялось вихревое копирование. В настоящее время при изготовлении деталей из графита используется также высокоскоростная фрезерная обработка (при частоте вращения шпинделя до 50000 об/мин и подачах до 6000 – 10000 мм/мин). Этот метод обработки может применяться при обработке ряда деталей литейной оснастки, пресс-форм из различных материалов, в том числе и сталей, закаленных до 55 HRC.

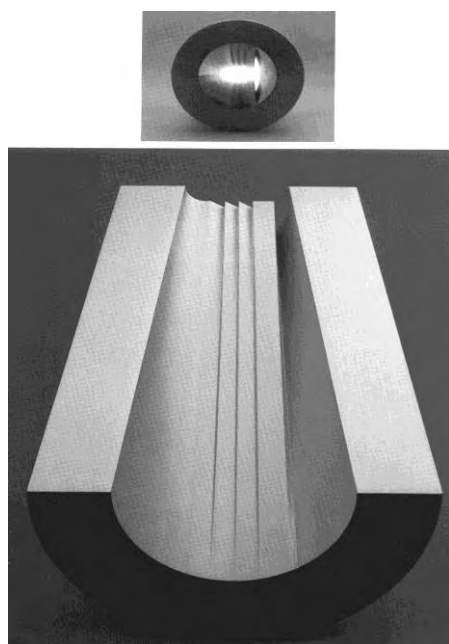


Рис.1.13. Пример фильеры для литейной машины, полученной вырезанием

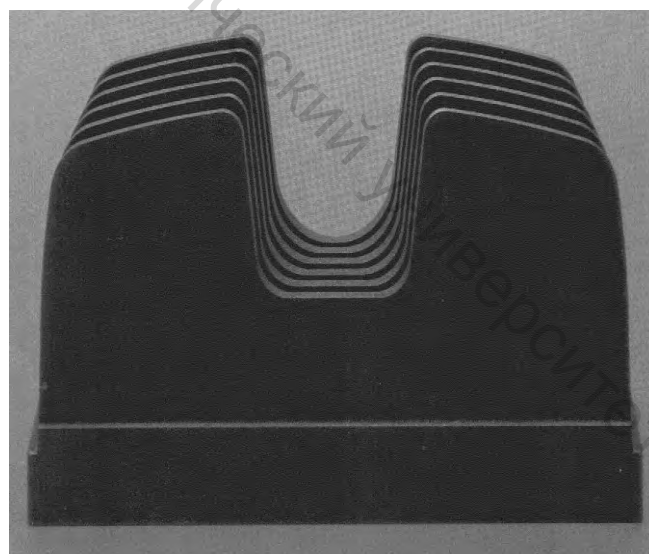


Рис. 1.14. Пример вырезной обработки электрода-инструмента из графита

Электроэрозионная обработка обеспечивает автономный режим работы оборудования при выполнении вырезания, что можно использовать как для доработки части детали (рис. 1.15), так и всего контура, а также при изготовлении мелких деталей (рис. 1.16).

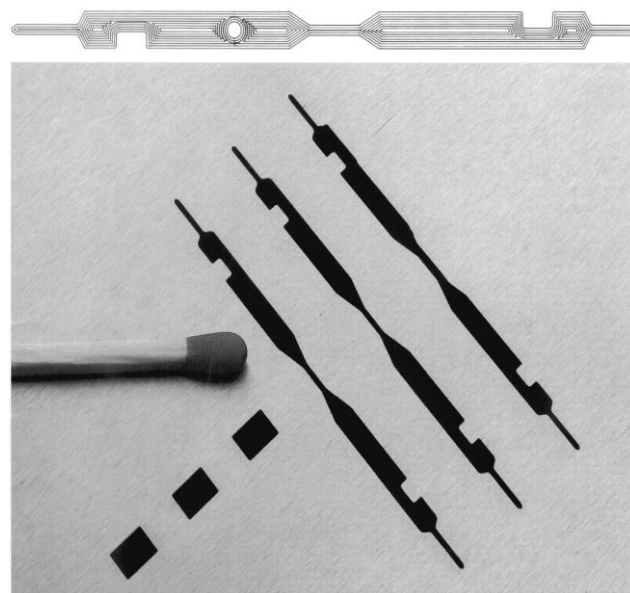


Рис. 1.15. Пример доработки переходных участков заготовки после фрезерования

Рис. 1.16. Пример вырезания мелких деталей простой и сложной формы

При выполнении приведенных работ обеспечивается точность размеров на детали в пределах $\pm (0,5 - 1,5)$ мкм в зависимости от типа применяемого оборудования. Параметры шероховатости определяются режимами обработки, применяемыми рабочими жидкостями и для некоторых моделей электроэрозионного оборудования достигают при полировании 0,04 мкм (Ra).

Электроэрозионная чистовая обработка токарных резцов (рис. 1.17) может производиться автономно, без наблюдения со стороны оператора (например, в ночное время). При этом гарантированно получают профиль с любым задним углом, внутренними радиусами до 0,02 мм, шлицами шириной до 0,04 мм при шероховатости поверхности 0,35 мкм (Ra).

Таким способом обрабатывают инструментальные стали, комбинированные сплавы с покрытиями, сверхтвердые и др. материалы.

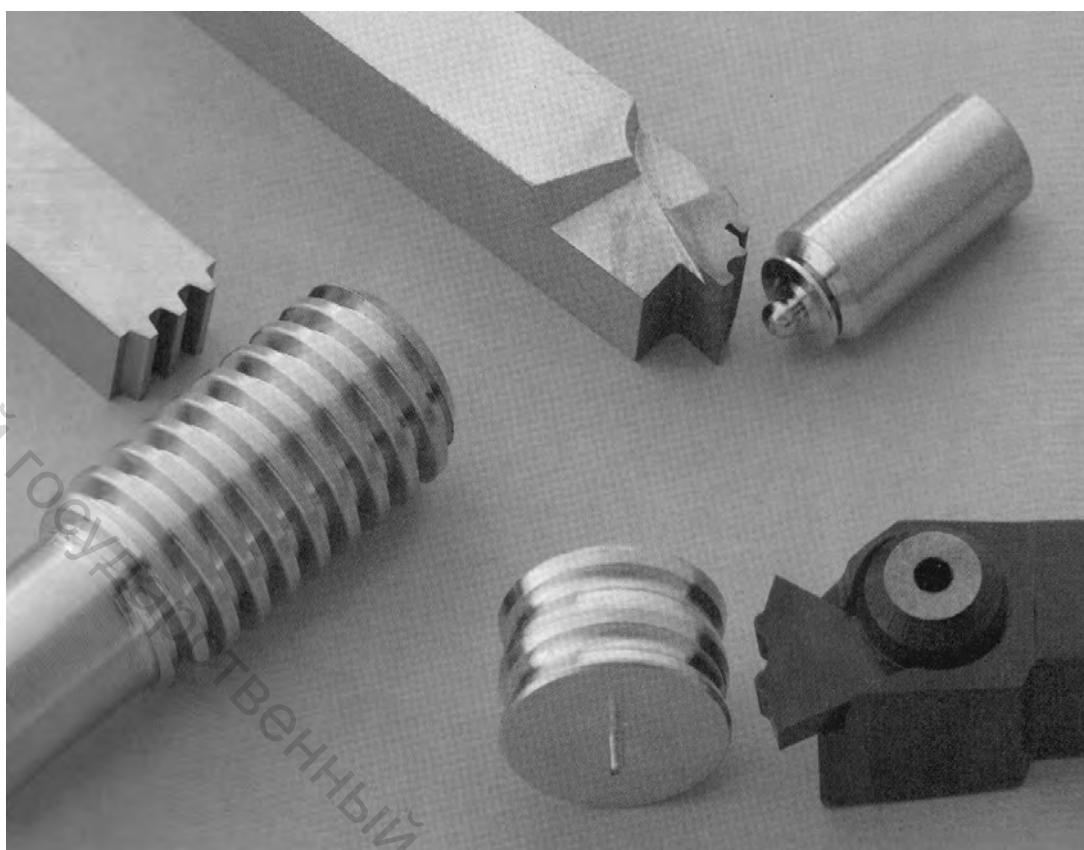


Рис. 1.17. Примеры вырезной обработки режущих кромок токарных резцов

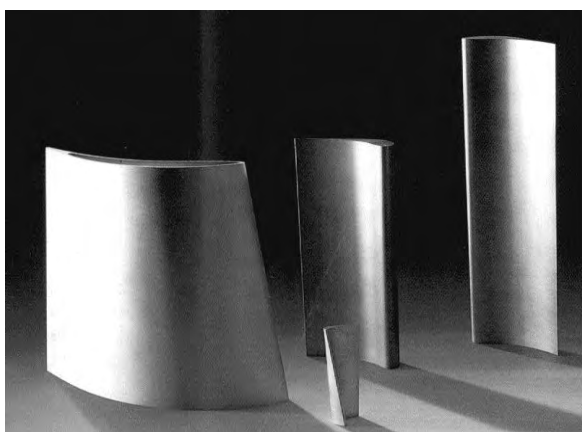


Рис. 1.18. Полые лопатки из титана, алюминия, стали, полученные вырезанием

На рис. 1.18 показаны полые лопатки из титана, стали, алюминия высотой от 250 мм, имеющие переменную толщину стенки, различные закрутки, утонения и кривизну. Обработка с применением поворотных приспособлений (поворотных столов) может производиться за один технологический проход, если нет особых требований по шероховатости и точности обработки.

Наличие ЧПУ позволяет обрабатывать разнообразные пространственные поверхности на входных и выходных участках пробивных и вытяжных штампов, экструзионной оснастки, художественных изделий (рис. 1.19) и т.п.



Рис. 1.19. Примеры обработки деталей сложной формы: электрода-инструмента для изготовления полости, формы для изготовления художественных изделий, матрицы и пуансона пробивного штампа, литейной оснастки для выдавливания корпуса электродвигателя, вытяжной формы, экструзионной матрицы

Новая область применения электроэрозионной обработки открывается также при изготовлении дизайнерских моделей из алюминия и форм для литья под давлением деталей сложной конфигурации, образующая поверхность которых формируется прямой (рис. 1.20). При этом контур торцов детали в плоскостях XY и UV, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии, может иметь самую разную форму. Каждый контур программируется отдельно, затем на каждом из них с помощью программного обеспечения ЧПУ определяется равное количество взаимосвязанных точек. В большинстве случаев это касательные точки контура. По этим точкам микропроцессор задает требуемые положения проволочного инструмента в направлении подачи и контролирует эти положения. Электрод-инструмент непре-

рывно проходит через пары взаимосвязанных точек. Все остальные расчеты, а также контроль по допускаемому углу наклона проволоки осуществляется автоматически при помощи микропроцессора компьютера.

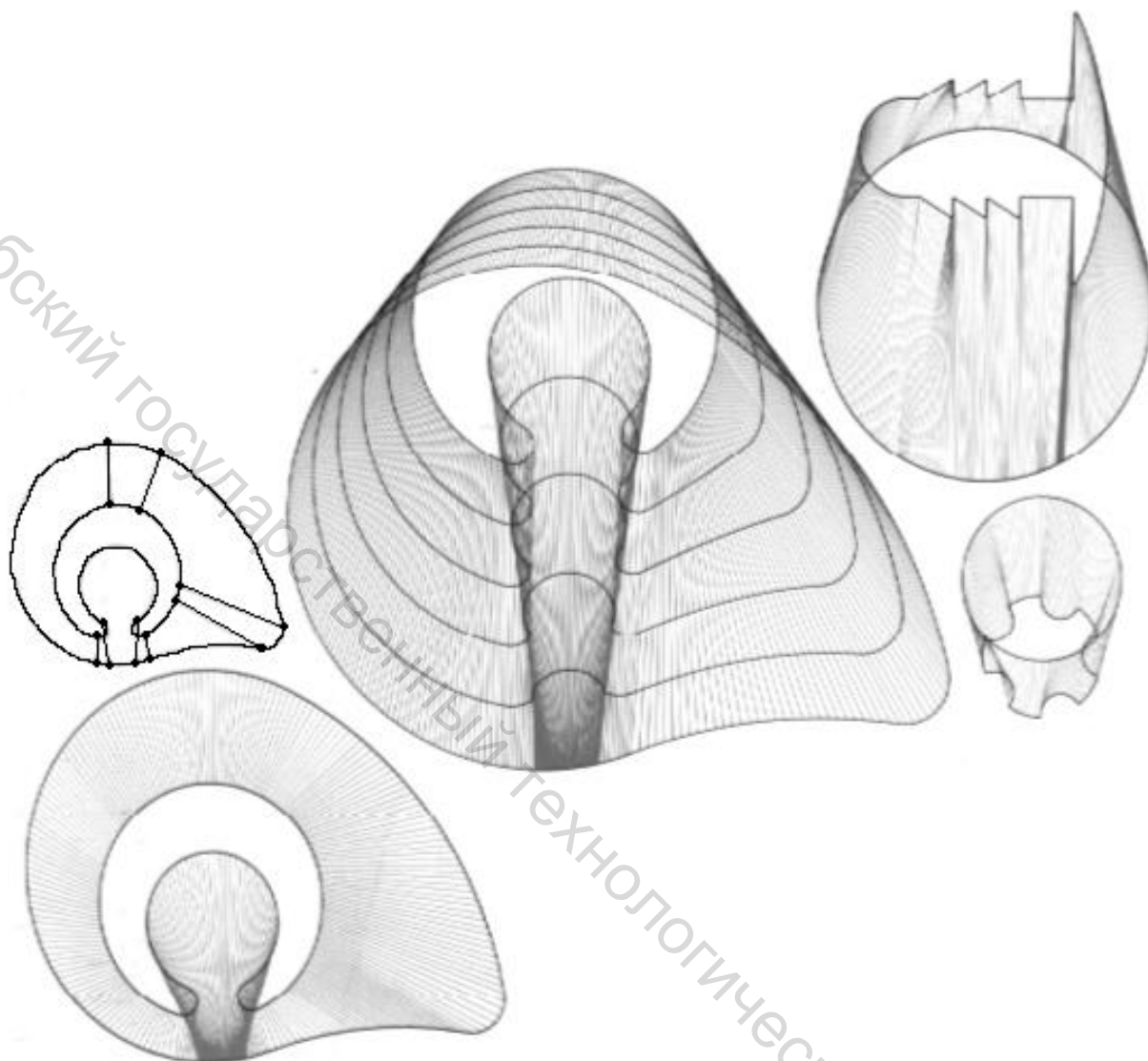


Рис. 1.20. Примеры расчета поверхностей литьевых инструментов

Одной из отраслей, где электроэрозионная обработка применяется наиболее широко, является автомобилестроение. Передним краем автомобилестроения служат машины «Формулы-1», при изготовлении деталей которых используются самые передовые методы обработки. Так, по данным иностранных производителей электроэрозионного оборудования, большая часть деталей автомобилей, участвующих в гонках, изготавливается с использованием установок для объемного копирования (прошивочных) и вырезных станков фирм Японии, Швейцарии, Германии и некоторых др. стран.

К таким деталям относятся:

- детали подвески – крепление амортизатора, пластина стабилизатора поперечной устойчивости, обоймы и штанги передней подвески;
- скоба верхнего переднего маятникового рычага;
- детали рулевого управления - угловая консоль треугольников механизма управления, рулевая рейка, шлицы рулевой головки, механизм быстрого снятия руля, вилка рулевого управления;
- детали двигателя и коробки скоростей - переключатель скоростей, зубчатые колеса, детали масляного насоса и т.д.;
- регулировочные клинья, аэродинамические элероны, спойлеры и т.п., изготавливаемые в литьевых формах и штампах.

Заготовки практически всех перечисленных выше деталей выполнены из специальных материалов, в большинстве случаев высокопрочных и трудно обрабатываемых.

Качество инструментов и деталей, изготавливаемых на электроэрозионных станках, во многом определяется шероховатостью их поверхностей. В большинстве случаев электроэрозионная обработка за 2 – 3 прохода обеспечивает точность и параметры шероховатости, сравнимые с чистовыми видами шлифования. Например, при вырезании заготовок параметры шероховатости после второго прохода достигают 0,7 мкм (по Ra).

Электроэрозионное оборудование может применяться для замены таких трудоемких операций, как доводка и полирование. Производители электроэрозионного оборудования комплектуют станки (стандартно при поставке либо в виде опций) различными системами, например, электронной системой быстрого зеркального выхаживания, антиэлектролизной полно-биполярной системой чистовой обработки и т.п., позволяющими ускорить процесс доводки и полирования, улучшить качество поверхностей. Использование указанных систем обеспечивает уменьшение параметров шероховатости поверхностей деталей из твердых сплавов, инструментальных сталей, титана и др. материалов. Для функционирования перечисленных выше систем разработаны специальные режимы работы генераторов импульсов. При обработке применяют как обычные, так и специальные рабочие жидкости.

Различные виды электроэрозионной доводки и полирования на окончательных режимах обработки обеспечивают получение зеркальных поверхностей (Ra 0,04 – 0,08 мкм) после 8 – 12 проходов. На рис. 1.21 приведено сравнение параметров шероховатости поверхностей, обработанных электродами-инструментами из

меди в обычных и специальных рабочих жидкостях (по данным Sodick). При выполнении обработки применяют специальные режимы работы генераторов импульсов, которые задаются системами ЧПУ.

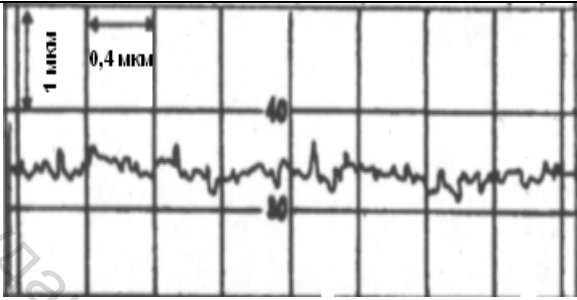
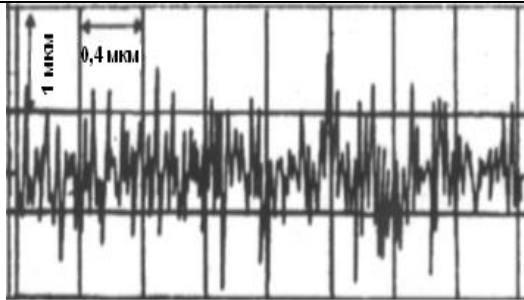
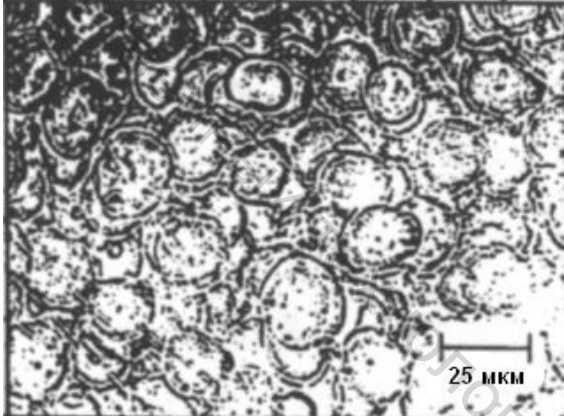
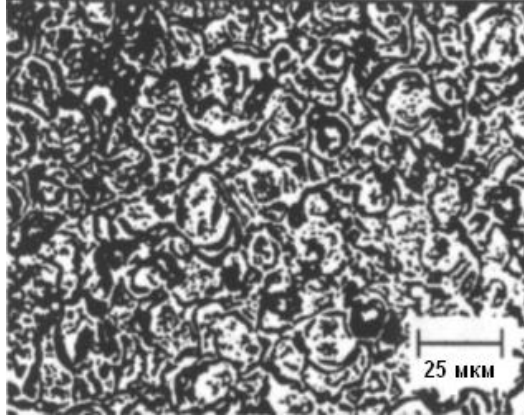
	Чистовая обработка в полупроводниковом диэлектрике	Чистовая обработка в обычном диэлектрике
Площадь проекции электрода	64 см ² (80x80 мм, медный электрод)	
Шероховатость поверхности	0,7 мкм Rmax/0,18 мкм Ra	2,7 мкм Rmax/0,33 мкм Ra
Результаты измерений профилемером		
Поверхность обработки под микроскопом (увеличение x400)		
	а	б

Рис 1.21. Пример повышения качества обработки: а – за счет применения специальной рабочей среды, б – обработка в обычном диэлектрике

В обычном диэлектрике физические особенности электрической эрозии не дают возможность получать "зеркало" на поверхностях более 200, в некоторых случаях максимум 400 – 500 мм². Электрод и заготовка образуют собой как бы конденсатор, емкость которого растет по мере увеличения площади обработки. При относительно большой площади электрода-инструмента создаются условия для формирования аномальных импульсных разрядов. При выполнении определенных операций обработки такие разряды начинают портить качество поверхности заготовки. Не разряжая эту емкость, нельзя избавиться от аномальных разрядов. Для того чтобы исключить аномальные разряды при доводочной обработке, в электроэрозионных станках начали применяться системы зеркального выхаживания больших площадей (10000 – 30000 мм² до 90000 мм²).

Чистовая обработка производится в специальной углеводородной диэлектрической жидкости, содержащей взвесь мелкодисперсных (размером менее 1 мкм) порошков кремния, графита и алюминия, а в ряде случаев и порошков других материалов. Причем рабочая жидкость обеспечивает равномерное распределение частиц порошка в объеме жидкости и препятствует выпадению их в осадок. Особенности обработки деталей с использованием таких диэлектрических жидкостей рассмотрены в отдельном параграфе (см. раздел 2.1). Чистовая обработка и доводка поверхностей при объемном копировании, выполняемая с применением специальных рабочих жидкостей, ускоряет процесс получения готовых деталей в 3 – 10 раз и дает возможность выхаживать до 0,04 мкм (Ra) поверхности площадью 10000 – 90000 мм². Большие площади обрабатываются последовательной обработкой отдельных участков. На рис. 1.22 приведено сравнение затрат времени на полирование, проводимое в обычной рабочей среде и при использовании специальных рабочих жидкостей и систем выхаживания.

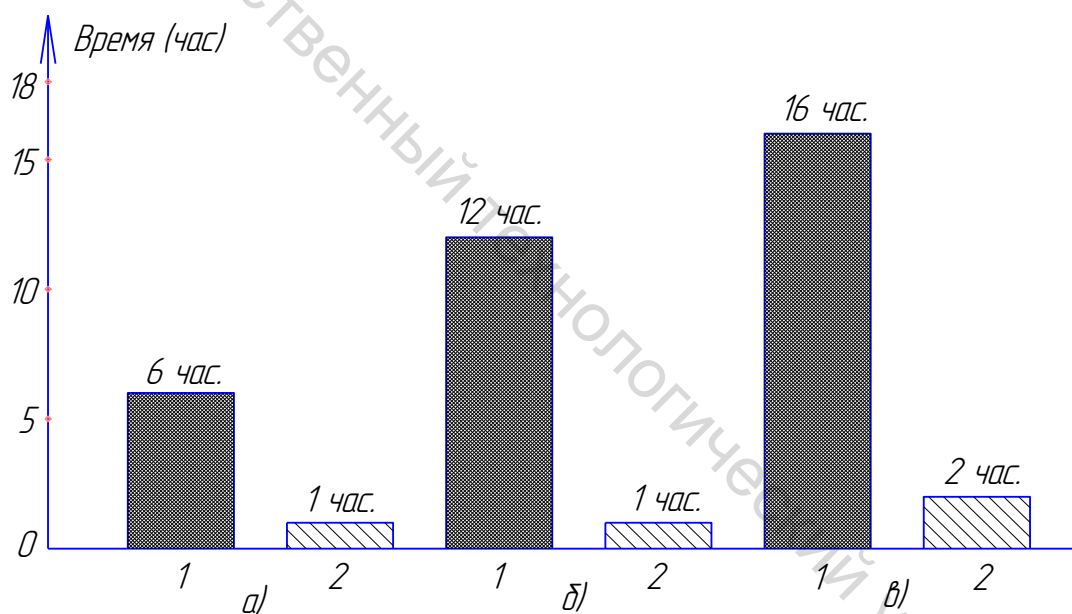


Рис. 1.22. Затраты времени на полирование без учета времени на грубую обработку при различных площадях обработки: а – 30 x 30 мм, б – 100 x 100 мм, в – 200 x 200 мм. ЭИ – медь, материал заготовки – сталь SKD-61 (аналог 4X5ФМС): 1 – полирование в обычном диэлектрике, 2 – полирование в специальном диэлектрике

Диэлектрические жидкости, содержащие порошковые частицы (так называемые полупроводниковые диэлектрики), используются не только в установках для объемного копирования, но и в проволочно-вырезных станках. При этом производительность вырезания в установках, обработка в которых производится с использованием специальных диэлектрических сред, в два раза выше, чем в вырезных стан-

ках, которые работают в обычном углеводородном диэлектрике. Поверхность изделий после чистовой обработки не имеет микротрещин, твердость значительно выше, чем после вырезных установок, работающих на воде, шероховатость поверхностей – 0,7 мкм по Ra достигается после 2 – 3 проходов.

Наряду с традиционными отраслями (профилирование металлорежущих инструментов, изготовление штамповой и литейной оснастки, кокилей, обработка лопаток турбин, специальные области автомобилестроения и т.п.) электроэрозионная обработка в последнее время начала широко использоваться в других отраслях промышленности, например, при изготовлении клапанных и насосных устройств в авиастроении, деталей медицинского оборудования, деталей машин для сборки и микросборки электроники, космической техники, в атомной энергетике и т.д.

В качестве пользователей электроэрозионного оборудования можно отметить практически все известные фирмы, занятые выпуском бытовой техники и микроэлектроники, продукции в автомобильной промышленности, самолето- и ракетостроении и т.д. На предприятиях СНГ в последнее время также начали широко использоваться электроэрозионные станки швейцарских и японских производителей (AGIE, Japax, Charmilles, Sodick, Mitsubishi). Оборудование используется при выпуске изделий различного назначения, включая вооружения, детали криогенной техники и т.п. На предприятиях республики (ЗАО «Атлант», РУП «Горизонт», РУП «Минский автомобильный завод», РУПП «Витязь» и др.) наибольшее применение получили станки AGIE и Charmilles Technologies. Кроме этого оборудования на некоторых предприятиях используются станки производителей из Германии, Тайваня и Китая. Причем цена электроэрозионного оборудования, произведенного в Китае или на Тайване, в ряде случаев значительно ниже, чем на аналогичное оборудование известных фирм.

Выше рассматривались возможности объемного копирования и вырезной обработки.

Для изготовления деталей из сталей, в том числе и закаленных до 55 HRC, а также при обработке цветных металлов и сплавов (алюминия, медных сплавов и т.п.), наряду с электроэрозионной обработкой, могут применяться и другие методы, например, высокоскоростное фрезерование и сверление. При этом обеспечивают обработку отверстий и полостей в некоторых случаях производительней, чем электроэрозионная обработка. Например, по данным Mitsubishi время на сверление в

стали отверстия диаметром 5 – 8 мм на глубину 20 мм составляет 3 – 5 с. Однако следует учитывать, что выбор окончательного варианта выполнения обработки одной и той же детали производится на основе сравнения результатов расчета приведенных затрат. Важно, чтобы совокупность затрат на выполнение всех операций технологического процесса обработки была минимальной.

Витебский государственный технологический университет

1.4. ПРЕИМУЩЕСТВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Начало развитию метода электроэрозионной обработки (EDM) было положено чуть более 60 лет назад. Сначала он внедрялся в основном в инструментальное производство для изготовления ковочных штампов, пресс-форм для литья под давлением, инструментов для обработки металлов резанием. На рис. 1.23 показана часть литейной формы, изготовленная на электроэрозионном оборудовании. Причем обработка таких деталей стала первым массовым применением электроэрозионной обработки. Эта область до настоящего времени остается наиболее обширной для использования электроэрозионных станков. В основном производстве, согласно статистическим данным, используются 3 – 4 из 10 проданных электроэрозионных установок. Тенденция увеличения использования электроэрозионного оборудования взамен традиционного в последнее время усиливается. Сдерживающим фактором в этом случае является стоимость станков, которая для современных установок с ЧПУ составляет сотни тысяч евро. Однако если учесть, что электроэрозионные станки с ЧПУ сочетают высокую производительность, как у станков-автоматов, с гибкостью, быстротой переналаживания на другие режимы работы, как и универсальные станки, в большинстве случаев можно добиться снижения стоимости изготовления деталей. Электроэрозионная обработка, заложенная в расчет трудоемкости изготовления детали, может принести значительно более ощутимый выигрыш, чем средства, сэкономленные на оптимизации металлорежущего оборудования.

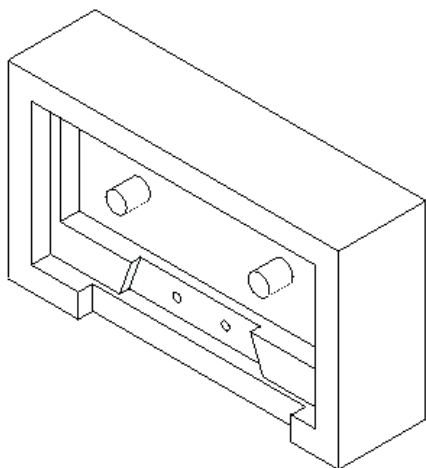


Рис.1.23. Деталь литейной формы для изготовления компакт-кассет

Традиционные методы обработки снятием стружки имеют ряд ограничений. К таким ограничениям можно отнести трудности обработки высокопрочных, коррозионно-стойких сталей, твердых сплавов, невозможность получения закрытых полостей сложной формы с резкими переходами, каналов и отверстий прямоугольной и других форм, глубоких и узких пазов и т.п. Современные способы электроэрозионной обработки позволяют из-

готавливать детали практически любой сложности. При этом обработка металлов резанием разрушает лишний материал и переводит его в стружку, а, например,

электроэрозионное вырезание (рис. 1.24) сохраняет значительное количество материала исходной заготовки, в большинстве случаев дорогостоящего, который может в последствии быть использован при изготовлении других деталей. При этом электроэрозионная обработка осуществляется чаще всего за одну установку заготовки, что способствует повышению точности ее обработки.

Остановимся на преимуществах метода электроэрозионной обработки:

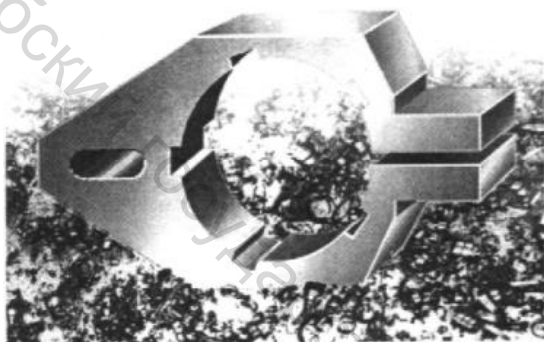


Рис.1.24. Преимущество вырезной обработки – уменьшение отходов (вверху – деталь получена обработкой резанием)

ботка на вырезных станках или электроэрозионных установках для объемного копирования не создает никакой дополнительной нагрузки.

3. Сокращается технологический процесс обработки деталей. При технологическом процессе, проводимом с использованием операций обработки резанием, заготовка проходит обработку разными инструментами и чаще всего на разных станках с переустановками, что существенно влияет на точность обработки, кроме этого увеличивается вспомогательное время на выполнение таких операций (рис. 1.25). При электроэрозионной обработке количество операций существенно сокращается, в ряде случаев до 2 – 3-х (рис. 1.26):

- подготовка черновой заготовки и программирование обработки;
- термическая обработка;

- получение готовой детали на электроэрозионном станке.

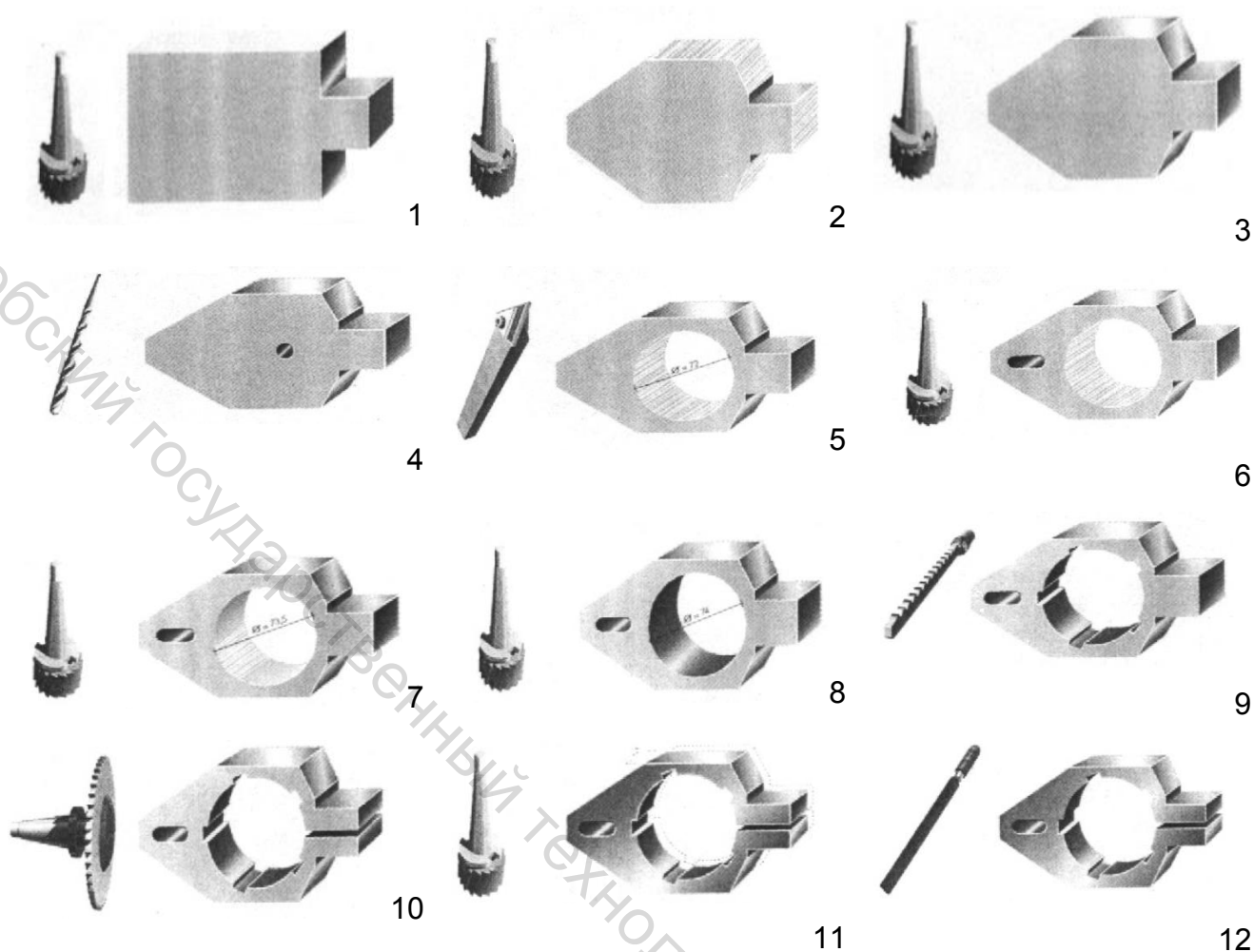


Рис. 1.25. Последовательность обработки детали традиционными способами:

- 1 – черновое фрезерование двух плоскостей – 12 мин;
 - 2 – черновая обработка наружного контура – 15 мин;
 - 3 – чистовая обработка наружного контура – 10 мин;
 - 4 – сверление отверстия $d=7$ мм – 3 мин;
 - 5 – растачивание $d=72$ мм до $d=74$ мм – 5 мин;
 - 6 – обработка паза шириной 8 мм – 14 мин;
 - 7 – получистовая обработка отверстия $d=74$ мм – 5 мин;
 - 8 – чистовая обработка отверстия $d=74$ мм – 5 мин;
 - 9 – выборка 5 пазов – 20 мин;
 - 10 – фрезерование шлица шириной 3 мм – 15 мин;
 - 11 – обработка заготовки до толщины 25 мм – 3 мин;
 - 12 – удаление заусенцев – 4 мин;
- приготовление/регулировка – 4 часа.

Полное время обработки – 5 часов 51 мин.



1



3



2



4

Рис. 1.26. Пример электроэрозионной обработки детали, показанной на рис. 1.25:

- 1 - программирование профиля – 15 мин;
 - 2 - сверление отверстий для заправки проволочного ЭИ – 5 мин;
 - 3 - вырезание наружного и внутреннего контуров – 1 час 45 мин;
 - 4 - обработки паза – 10 мин;
- приготовление/регулировка – 15 мин.

Полное время обработки – 2 часа 30 мин.

Из приведенного примера следует, что электроэрозионная обработка значительно сокращает вспомогательное время на изготовление детали. Достигнутая за одну операцию шероховатость поверхностей после обработки позволяет избежать множества последовательных переходов традиционной обработки. Кроме этого, в большинстве случаев детали подвергаются последующей доводке и полированию. До настоящего времени на большинстве предприятий такие операции выполняются вручную, что значительно увеличивает период изготовления изделий. В некоторых случаях применяют способы виброполирования. При выполнении доводки и полирования на электроэрозионных станках ручной труд полностью исключается, существенно повышается качество деталей, при этом значительно сокращаются затраты времени на обработку, что обеспечивает ощутимую экономию средств. Электроэрозионная обработка способствует также получению по-

верхностей деталей с новыми свойствами (по износостойкости, твердости, коррозионной способности и т.д.).

4. Электропроводящие материалы практически любой твердости могут быть обработаны на электроэрозионном оборудовании электродами-инструментами из менее твердых материалов, например, сталей, цветных металлов и сплавов, графита, порошковых композиций. Технологические процессы получения деталей при этом достаточно просты и легко осуществимы.

При обработке закаленных материалов велика опасность поломки традиционных инструментов, в то время как твердые сплавы, термически обработанная сталь, титан и др. высокопрочные и твердые материалы могут быть обработаны, например, на электроэрозионных вырезных станках.

Следует заметить, что совершенствуются и традиционные методы обработки, например, закаленных сталей, цветных металлов и сплавов. К таким методам следует отнести, прежде всего, высокоскоростное фрезерование (плоскостей, полостей, поверхностей сложного профиля и т.п.), при осуществлении которого возможна обработка деталей твердостью до 55 HRC (по данным Mitsubishi).

5. Электроэрозионная обработка обеспечивает изготовление поверхностей, которые невозможно получить обычными методами. Обработка квадратного отверстия с переходами стенок под произвольным углом, глубокой канавки с минимальными радиусами закругления на внутренних углах, узких пазов и т.п. невозможно осуществить резанием. В то же время детали самых сложных конфигураций могут обрабатываться на вырезном оборудовании и станках для объемного копирования. При этом размеры и форма отверстий и полостей могут быть практически любыми – от нескольких миллиметров до долей миллиметра. Радиус перехода при обработке углов зависит от диаметра ЭИ и режима обработки.

6. Электроэрозионное оборудование оснащается системами числового программного управления, что в большинстве случаев обеспечивает возможность организации автономной работы станков. Для выполнения обработки на станке не требуется постоянное присутствие оператора. Кроме этого при оснащении электроэрозионных станков сменщиками электродов-инструментов и заготовок, обеспечивается их непрерывная работа в течение продолжительного времени, даже в выходные дни. Для решения экстренных вопросов станки дополнительно снабжаются специальными системами, которые посылают сообщения (SMS) на мобильный телефон оператора и обеспечивают тем самым устранение возникших проблем. Возможность автономной работы станков – один из способов повышения

точности и качества обработки, т.к. снижается влияние субъективного фактора на процесс обработки.

7. Электроэрозионные станки позволяют придать детали или ее поверхностям новые качества, которые улучшают изготовленную деталь. Так, например, держатель ступицы гоночного автомобиля «Формула-1» состоял из 10 частей, обработанных предварительно независимо одна от другой, а затем сваренных с помощью сложного сборочного шаблона (рис. 1.27). Задний держатель ступицы выполняет следующие функции: поддерживает задний мост; служит опорой для колодок дисковых тормозов, подвески датчика скорости, установки трубопровода системы охлаждения дисковых тормозов, осуществляет вентиляцию последних. Полное время его изготовления при традиционном технологическом техпроцессе составляет 57 часов.

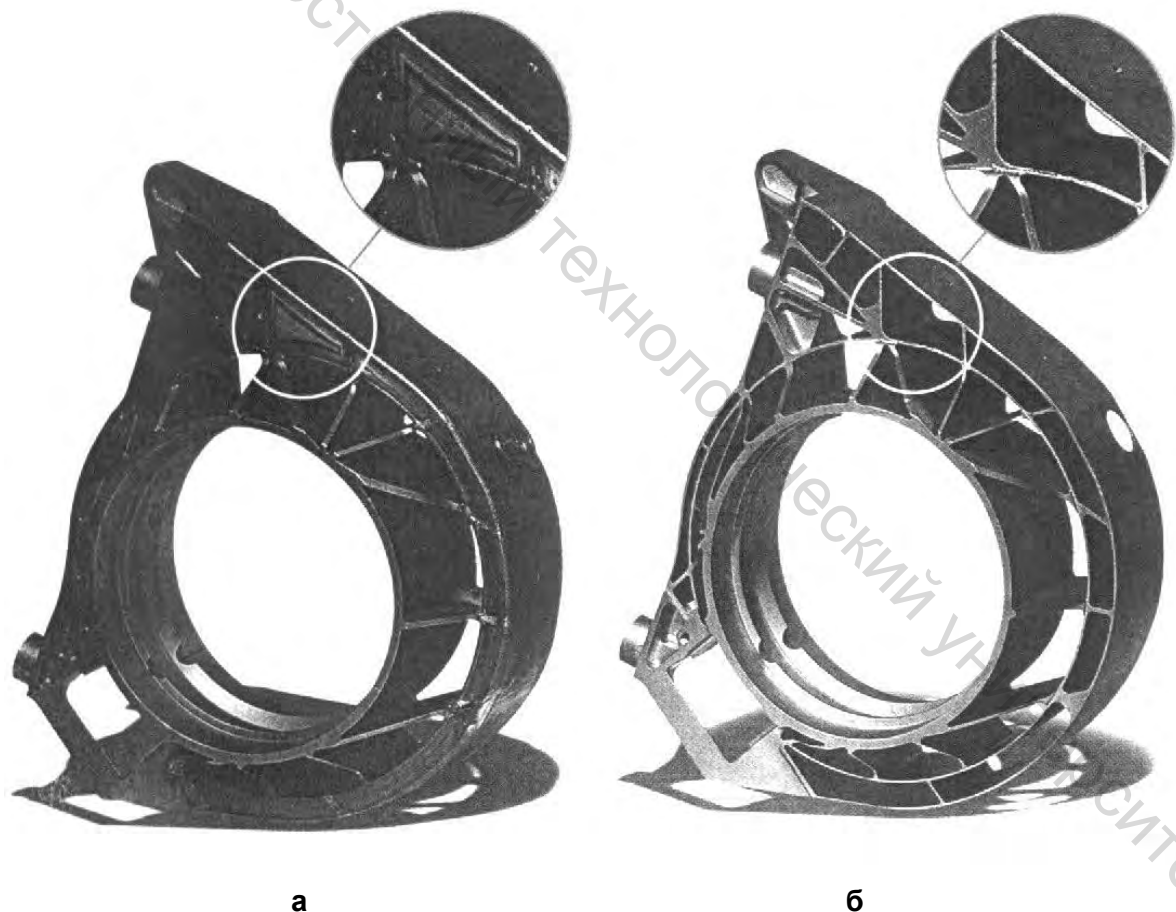


Рис. 1.27. Пример изготовления детали:

а – сваркой из нескольких частей, б – электроэрозионным вырезанием

Сейчас, благодаря электроэрозионному вырезанию, этот элемент изготавливается как единое целое за 40 часов. Если учесть, что за сезон требуется 40

таких элементов, суммарная экономия времени составит 560 часов. Учитывая стоимость минуты сборочных работ, необходимость наличия специальной оснастки для выполнения таких работ, ее невысокую точность, экономия только на одной детали составляет значительную сумму. Кроме того, что, пожалуй, еще важнее, деталь становится более легкой за счет уменьшения толщины стенок, ее изготовление в виде единого блока придает ей больше прочности, появляется возможность применить титан, известный как материал легкий и в то же время высокопрочный, обрабатываемый на электроэрозионных станках, но трудно обрабатываемый традиционными способами. Все это в целом позволяет уменьшить вес детали, а также общий вес автомобиля, что дает затем выигрыш в гонках.

Благодаря программному обеспечению, заложенному в устройства ЧПУ электроэрозионных станков, можно непосредственно на станке осуществить различные идеи: можно на стадии проектирования и обработки экспериментировать с разными вариантами изготовления одной и той же детали, а затем выбрать оптимальное решение.

Следует подчеркнуть, что все вышеизложенные преимущества начинают проявляться только в том случае, если конструкторские и технологические бюро учитывают особенности и преимущества электроэрозионной обработки непосредственно с момента конструирования детали.

Электроэрозионная обработка стала в настоящее время частью производственной технологии и позволяет снижать себестоимость деталей. Эффективность применения электроэрозионной обработки стремительно возрастает при обработке наиболее сложных и высокоточных деталей, особенно при автоматизации наладочных работ. Благодаря этому возможна организация 24-х часовой автономной работы электроэрозионного станка, что равносильно замене нескольких стандартных фрезерных, сверлильных и других станков. Это обстоятельство особенно ценно в нынешних условиях при резко сократившемся числе квалифицированных специалистов.

Кроме этого, электроэрозионная обработка в большинстве случаев требует иной технологической последовательности, нежели при механической обработке металлов. Это касается в основном возможности изготовления деталей из термически обработанных материалов, уменьшения количества основного технологического оборудования для выполнения черновых и чистовых, а, в большинстве случаев, и доводочных операций, а также сокращения вспомогательного

времени из-за переустановок заготовок со станка на станок при осуществлении традиционных технологических процессов обработки.

Важно учитывать технический уровень применяемого для обработки заготовок оборудования, в том числе и электроэрозионного. Своевременное обновление станочного парка и применение в технологических процессах обработки нового оборудования позволяет увеличить объемы выпускаемой продукции и существенно снизить затраты на ее изготовление. Например, при обработке лопаток колеса (диаметром 190 мм) турбины криогенного насоса из жаропрочного никелевого сплава ХН43МБТЮ (рис. 1.28) КБ Химавтоматики (г. Воронеж) ранее применялись электроэрозионные станки с копирами. Для окончательной обработки расходовалось более 130 электродов-инструментов. Затраты времени на обработку составляли около года. Применение нового прошивочного станка с ЧПУ в 5-ти координатном исполнении позволило уменьшить затраты времени на обработку до двенадцати суток и израсходовать при этом минимум электродов-инструментов (4 электрода 4-х видов на 4 лопатки с двух сторон). Общий съем металла составляет 1900 мм^3 . Параметры шероховатости поверхностей – $0,8 \text{ мкм}$ (R_a), толщина измененного слоя – $1 - 2 \text{ мкм}$, причем его можно уменьшить, однако при этом возрастет время доводки.

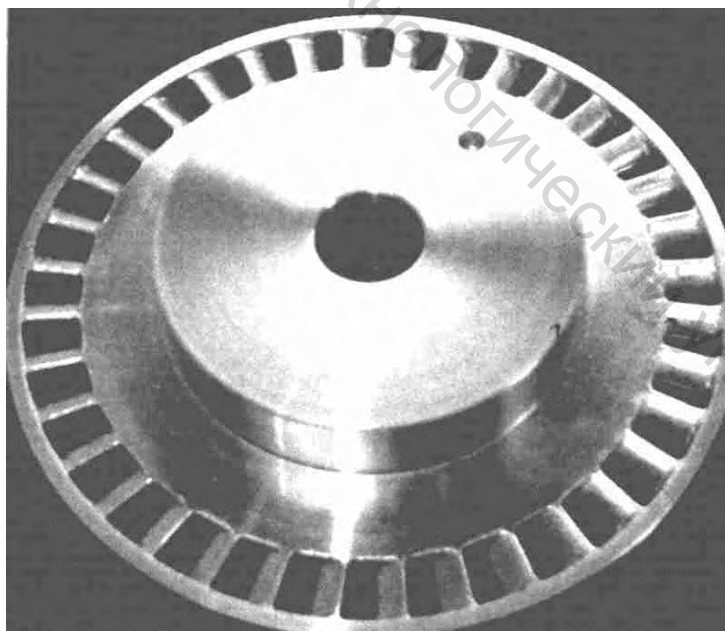


Рис. 1.28. Фотография колесо турбины криогенного насоса для перекачки жидкого водорода

8. При правильной разработке технологии электроэрозионной обработки различных по назначению деталей существенно уменьшается брак, повышается производительность и экономическая эффективность процессов по сравнению с технологическими процессами обработки заготовок резанием. Так, например, использование проволочно-вырезной обработки деталей штампа взамен 13 операций механической и слесарной обработки позволяет уменьшить стоимость обработки в 10 раз, трудоемкость – в 15 раз, энергоемкость обработки – в 7 раз, количество расходных материалов – в 6 – 7 раз, затраты на инструмент – в 14 раз. Производительность электроэрозионной обработки в настоящее время намного выше в сравнении с традиционными методами обработки, кроме некоторых операций высокоскоростного фрезерования и абразивной обработки.

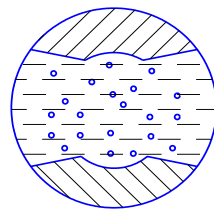
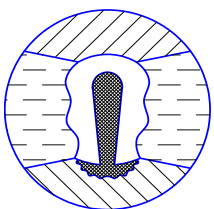
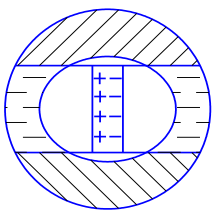
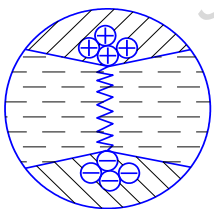
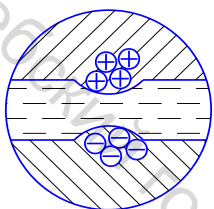
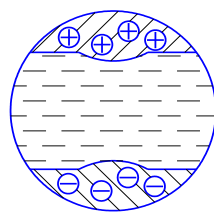
9. При использовании электроэрозионного оборудования улучшаются условия труда, устраняется тяжелый физический труд при выполнении технологических операций, повышается безопасность работы.

Однако электроэрозионная обработка обладает и некоторыми недостатками, которые ограничивают области ее применения. К числу таких недостатков относятся:

- 1) невозможность обработки не токопроводящих материалов;
- 2) необходимость применения рабочих жидкостей и их введения в зону обработки, что усложняет конструктивное исполнение станков;
- 3) высокая стоимость оборудования и необходимость применения специальных расходных материалов.

1.5. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

1.5.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ



Электрическая эрозия – разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между ЭИ и заготовкой электрических разрядов. Электрические разряды между заготовкой и инструментом протекают в рабочей жидкости, называемой диэлектриком. Электрод-инструмент и деталь находятся в диэлектрике под напряжением на некотором расстоянии друг от друга, называемом межэлектродным промежутком (МЭП). Диэлектрическая жидкость обеспечивает стабилизацию процесса эрозионного разрушения поверхности заготовки при следовании множественных импульсов в межэлектродном промежутке. Напряжение на электроды подается от источника питания, обеспечивающего возбуждение импульсных разрядов.

Рассмотрим физическую модель единичного импульсного электрического разряда, стадии протекания которого показаны на рис. 1.29. *Электрические заряды концентрируются на поверхностях электрода-инструмента и заготовки.* Между электродом-инструментом и заготовкой существует электрическое поле, напряженность которого наиболее интенсивна в точке, где межэлектродный зазор между рабочими поверхностями электродов минимален. *Напряженность электрического поля возрастает до тех пор, пока не превысит некоторого предельного значения.* В этот момент скачкообразно нарушается прочность диэлектрика и *происходит пробой межэлектродного промежутка*, проводимость значительно возрастает и наблюдается его ионизация. Пробой является начальной стадией разряда, вызывающего эрозию электродов. При

Рис. 1.29. Модельное представление стадий протекания импульсного разряда

пробое частицы, находящиеся в зоне разряда, ориентируются определенным образом и формируют канал разряда. В результате пробоя между электродами вначале протекает искровой разряд. После этого напряжение падает, а поступление тока на этом участке межэлектродного промежутка продолжается на протяжении всего разряда. Затем образуется плазма, выплавляется металл с электродов, появляется газовый пузырь, пары металлов выдавливаются в МЭП, происходит восстановление слоя рабочей жидкости в зазоре между электродами.

На рис. 1.30 показан пример кривых тока и напряжения.

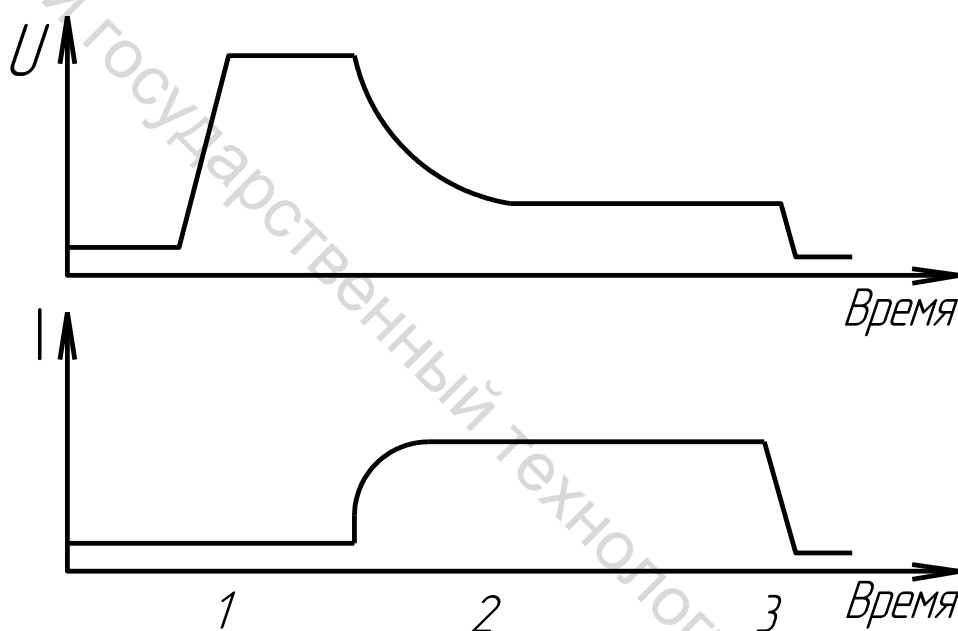


Рис.1.30. Пример кривых тока и напряжения при единичном электрическом разряде

Время следования единичного импульса условно разделено на три периода, в течение которых наблюдается пробой диэлектрической жидкости и образуется канал разряда (участок 1), следует рабочий импульс тока (участок 2), а затем прекращается прохождение тока, происходит выброс продуктов эрозии и восстановление электрической прочности межэлектродного промежутка (участок 3).

В результате прохождения импульса тока в канале разряда образуется плазма. Высвободившаяся электрическая энергия превращается в теплоту, которая приводит к нагреву материала ЭИ, заготовки и диэлектрика, находящимся в межэлектродном промежутке в зоне действия канала разряда. Под

воздействием температуры, достигающей 5000°С и более, материал ЭИ и заготовки в местах контакта с облаком плазмы, а также диэлектрик начинают плавиться и испаряться. Причем возможно как плавление материала электродов, так и его испарение. Вероятность протекания приведенных процессов определяется плотностью и количеством энергии, подводимой к зоне действия единичного импульсного разряда. Рабочая жидкость при этом переходит в газообразное состояние, имеет высокое давление и разогревается до высоких температур.

После прекращения импульса тока пары и капли металла и газа выбрасываются в межэлектродный промежуток и осаждаются в диэлектрической жидкости. *Возможны различные механизмы удаления металла с поверхности электродов. Наиболее эффективными следует считать: удаление металла с поверхности электрода в капельном состоянии; при испарении и капельном выбросе продуктов эрозии; взрывное испарение материала электродов.* В результате действия каждого разряда на поверхностях электродов в общем случае образуются эрозионные лунки, имеющие форму тела вращения в виде сплюснутого эллипсоида вращения. В некоторых случаях на электродах образуются отдельные лунки правильной круговой формы, перекрывающие друг друга. *Общий эрозионный эффект определяется полярностью включения электродов, электрическими и энергетическими параметрами разряда, свойствами диэлектрической жидкости, материалом электродов.* При этом структура поверхности эрозионной лунки на электродах весьма неоднородна. Это связано с тем, что линии тока за время следования единичного импульсного разряда перемещаются по поверхности электродов в пределах образующегося после пробоя МЭП канала разряда. *Подбирая полярность включения электродов, энергию импульса, величину тока в нем, материал электродов, а также соответствующую диэлектрическую жидкость, можно добиться минимальной эрозии электрода-инструмента при максимальной эрозии заготовки.*

Приведенная схема описывает протекание рабочего импульсного разряда между электродами. В зависимости от состояния МЭП *электрический разряд может протекать различным образом: через эрозированные частицы, через эрозированные частицы и газовые пузырьки, через газовые пузыри, по границе «газовый пузырь – жидкость»* и т.д. Состоявшийся электриче-

ский разряд по-разному воздействует на материал заготовки. Наименее эффективными по объему удаляемого с заготовки материала являются электрические разряды через газовые пузыри, при следовании которых съем материала на один разряд снижается в 20 – 30 раз.

После рабочего импульсного разряда в межэлектродный промежуток выбрасываются продукты эрозии электродов и пиролиза рабочей жидкости. *Для стабильного протекания нормального режима электроэрозионной обработки необходимо поддерживать такое состояние диэлектрика, при котором образовавшийся в результате электрической эрозии шлам удаляется из межэлектродного зазора. Для этих целей используют прокачку диэлектрической жидкости через зазор между ЭИ и заготовкой.*

После нескольких последовательных разрядов, произведенных за определенный период времени, получается поверхность, состоящая из мельчайших лунок. Используя разряды различной формы и энергии, можно заранее определить количество материала, снятого с поверхности обрабатываемой заготовки.

Приведенный выше процесс включает искровую и дуговую стадии импульсного разряда между электродами, протекает при черновой обработке заготовок и обеспечивает значительный съем металла. При чистовой и особенно доводочной обработке импульсный разряд чаще всего включает только искровую стадию, при которой с поверхности заготовки удаляется небольшое количество материала, что способствует повышению качества обработанной поверхности.

Описанный выше процесс отражает наиболее общие стадии следования рабочего импульсного разряда между электродами.

Наряду с рабочими импульсами в процессе электроэрозионной обработки между ЭИ и заготовкой протекают и холостые разряды, при которых эрозии материала заготовки не наблюдается. Для уменьшения их количества межэлектродный зазор должен поддерживаться в оптимальных пределах. В этом случае напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, будет иметь практически одинаковое значение от импульса к импульсу, что в конечном итоге обеспечит протекание рабочего разряда между электродами.

Для выполнения приведенного выше условия в импортном электроэрозионном оборудовании задают время задержки импульса поджига, кото-

рое длится до тех пор, пока напряжение пробоя не достигнет требуемого значения. Используются также системы (например, ACW, англ.), обеспечивающие мгновенное снижение величины импульса тока, если она превышает значение, при котором протекает рабочий импульс.

В научных публикациях детально рассматриваются не только единичные импульсные разряды, но и различные стадии следования множественных разрядов от момента нарушения прочности диэлектрика до выхода продуктов обработки в межэлектродный промежуток и восстановления свойств диэлектрической среды. В настоящее время предлагаются различные варианты объяснения физико-химического воздействия импульсного разряда на поверхности электродов. Одни ученые считают, что решающее влияние на эрозию материала электродов оказывают объемные источники тепла, что обусловлено эффектом Джоуля-Ленца. Так, например, Некрашевич И.Г. и Бакуто И.А. связывают процесс образования лунки с тем, что ток из столба разряда проходит через малую площадку, которая мигрирует по поверхности электрода, в результате чего образуется полный эрозионный след. Золотых Б.Н. отводит наибольшую роль в разрушении электродов поверхностным источникам тепла, возникающим за счет бомбардировки поверхности катода ионами и анода – электронами. Зингерман А.С. считает, что процесс распространения тепла от поверхностных источников тепла нестандартный и первопричиной удаления металла из лунки является вскипание расплавленного металла, выделение растворенных в нем газов в момент резкого падения давления в зоне разряда. Мандельштам С.П., Райский С.М., Золотых Б.Н., изучая эрозию анода, отводят определяющую роль в его разрушении механическим воздействиям струй металла, вырывающихся из электродов. Однако уточняющие экспериментальные исследования К. Шорба и Б.Х. Зитка доказали крайне малое влияние струй металла на разрушение анода. Ряд экспериментальных исследований внешнего вида и размеров лунок, проведенных Ставицким Б.И., подтверждает предположение о том, что удаление материала электрода-заготовки происходит вследствие удара электронного пучка о ее поверхность, в результате чего расплавляется некоторый объем металла. Поскольку при этом плотности тока имеют огромные величины, электродинамические силы выбрасывают в межэлектродное пространство расплавленный металл и его пары. Электрический импульс вызывает взрыв металлической поверхности

электрода, что приводит к появлению лунки. Частицы металла в виде порошка различной формы оседают в диэлектрической жидкости. Последнее из приведенных предположений было высказано авторами термодинамической теории физической природы механизма эрозии материала электрода – Лазаренко Б.Р., Городецким Д.И., Краснолобом К.Я.

Проведение значительного количества теоретических и экспериментальных исследований связано с необходимостью разработки такой модели электрической эрозии, которая учитывала бы влияние большого количества факторов. Наряду с приведенными выше, на электрическую эрозию материала заготовки оказывают воздействие гидродинамические процессы в МЭП, влияние разрядных каналов друг на друга, импульсное воздействие паров металла и диэлектрика на ЭИ и заготовку, перенос материала электродов на противоположные поверхности, загрязненность диэлектрической среды, особенности протекания разрядов на поверхностях катода и анода, влияние газовых пузырей на характер эрозионного разрушения поверхностей и ряд других.

Электрическая эрозия стабильно протекает при определенных значениях напряжения между электродом-инструментом и заготовкой, а пробой диэлектрика происходит при напряжении, величина которого чаще всего больше этого определенного значения. При некотором расстоянии между электродами от генератора импульсов в межэлектродный промежуток может подаваться импульс поджига, производящий пробой диэлектрика, а затем следует рабочий импульс, обеспечивающий нормальный режим электроэрозионной обработки. Затем вследствие прекращения импульса тока канал разряда исчезает и происходит восстановление прочности диэлектрика. При осуществлении некоторых процессов электроэрозионную обработку, особенно черновую, производят без поджигающих импульсов.

Результатом воздействия импульсного разряда является удаление части материала с рабочей поверхности ЭИ и заготовки. Та часть металла, которая разогревается при действии импульсного разряда только до плавления, способна остаться на твердой основе за счет действия сил поверхностного натяжения или выдавливаться при действии больших давлений с поверхности электродов и в виде частиц оседать в диэлектрической жидкости.

Параметры шероховатости поверхности после обработки могут быть различными и зависят от энергии разрядов, мощности и величины

тока в импульсе. При большой энергии импульсов (измеряемой джоулями) и высокой плотности тока (при электроимпульсном режиме) обеспечивается высокая производительность съема материала заготовки. При прошивочной обработке стали электродами-инструментами из графита скорость съема в зависимости от площади обрабатываемой поверхности достигает $600 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ($4,7 \text{ г/мин}$ для генератора импульсов на 40 А) – $25000 \text{ мм}^3/\text{мин}$ (при токах $200 - 300 \text{ А}$). При грубой вырезной обработке в воде скорость вырезания по стали при использовании латунной проволоки (диаметром $0,25$ и $0,36 \text{ мм}$) с покрытием составляет $300 - 550 \text{ мм}^2/\text{мин}$. В этом случае качество поверхности невысокое, а параметры шероховатости изменяются в пределах от $Ra 5,0 \text{ мкм}$ и грубее. Малая энергия импульсов (десятые и даже сотые доли Дж), подводимая к электродам (при электроискровом режиме), наоборот, дает хорошее качество обработанной поверхности (параметры шероховатости от $Ra 3,2 \text{ мкм}$ и менее), однако производительность электроэрозионной обработки невелика. При объемном копировании (прошивочной обработке) с малой энергией импульсов съем материала составляет $60 - 200 \text{ мм}^3/\text{мин}$ (меньшее значение – при обработке в масле, и большее значение соответствует обработке в воде). Чаще всего электроэрозионная обработка проводится в несколько стадий: черновая обработка, затем проводится чистовая обработка, доводка и тонкая доводка (или полирование), используемая в технологических процессах обработки некоторых деталей.

1.5.2. СПОСОБЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В общем случае подвод энергии к участкам обрабатываемой поверхности при электроэрозионной обработке может осуществляться одним из следующих способов: через непосредственный контакт электрода-инструмента и заготовки; канал разряда, возникающий между ними; комбинированным способом. В первом случае контакт осуществляется по микронеровностям поверхностей электрода-инструмента и заготовки, которые могут быть неподвижны, либо находятся в относительном движении. При некотором значении подводимой мощности происходит нагрев контакта и прилегающей к нему зоны. Размерная обработка в этом случае может быть осуществлена, если металл заготовки будет доведен до пластического состояния или плавления. Вращающийся инструмент будет удалять расплавленный металл. Этот метод называют также механическим способом создания импульсных электроэрозионных разрядов.

Подвод энергии через канал разряда осуществляется при возникновении электрического разряда между наиболее близкими участками электрода-инструмента и заготовки. Размер канала разряда может достигать весьма малых величин, изменение которых позволяет регулировать режимы обработки. При этом мощность энергии, выделяемой в канале разряда, значительно выше, чем при контактом способе подвода энергии. При электроэрозионной обработке используются искровые и дуговые импульсные разряды, отличие которых состоит в размере канала разряда и, следовательно, при равных энергиях в концентрации мощности. Подвод энергии через канал разряда определяет электрический метод генерирования импульсов от специального генератора импульсов и составляет основу электроискровой и электроимпульсной обработки. Технологические аспекты этих разновидностей электроэрозионной обработки будут рассмотрены ниже.

В большинстве схем электроэрозионной обработки, проводимой в диэлектрической жидкости, используются следующие *два метода генерирования импульсных разрядов*.

Первый метод используют для получения коротких импульсных разрядов большой скважности, применяемых при обработке твердых сплавов и тугоплав-

ких материалов. В этом случае электрическая энергия от источника питания через токоограничивающий элемент запасается в накопителе, а передается в межэлектродный промежуток через коммутирующее устройство либо без него. Последнее объясняется тем, что МЭП также выполняет функцию коммутирующего устройства, т.к., находясь в непроводящем состоянии, до определенного времени не препятствует накоплению энергии в накопителе. По мере увеличения напряжения запасенная в накопителе энергия выделяется в виде импульсного разряда. В качестве накопителя энергии обычно применяют электрические конденсаторы, способные аккумулировать энергию и отдавать ее в виде коротких импульсов большой мощности. Конденсаторы обладают высокими электрическими и эксплуатационными свойствами, поэтому широко применяются в качестве накопителей энергии, особенно в генераторах импульсов импортного электроэрозионного оборудования (например, швейцарского) для выполнения обработки на доводочных режимах. В генераторах импульсов с большой скважностью, в которых применяют в разрядной цепи дополнительные коммутирующие устройства, могут использоваться источники питания высокого напряжения и высоковольтные конденсаторы. Это позволяет получать при сравнительно малых токах большие мощности и уменьшать потери энергии в коммутирующих устройствах. Возможно получение коротких импульсов большой мощности с высокой частотой следования, что повышает производительность обработки при достижении малой шероховатости поверхности. Однако при этом усложняется конструктивное исполнение таких схем генерирования импульсов.

Второй метод генерирования применяют для получения импульсов значительной длительности с малой скважностью, которые используют при обработке сталей и магнитных материалов, имеющих сравнительно невысокую температуру плавления. Длительность и скважность таких импульсов задаются коммутирующим устройством, амплитуда тока – величиной напряжения источника питания и сопротивлением токоограничивающего элемента в электрической цепи. Разновидность приведенного метода генерирования импульсов используется в специальных электрических машинах, вентильных схемах и некоторых других. Получение требуемых импульсов тока обеспечивается за счет специальной формы напряжения источника питания. Для генерирования импульсов большой мощности с малой скважностью используют электрические машины со специальной конструкцией магнитных систем, что дает возможность

вместо постоянного или синусоидального напряжения получать импульсные напряжения.

Для получения импульсов с высокой частотой следования используют машины, создающие гармонические колебания частотой 20 – 40 кГц, волны которых обратной полярности с помощью выпрямителей отсекаются и полученное напряжение подводится к межэлектродному промежутку. Для генерирования импульсов с малой частотой следования весьма большой мощности в качестве источника питания используют силовую сеть (например, трехфазную), искажая синусоидальную форму напряжения с помощью магнитонасыщенных трансформаторов, отсекая выпрямителями волну нежелательной полярности и полученное импульсное напряжение к МЭП.

Для получения импульсных разрядов с большей скважностью генераторы выполняются на управляемых тиристорах, что обеспечивает получение импульсов с регулируемыми в больших пределах амплитудой и длительностью. Частота следования задается при этом источником питания.

Комбинированный подвод энергии наблюдается обычно при контактном начале разряда, прерывании этого контакта механическим способом и развитии дуги размыкания.

На механическом методе генерирования импульсов основана анодно-механическая и электроконтактная эрозионная обработка, на электрическом способе – электроимпульсная и электроискровая обработка.

Генераторы импульсов, используемые для подвода энергии к электродам, разделяются на две группы: *независимые* и *зависимые*. *Независимыми* называют генераторы, характеристики которых (амплитуда, длительность, полярность, частота и форма импульсов) во время работы практически не зависят от состояния эрозионного промежутка. *Зависимыми* называют генераторы, у которых параметры определяются не только типом генератора, но и состоянием межэлектродного промежутка. Существуют также ограниченно зависимые генераторы импульсов.

Для осуществления обработки необходимо иметь импульсные разряды не только определенных параметров, но и формы. В электроэрозионной обработке используют импульсы различной формы: униполярные, симметричные знакопеременные импульсы, несимметричные знакопеременные импульсы, унипо-

лярные импульсы с постоянной составляющей (относительно начала координат).

В каждой из приведенных групп различают импульсы синусоидальные, трапецеидальные, прямоугольные, треугольные и т.д. (рис. 1.31). Форма импульса и его полярность определяют величину эрозии электродов и стабильность процесса. Например, униполярные импульсы при определенной полярности электродов обеспечивают максимальную эрозию заготовки и минимальную эрозию электрода-инструмента.

Униполярные и пульсирующие импульсы используются в электроимпульсных установках, несимметричные знакопеременные – в электроискровых, симметричные знакопеременные и униполярные – в электроконтактных установках.

Форма импульсов тока и напряжения влияет на характеристики процесса, причем тем сильнее, чем короче импульс. Наиболее сильное влияние *форма импульсов оказывает на износ некоторых материалов электродов-инструментов.*

Для обеспечения непрерывности процесса электроэрозионной обработки необходимо подключить электрод-инструмент и заготовку к зажимам генератора импульсов, а также обеспечить удаление продуктов эрозии из зазора и восстанавливать взаимное положение электродов для возбуждения новых импульсных разрядов.

Основными параметрами периодических импульсных разрядов являются *скважность, длительность, амплитуда, частота следования*, которые определяют максимальную мощность и энергию импульса, мощность генератора, средние и действующие значения токов и напряжений. Указанные параметры характеризуют как генератор импульсов, так и физические процессы, происходящие в межэлектродном промежутке.

Скважностью импульсов называется соотношение периода повторения импульсов к их длительности:

$$q = \frac{T}{\tau_{II}} \geq 1, \quad (1.1)$$

где T – период повторения импульса; τ_{II} – длительность импульса.

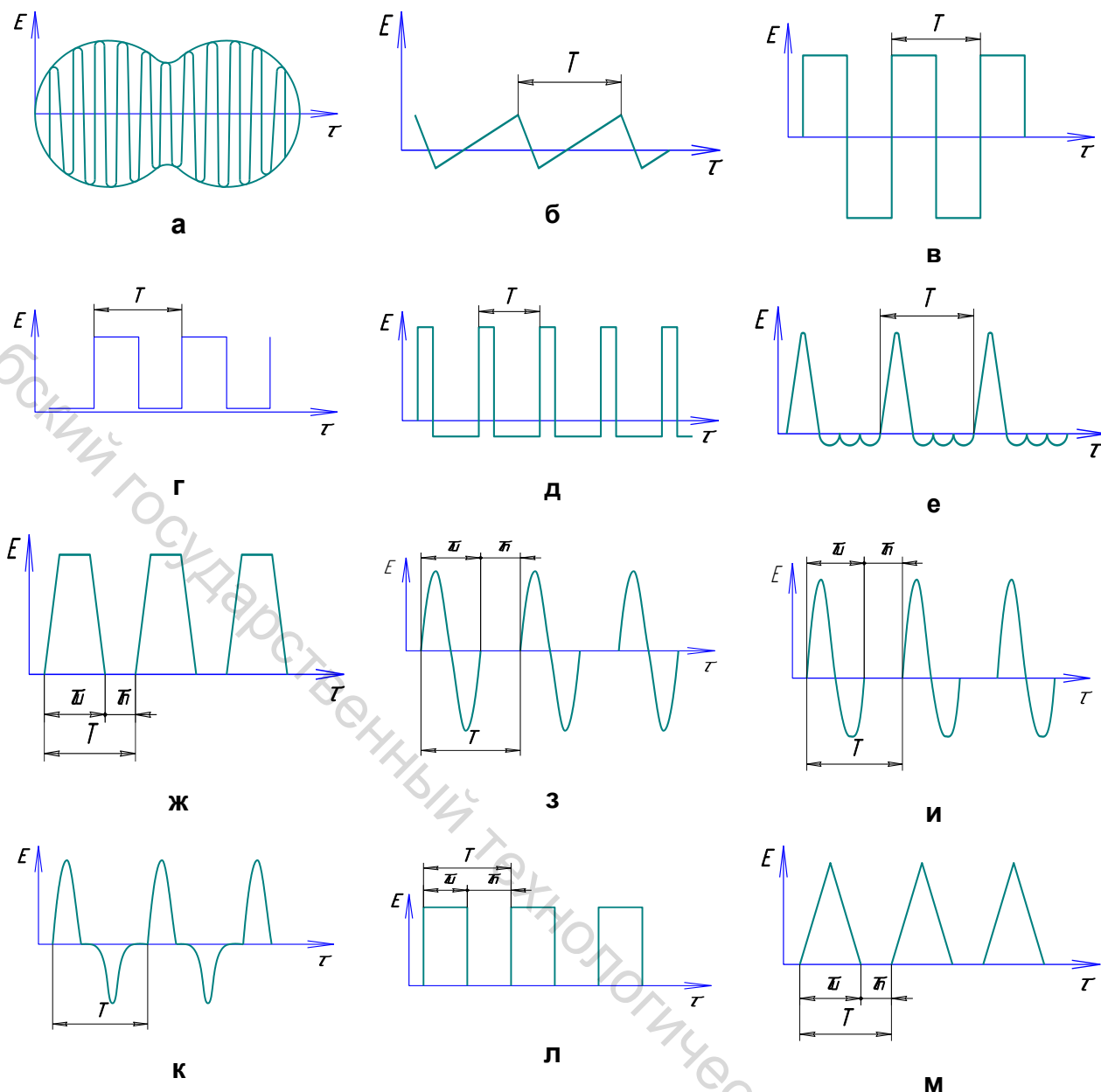


Рис. 1.31. Формы импульсов ЭДС (E):

а – высокочастотные импульсы, модулированные по синусоидальному закону, б – пилообразные импульсы, в – прямоугольные импульсы, г – прямоугольные импульсы с постоянной составляющей, д – несимметричные знакопеременные прямоугольные импульсы, е – несимметричные знакопеременные импульсы, ж – синусоидальные трапецеидальные унipoлярные импульсы, з – симметричные знакопеременные импульсы, и – несимметричные знакопеременные импульсы, к – знакопеременные симметричные несинусоидальные импульсы, л – синусоидальные прямоугольные унipoлярные импульсы, м – синусоидальные треугольные унipoлярные импульсы, E – напряжённость электрического поля, τ – время; T – период повторения импульсов, τ_u – длительность импульса, τ_n – время паузы

Различают скважность импульсов по Э.Д.С. и по току. В первом случае скважность характеризуется при холостом ходе генератора, во втором – при нагрузке. При определении скважности по току $\tau_{II} = \tau_{ПЕР}$, где $\tau_{ПЕР}$ – длительность переходного процесса в системе генератор – линия – нагрузка. Физически скважность импульсного процесса определяет возможность концентрации во времени больших энергий и мощностей в межэлектродном промежутке. При изменении скважности изменяется абсолютное значение мощности, воздействующей на электроды. Кроме этого, в большинстве случаев качественно изменяется физический механизм процесса удаления материала с поверхности заготовки и электрода-инструмента.

При значительном увеличении подводимой мощности тепловая энергия, определяющая съем материала, концентрируется не только на участках обработки, но и распространяется на прилегающие объемы. Это приводит к уменьшению к.п.д., потере точности, увеличению шероховатости, а в ряде случаев – прекращению возможности размерной обработки.

Диапазон скважностей для электроэрозионной обработки составляет:

- для электроискрового режима $q > 5 \div 10$,
- для электроимпульсного режима $q < 5$.

Длительность импульса τ_{II} определяется по времени действия импульса Э.Д.С. или тока (см. рис. 1.30). При анализе работы генератора импульсов длительность импульсов можно определять по моменту окончания импульса тока, а при исследовании процессов в межэлектродном промежутке необходимо учитывать не только длительность импульса тока, но длительность и характер явлений, вызванных этим импульсом.

Длительность импульса является одной из характеристик вида электрического разряда. Диапазон импульсов $\tau_{II} < 10^{-4}$ с используется при электроискровом режиме, а диапазон $\tau_{II} > 10^{-4}$ с – при электроимпульсном режиме электроэрозионной обработки.

Длительность импульса и скважность при постоянной частоте их следования связаны следующей зависимостью

$$\tau_{II} = \frac{1}{fq}, \quad (1.2)$$

где f – частота следования импульсов.

Приведенное соотношение показывает, чем меньше длительность импульса, тем больше концентрация энергии в зоне действия импульсного разряда. Для конкретных условий обработки должна выбираться такая длительность импульса, при которой соблюдаются необходимые требования по производительности, точности обработки и шероховатости поверхности.

Частотой импульсов называют величину, обратную периоду повторения импульса. Частота импульсов определяется их длительностью и скважностью

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{q\tau_{II}}. \quad (1.3)$$

Диапазон частот, при которых осуществляется электроэрозионная обработка, составляет примерно $0,5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^6$ имп./с.

Амплитуда импульсов тока при выполнении электроэрозионной обработки изменяются от долей до десятков тысяч ампер, амплитуды импульсов напряжения – от десятков до сотен вольт. Последняя часть условия дополняет условие локализации процесса во времени для выделения энергии импульса на малом участке поверхности заготовки: чем больше участок при заданной энергии импульса, тем меньше плотность энергии, меньше зона структурных изменений. При уменьшении элементарного участка приведенные характеристики изменяются в обратном направлении, что приводит к изменению механизма удаления материала с поверхности заготовки и электрода-инструмента.

1.5.3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

Процесс электроэрозионной обработки включает на различных стадиях следующие физические явления:

- электрическую эрозию материала заготовки и электрода-инструмента, имеющую две стороны – электрическую, в результате которой в рабочей среде возникает импульсный разряд, и тепловую, в результате которой выделяющаяся в канале разряда энергия превращается в тепло, расплавляющее элементарный объем материала заготовки;

- возбуждение в диэлектрической среде ударных волн, также имеющее две стороны: электрическую, связанную с возникновением канала разряда и выделением энергии, и гидродинамическую, связанную с распространением волн, выделением продуктов обработки и их удалением из межэлектродного зазора.

Электрические процессы проходят следующие стадии.

На начальной стадии наблюдается образование канала проводимости между наиболее близко расположенными участками электрода-инструмента и заготовки. В течение этой стадии при росте напряженности происходит вытягивание проводящих частиц вдоль силовых линий электрического поля. При критическом напряжении пробоя происходит скачкообразное нарушение прочности диэлектрика, частицы образуют токопроводящий мостик, который взрывается при возрастании проходящего через него импульса тока. Образовавшийся разрядный канал способен пропустить ток большой силы, т.к. его сопротивление резко падает. При ионизации наблюдается нагрев и увеличивается диаметр канала. Диаметр канала зависит от скорости выделения энергии в зазоре, а также от материала электродов.

Следующей фазой является образование искрового разряда. При осуществлении процессов черновой обработки, проводимых на электроимпульсных режимах, эта фаза является переходной между пробоем межэлектродного промежутка и установившимся дуговым разрядом. В некоторых случаях дуговой разряд может генерироваться, не проходя искровую стадию. В течение первой стадии имеет место падение напряжения на электродах.

В конце первой стадии происходит переход искрового разряда в стадию искродугового разряда. Стадия пробоя и неустойчивого разряда составляет примерно $10^{-8} - 10^{-7}$ с, искродуговая стадия – 10^{-4} с. В искродуговом разряде па-

раметры тока и напряжения составляют сотни ампер, десятки – до сотни вольт, а время действия оказывается достаточным для преобразования электрической энергии в тепловую. Однако малое время существования искрового разряда обеспечивает снятие лишь небольшого количества материала заготовки. Поэтому электроискровой режим применяется в процессах чистовой и доводочной обработки заготовок.

Вторая стадия – переход искродугового разряда в дуговой большой энергии и большого съема материала, в ходе которой одновременно протекают электрические процессы в дуге, тепловые – на электродах, а также гидродинамические – очищающие зазор между электродом-инструментом и заготовкой от шлама и газов.

Характерной чертой дугового разряда является неравномерное распределение электрического поля между электродом-инструментом и заготовкой. Скачки потенциала вблизи анода и катода обуславливаются существованием пространственных зарядов и условиями прохождения тока через границу металл-плазма. Причем падение напряжения на аноде меньше, чем на катоде, а в некоторых случаях падение напряжения может отсутствовать.

Наиболее характерными признаками дугового разряда являются устойчивость его параметров, малое падение напряжения, высокие плотности тока, наступающие по окончании переходных состояний, как, например, искрового разряда.

Кроме падения напряжения на аноде и катоде, часть напряжения ложится на канал разряда. Суммарное падение напряжения в зависимости от материалов электродов и рода диэлектрической жидкости может составлять десятки вольт. На долю катодного падения напряжения приходится около 10В, что является признаком дугового разряда. Анодное падение напряжения по некоторым данным достигает 12В. На долю канала разряда падение напряжения составляет от нескольких до десятка вольт. Падение напряжения в канале импульсного разряда определяет характер гидродинамических процессов, поскольку энергия, определяемая падением напряжения в канале разряда, передается рабочей жидкости и способствует образованию ударной волны так же, как и распространение самого канала разряда.

Дуговой разряд по сравнению с другими видами разряда имеет плотность тока на электродах до сотен тысяч ампер на квадратный миллиметр. Температура плазмы в канале разряда может достигать $5000 - 40000^{\circ} \text{C}$. Статическая вольт-амперная характеристика дугового разряда имеет падающий характер, т.е. с увеличением силы тока напряжение на электродах падает. Однако динамическая характеристика при высокочастотном разряде может быть и возрастающей.

Образовавшаяся дуга питается импульсным напряжением от генератора импульсов. Для возможных сочетаний материалов ЭИ и заготовки, рабочих сред и полярности включения электродов вольтамперная характеристика дугового разряда практически параллельна оси времени независимо от длительности импульса, напряжения источника питания и сопротивления в цепи генератора.

В конце разряда при напряжении меньшем величины рабочего напряжения разряд прекращается. Рабочее напряжение, при котором в МЭП образуется устойчивый дуговой разряд, определяется обрабатываемым материалом и материалом ЭИ, полярностью их включения, а также применяемой рабочей жидкостью.

Расплавление и удаление микропорций материала электродов приводит к увеличению расстояния между электродами и дальнейшему падению напряжения. Дуговой разряд прекращается и происходит восстановление электрической прочности рабочей жидкости. Создаются условия для возникновения новых разрядов.

1.5.4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОДАХ

Импульсный разряд при электроэрозионной обработке преобразует электрическую энергию, поступающую в межэлектродный промежуток, в тепловую. Объемная концентрация мощности в импульсном разряде при обработке может достигать 300 кВА/мм^3 при энергии до 30000 Дж/мм^3 . В основе электроэрозионной обработки лежит тепловое воздействие импульсного разряда на поверхность обрабатываемой заготовки. При этом скорость съема материала с электродов, механизм удаления продуктов эрозии, расход энергии и технологические характеристики процесса зависят от теплопроводности, теплоемкости, температуры плавления и испарения, удельного веса и удельного электрического сопротивления материалов электродов, рабочей среды, используемой при обработке, и ее характеристик, от продолжительности, амплитуды, частоты, скважности импульсов и других факторов.

Энергия, поступающая в межэлектродный промежуток и выделяющаяся в нем, распределяется между электродом-инструментом и заготовкой, и часть ее выносится из зоны обработки диэлектриком. Экспериментально доказано, что при осуществлении электроискровой обработки наибольший относительный съем материала наблюдается в том случае, когда электрод-инструмент является катодом, а заготовка – анодом, а при электроимпульсной обработке наибольший относительный съем металла имеет место в случае, когда электрод-инструмент является анодом, а заготовка – катодом, т.е. эффект электрической эрозии является полярным. Однако распределение энергии между электродами определяется не только полярностью их включения в электрическую цепь, но и зависит от материала электродов, вида рабочей жидкости, параметров и вида электрического разряда.

Тепло выделяется на электродах от объемных и поверхностных источников энергии. Объемные источники появляются в результате эффекта Джоуля-Ленца, вызванного протеканием тока в объеме электрода. При этом наибольшие температуры будут у поверхности электродов. Это связано с тем, что величина нагрева зависит от объемной плотности тока, а последняя резко уменьшается по мере удаления от места соприкосновения участка поверхности электрода с каналом разряда.

Поверхностные источники возникают вследствие соприкосновения ионизированной области канала разряда (плазмы) с электродами. Последующее

проникновение тепла вглубь электрода происходит вследствие теплопроводности. Величина съема металла с катода и анода зависит от теплофизических констант материалов электродов, которые определяют преобладание того или иного вида эрозии материала.

В общем случае необходимо выделить следующие физические механизмы протекания тепловых процессов на электродах.

Поверхность участка электрода в зоне действия импульсного разряда нагревается до температуры плавления и металл в капельном состоянии по мере его плавления непрерывно удаляется. Температурное поле будет перемещаться вглубь электрода. Приведенный процесс наиболее эффективен с энергетической точки зрения, т.к. подводимая энергия расходуется на нагрев удаляемого материала не выше температуры его плавления.

Поверхность электрода в месте возникновения канала разряда нагревается до температуры плавления, но металл удаляется одновременно в конце разряда. В этом случае металл перегревается в лунке несколько выше температуры плавления, однако не достигает температуры испарения. Приведенная схема удаления металла энергетически более затратная, чем рассмотренная выше.

Поверхность электрода в месте возникновения канала разряда может нагреваться до температуры испарения еще до окончания импульса, при этом происходит спокойное испарение металла, а капельный выброс отсутствует. Энергетические затраты на осуществление указанного процесса еще больше, чем приведенных выше.

Удаление материала электрода может происходить также как при его испарении, так частично и в жидком (капельном) состоянии.

При высокой скорости поступления энергии в МЭП в ряде случаев происходит взрывное испарение материала, при котором частично захватываются капельки расплавленного металла.

При прохождении импульсного разряда между электродами происходит нагрев и удаление части металла с их поверхностей. Полная величина эрозии может быть определена следующим образом:

$$m = m_0 n, \quad (1.4)$$

где m_0 - средняя величина эрозии;

n - число расплавленных друг за другом элементарных объемов металла за время действия единичного разряда.

Эрозионный след импульсного разряда на поверхности электрода имеет в общем случае вид эллипсоида вращения. Для полусферы как частного случая эллипсоида общий эрозионный эффект предлагается рассчитывать по формуле

$$m = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{B} \int_0^{\tau} I^2 dt \right)^{3/4} \delta n^{1/4}, \quad (1.5)$$

где I - величина тока в импульсном разряде;

τ - длительность импульса;

δ - плотность материала электрода;

$$B = \frac{(c\delta(1 + \alpha T_{пл}) \ln(1 + \alpha T_{пл}) + \alpha \lambda_{пл}) \delta}{0,24 \rho_0 \alpha (1 + \alpha T_{пл})}, \quad (1.6)$$

C - теплоемкость материала электрода;

$T_{пл}$ - температура плавления;

$\lambda_{пл}$ - удельная теплота плавления;

ρ_0 - удельное сопротивление при температуре 0°C ;

α - термический коэффициент сопротивления.

В случае, если вместо одного токопроводящего канала на поверхность электрода воздействует одновременно несколько таких каналов, в каждом из которых течет примерно одинаковый ток, причем каналы обеспечивают одинаковый эрозионный эффект n раз в течение всего времени разряда, полный эрозионный эффект может быть определен по аналогичной формуле.

Существует принципиальная возможность определения массы материала, удаленного с поверхности каждого электрода.

Реальный процесс съема материала определяют в зависимости от длительности и мощности, а также от энергии и длительности импульсного разряда. При постоянной мощности или энергии импульса съем металла при изменении длительности имеет максимум, смещающийся в сторону больших длительностей при росте мощности или энергии импульса. Так, при осуществлении электроимпульсного режима при энергии импульса 1 Дж максимум

имеет место при длительности около 500 мкс, а при энергии 7,5 Дж – при 650 мкс. При постоянной длительности съём увеличивается с увеличением энергии или мощности замедленно, а в дальнейшем достаточно быстро. Так, для длительности импульса около 1000 мкс и мощности около 1 кВт, съём материала составляет $5 \cdot 10^{-2}$ мм³, при увеличении мощности в 5 раз, съём растёт более чем в 10 раз. Это свидетельствует об изменении механизма удаления металла из канала разряда. Наряду с испарением материала имеет место капельный выброс продуктов из лунки. На характер удаления материала оказывает влияние скважность импульсных разрядов. Увеличение скважности при постоянной средней мощности создает условия для удаления материала из лунки преимущественно за счет его взрывного испарения. Этот механизм характерен для электроискрового режима электроэрозионной обработки. Температура в канале разряда такого режима достаточно высока (10000 – 11000⁰С), однако производительность невелика. В то же время при электроимпульсном режиме температура канала разряда может быть в пределах 4000 – 5000⁰С, однако съём материала намного выше. Это обстоятельство обусловлено увеличением времени съёма материала в течение времени обработки. Так, например, съём материала при электроимпульсном режиме происходит в течение 50% времени обработки, а при электроискровом – 5 – 10%. Кроме этого, при электроимпульсной обработке резко возрастает съём металла на один импульс, поскольку увеличивается энергия единичного импульса. Производительность возрастает также и вследствие увеличения эвакуационных способностей длительных импульсных разрядов. Режимом обработки определяется износ электрода-инструмента.

1.5.5. МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ

В результате действия импульсного разряда в зазор между электродами поступают частицы металла электрода-инструмента и заготовки, а также газообразные, твердые и жидкие продукты распада рабочей среды (для углеводородных жидкостей – непредельные и предельные углеводороды, водород, азот, окись углерода, углекислый газ, парафины, смолы, сажа и др.).

Удаление продуктов электроэрозионной обработки проходит в два этапа – из лунки после единичного или множественных разрядов и из межэлектродной полости. Выброс металла из лунки происходит во время разряда. От единичного разряда появляется большое количество частиц различного диаметра. Это связано с тем, что металл в зоне действия разрядного канала может существовать в различных фазах – в виде паров или в расплавленном состоянии. Под действием высоких давлений и температур в зоне разряда пары и часть расплавленного металла выдавливаются с поверхностей электродов и поступают в межэлектродный промежуток. Часть металла и его паров успевает застыть, взаимодействуя с рабочей жидкостью, поэтому образуются частицы правильной сферической формы. Наблюдаются также частицы неправильной формы, что является следствием соударения расплавленного металла с противоположным электродом, другими частицами, газовыми пузырьками и т.п. Размер частиц по крупности подчиняется закону статистического (нормального) распределения. С увеличением энергии импульса растет общее количество частиц, причем кривая распределения смещается в зону больших размеров. Одновременно растет и максимальный диаметр частиц. Например, при энергии 3 Дж только 8% объема материала лунки удаляется за счет частиц больших размеров, а при 45 Дж – более 75%, что указывает на различие в механизме удаления металла с поверхности электродов. При малых энергиях импульсов основная масса металла удаляется за счет испарения из лунки, поэтому в МЭП преобладают мелкие частицы. При больших энергиях металл удаляется в капельно-жидкой фазе, поэтому преобладают крупные частицы.

Для осуществления обработки необходимо обеспечить удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, что повышает стабильность электроэрозионной обработки. При этом механизм и характеристики процесса удаления продуктов из МЭП определяют зависимости между электрическими и

технологическими параметрами, характеризующими режимы обработки, и возможные пути интенсификации процесса.

Стабильность электрической эрозии при наличии небольшого количества эрозированных частиц в МЭП практически не нарушается. Однако при увеличении числа частиц, что может быть в случае затрудненного их отвода при обработке больших площадей, в межэлектродном промежутке возникают короткие замыкания.

Импульсный разряд сопровождается возбуждением ударной волны в диэлектрической жидкости. На границах канала разряда происходит пиролиз рабочей жидкости и образуются газообразные продукты ее распада. Энергия импульса в десятки тысяч джоулей в кубическом миллиметре, температура – десятки тысяч градусов и короткое время действия приводят к взрыву канала. Этот взрыв происходит между электродами, расположенными на расстоянии долей миллиметра друг от друга и разделенными диэлектрической жидкостью. Возникающие в межэлектродном промежутке газообразные полости распространяются с большой скоростью, перемещая продукты эрозии. Различают несколько видов ударных волн, которые образуются в зависимости от вида разряда. Первый вид разряда, при котором разрушается материал заготовки, является основным при электроэрозионной обработке. Таким разрядом перемещаются как частицы, образовавшиеся при состоявшемся импульсном разряде, так и те частицы, которые находятся на пути перемещения продуктов эрозии от предшествующих разрядов. Другие виды разрядов происходят в межэлектродном промежутке через эрозированные частицы материала ЭИ и заготовки и могут либо достичь основного материала, либо нет. Ударные волны от таких разрядов будут иметь различную интенсивность и соответственно по-разному удалять шлам. Для достижения максимально возможной при электрической эрозии производительности обработки необходимо, чтобы в межэлектродном промежутке протекали импульсные разряды первого вида. Другие виды разрядов возможно и способствуют улучшению условий удаления продуктов эрозии, однако производительность процесса в этом случае существенно уменьшается.

Начальные скорости частиц достигают нескольких километров в секунду и оказываются примерно пропорциональными энергии разряда. Изменение

мощности при постоянной энергии разряда мало сказывается на начальной скорости и энергии эвакуируемых частиц.

В зависимости от различных факторов (формы и размеров полости, энергии импульса и т.д.) эрозированные частицы могут описывать сложные траектории, попадать под действие других разрядов и, в конечном итоге, удаляться из межэлектродного промежутка.

Удаление газообразных продуктов происходит примерно так же, как и твердых частиц, однако скорость их перемещения значительно ниже. Наличие газов приводит к снижению производительности электроэрозионной обработки, т.к. число разрядов, непосредственно разрушающих материал заготовки, резко уменьшается. Разряды в газовых пузырях могут привести к приварке электродов, их зашлаковыванию, снижению энергии попутной ударной волны. Для удаления газов достаточно использовать подъемную силу, действующую на газовые пузырьки, а в некоторых случаях необходимо корректировать форму ЭИ, устраняя на них глухие полости.

Жидкие эрозированные составляющие перемешиваются с рабочей жидкостью и циркулируют вместе с ней, изменяя свойства за счет увеличения зольности, происходит также выгорание органического вещества углеводородных рабочих сред.

Поэтому для создания условий, обеспечивающих нормальный режим электроэрозионной обработки, необходимо использовать прокачку рабочей жидкости.

1.5.6. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ

Взаимосвязь позволяет объединить электрические параметры обработки с заданными чертежом детали размерами, формой и точностью их воспроизведения.

Первая группа характеристик получила название пространственной диаграммы «ток – площадь обработки – скорость съема».

В качестве определяющей величины принято среднее значение тока, проходящего через электроды при импульсном разряде. Следует заметить, что среднее значение тока весьма близко следует за средним значением мощности или энергии за один и тот же промежуток времени. Поэтому в технологических расчетах применяют приведенный параметр. Близкая к пропорциональной зависимость между энергией и скоростью съема может быть заменена зависимостью «ток – скорость съема».

Рассмотрим следующие группы зависимостей.

Первая из них – «скорость съема – площадь обработки» при постоянной энергии (токе, средней мощности) импульса, показана на рис. 1.32.

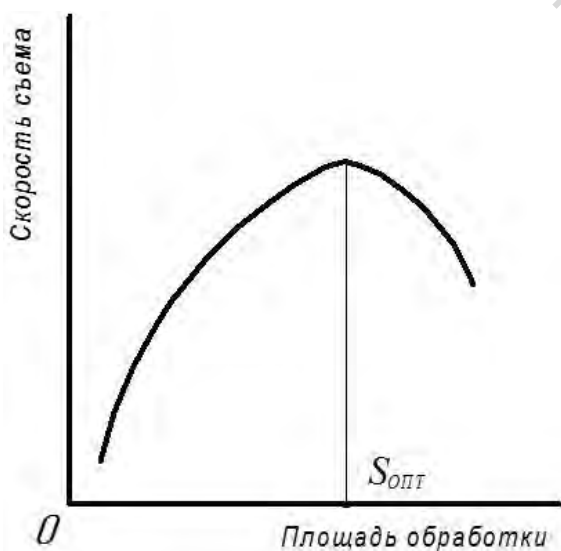


Рис. 1.32. Пример зависимости скорости съема от площади обработки

Энергии импульса (или среднему значению тока в нем) соответствует определенная энергия ударной волны газового пузыря и некоторая средняя длина пробега частицы, на которой расходуется полученная энергия. Эта средняя длина является функцией различных параметров (межэлектродного зазора, вида рабочей жидкости, материала электродов и некоторых других). Если приведенные параметры постоянны, то средняя длина увеличивается с ростом энергии импульса или тока в нем.

В случае, когда средняя длина пробега эрозированной частицы больше размера площадки, на которой происходит обработка, частица будет удалена за пределы зоны обработки. Следовательно, для заданной энергии импульса (тока в нем) можно найти такую площадь обработки ($S_{опт}$), при которой скорость съема будет максимальной. При уменьшении площади обработки на стабильность процесса

обработки начинает оказывать влияние газообразование при следовании разряда. При уменьшении площади наступит момент, когда газовый пузырь займет большую часть объема межэлектродного зазора. В результате этого существенно изменится ход электрической эрозии. Начнут возникать разряды в газовой среде, произойдет приваривание эрозированных частиц к электродам (шлакование), ухудшатся условия для их охлаждения, возможно оплавление ЭИ и заготовки. Кроме этого снизится энергия ударных волн, обеспечивающих вынос продуктов обработки. Поэтому скорость съема после достижения оптимальной величины при дальнейшем снижении площади обработки может начать падать.

Увеличение площади выше оптимального значения при одинаковой энергии импульса также постепенно приведет к падению скорости обработки. Это обстоятельство объясняется тем, что для удаления из зоны обработки частица должна получать дополнительную энергию от ударных волн других разрядов. Эта энергия будет возрастать с увеличением площади обработки.

Таким образом, приведенная выше зависимость имеет экстремум, по отношению к которому в диапазоне малых площадей обработки определяющим является механизм удаления газов из зоны обработки, а при больших площадях – механизм удаления твердых продуктов эрозии.

Вторая зависимость «скорость съема – ток импульса» при постоянной площади обработки. С ростом скорости съема удаление продуктов обработки будет вначале расти практически пропорционально энергии импульса. При определенном значении тока в импульсе рост скорости съема замедлится вследствие заполнения межэлектродного зазора газами. При больших значениях энергии импульса наступит момент, когда газы практически полностью вытеснят рабочую жидкость. Скорость съема станет равной нулю, но и выделение газов прекратится. Рабочая жидкость заполнит межэлектродный промежуток и снова начнется процесс съема, а также выделения газов. При больших величинах энергии импульса и малых площадях обработки возникают автоколебания процесса, для которых характерно циклическое изменение скорости съема. Таким образом, приведенная зависимость также имеет экстремальный характер и описывается кривой, аналогичной той, которая показана на рис. 1.32. Ось абсцисс для графика зависимости в этом случае обозначают «ток» или «энергия импульса». Совокупность всех зави-

симостей и составляет пространственную диаграмму «скорость съема – ток – площадь обработки».

Важной геометрической характеристикой, определяющей скорость съема, является кроме площади обработки форма обрабатываемой полости и ее глубина. Физический механизм влияния приведенных характеристик на скорость удаления продуктов обработки описывается приведенными выше процессами, т.е. газообразованием, с одной стороны, и выделением твердых продуктов обработки, с другой стороны. Поэтому электрические характеристики режимов обработки необходимо выбирать с учетом определенной формы поверхности и ее глубины.

Витебский государственный технологический университет

1.5.7. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАБОТКИ

Для осуществления процесса обработки с высокой скоростью съема при оптимальном удельном расходе энергии, минимальной величине зоны структурных изменений, заданных параметрах шероховатости поверхности необходимо подобрать оптимальные параметры импульсов. Наиболее удобно выразить основные параметры, определяющие механизм съема материала, через частоту импульсов и скважность. Известно, что длительность импульсов пропорциональна частоте их следования и скважности. Пусть средняя мощность P_{CP} , вводимая в МЭП, постоянна. Тогда амплитуда импульса тока I_m , максимальная мощность P_m и энергия импульса W могут быть выражены через частоту импульсов f и скважность q

$$I_m = k_1 q, \quad (1.7)$$

$$P_m = P_{CP} q, \quad (1.8)$$

$$W = P_{CP} q t_u = \frac{P_{CP}}{f}, \quad (1.9)$$

где k_1 – некоторая постоянная для данного процесса величина;

P_{CP} – средняя мощность за период одного импульса; $P_{CP} = U_{Sm} I_{cp}$, где U_{Sm} – напряжение на эрозионном промежутке при максимуме тока; I_{cp} – среднее значение тока;

t_u – длительность импульса.

Из приведенных зависимостей следует, что амплитуда импульса тока и максимальная мощность импульса пропорциональны их скважности, а энергия импульса обратно пропорциональна частоте следования импульсных разрядов.

Следует заметить, что среднее значение тока близко следует за средним значением энергии и мощности импульса, отнесенных к одному и тому же интервалу времени. Среднее значение тока может легко быть измерено и контролироваться с помощью приборов, поэтому в технологических расчетах используется именно этот параметр.

Рассмотрим общий ход частотных характеристик процесса электроэрозионной обработки.

Верхний предел производительности для определенной частоты ограничивается возможностью удаления эрозированных частиц соответствующих размеров. Чем выше частота и меньше энергия импульса, тем меньше энергия возникающих газовых пузырей и соответственно хуже эвакуационная способность импульсного

разряда. Следовательно, для каждой выбранной частоты и скважности существует определенный предел скорости съема. Указанному пределу должны соответствовать определенная амплитуда импульса напряжения, оптимальная площадь обработки, соответствующая рабочая жидкость и соответствующие условия удаления продуктов эрозии. В общем случае производительность с ростом частоты падает. Такой же вид имеет частотная характеристика скорости съема для различных значений скважности: чем меньше скважность, тем при большей частоте достигается предельная скорость съема. С увеличением амплитуды импульса напряжения возрастает межэлектродный зазор, создаются условия для удаления большего количества эрозированного материала, поэтому скорость съема также возрастает. Примерно также влияют и другие факторы (вибрация, прокачка диэлектрика, релаксация электрода и т.д.).

С ростом частоты должна увеличиваться энергоемкость процесса. Возможны следующие варианты. Во-первых, рост частоты сопровождается увеличением скважности для создания условий, при которых основная масса материала удаляется за счет взрывного испарения. Энергоемкость возрастает вследствие осуществления более энергоемкого процесса. Во-вторых, рост частоты сопровождается уменьшением скважности. Энергоемкость в этом случае возрастает за счет большей степени диспергирования металла: при капельном выбросе – вследствие дробления на более мелкие капли, при испарении также имеет место большее распыление металла. В конечном итоге процесс пойдет по первому направлению, но при большей частоте.

Изменение частотных характеристик происходит вследствие изменения механизма удаления металла с поверхности заготовки и изменения процесса удаления образовавшихся частиц ударными волнами. На высоких частотах преобладает испарение материала, при низких частотах следования импульсов наблюдается капельное удаление материала. При промежуточных значениях частот имеет место сочетание различных механизмов удаления материала с поверхности электродов. При высоких частотах следования уменьшается число рабочих импульсных разрядов, обеспечивающих как удаление материала с заготовки, так и из межэлектродного промежутка, а количество аномальных разрядов возрастает.

Значительное увеличение частоты следования импульсных разрядов приводит к ухудшению условий удаления эрозированных частиц, т.к. ограничиваются скорости механического движения частиц ударными волнами малой мощности. Значительное уменьшение частоты импульсов приводит к нагреву и даже рас-

плавлению не только малых объемов, но и большей части заготовки. Минимальной частоте 50 имп/с соответствует скорость съема до 25000 мм³/мин. Для увеличения скорости съема следует применять еще более низкие частоты, что существенно усложняет конструкцию генераторов импульсных разрядов.

В соответствии с частотной характеристикой устанавливаются номинальные значения частоты и токов генератора импульсов. Однако полученные данные обычно имеют приближенные значения и подлежат уточнению в процессе обработки.

Отдельные области частотных характеристик характеризуют определенные виды электроэрозионной обработки.

При следовании искровых разрядов, характеризующихся импульсами малой длительности (до 10 мкс), высоких частот (сотни кГц – 2 МГц) и больших скважностей (более 10) преобладает механизм взрывного испарения и выброса металла в межэлектродный промежуток. В этом случае имеет место разрушение анода, обеспечивается повышенная обрабатываемость металлокерамических материалов, однако обрабатываемость сталей, наоборот, ухудшается. Такой способ называют высокочастотной электроискровой обработкой.

Область импульсных разрядов средней мощности длительностью 100 – 400 мкс при средних частотах следования (тысячи импульсов в секунду) и скважности 15 – 30 называют традиционной электроискровой обработкой. Импульсные разряды заканчиваются искродуговой стадией, в ходе которой наблюдается как взрывное, так и спокойное испарение металла.

Искровые разряды малой мощности при высокой частоте их следования применяются преимущественно при выполнении высокоточных работ и при доводке деталей.

Электроискровой режим осуществляется при использовании знакопеременных импульсов напряжения и тока при прямой полярности включения электрода инструмента и заготовки.

Электроимпульсный режим электроэрозионной обработки характеризуется следующими диапазонами частот, скважностей и длительностей импульсных разрядов. Различают низко- (150 – 300 имп/с), средне- (> 300 до 1000 имп/с) и высокочастотную (> 1000 имп/с) обработку. Скважность при этом не превышает 3 – 5. Обработка производится на обратной полярности включения электродов при использовании униполярных импульсов напряжения и тока. Удаление материала заготовки производится за счет возбуждения между электродами дуговых разрядов.

При низкочастотной электроимпульсной обработке за время действия импульса в пределах 10 – 12000 мкс в зону обработки подводится большая энергия, благодаря чему обеспечивается скорость съема 15000 – 25000 мм³/мин с поверхностей площадью в сотни тысяч квадратных миллиметров.

Для обработки средних по размерам деталей при площадях обработки до нескольких десятков тысяч квадратных миллиметров используются среднечастотные режимы. Время импульсного разряда примерно составляет 1000 мкс, а скорость съема достигает 5000 мм³/мин.

Высокочастотная обработка производится в диапазоне до 66000 имп/с и обеспечивает высокое качество поверхностей, обработанных предварительно на средне- и низкочастотных электроимпульсных режимах. Для финишных операций уменьшают энергию импульсов увеличением частоты их следования. При этом вводимая в зону обработки мощность будет примерно той же, что и на грубых режимах обработки, а скорость съема будет уменьшаться из-за увеличения энергоемкости процесса на более высокой частоте. Причем износ электрода-инструмента при выполнении обработки на электроимпульсных режимах будет ниже, чем при использовании электроискровых режимов обработки. Кроме этого, имеет место преимущественно капельный механизм образования продуктов эрозии.

Генераторы импульсов современных электроэрозионных станков обеспечивают выполнение технологического процесса обработки на черновых операциях при максимальном съеме материала и сравнительно невысоком качестве поверхностей и последующую чистовую обработку для доводки шероховатости поверхностей до заданных значений при максимально возможной производительности. Возможность варьирования скважности импульсов при одинаковой частоте их следования, а также плавное регулирование, как частоты, так и скважности обеспечивает возможность обработки заготовок из твердых сплавов, сталей и других материалов. Причем обработку твердых сплавов целесообразно выполнять при высокой частоте следования коротких импульсных разрядов, а обработку стальных заготовок – при высокочастотной электроимпульсной обработке разрядами малой скважности.

1.6. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКОВ

Для успешного использования возможностей электроэрозионной обработки и рационального ее применения остановимся на конструктивном исполнении электроэрозионных установок.

Электрическая эрозия используется при обработке заготовок на различных электроэрозионных станках: вырезных и для объемного копирования, включая координатно-прошивочные и для контурной обработки заготовок. Схемы станков приведены ниже.

Разделение на приведенные группы связано с особенностями выполняемых работ. При *координатно-прошивочной обработке* получают обычно сквозные и глухие отверстия постоянного поперечного сечения. Форма ЭИ ограничена образующей профиля обрабатываемого отверстия. Для выполнения обработки необходимо, чтобы ЭИ совершал поступательное перемещение в вертикальном направлении по отношению к заготовке для прошивания отверстия на требуемую глубину. Обработка производится обычно в ванне с рабочей жидкостью. При прошивании большого количества отверстий, в ряде случаев различного поперечного сечения, электрод-инструмент или заготовку перемещают относительно друг друга, а замена ЭИ обеспечивается автоматическим сменщиком из магазина электродов. В конструкции прошивочных станков от соответствующих приводов (регуляторов) обеспечивается точная вертикальная подача ЭИ для прошивания отверстия и точные установочные перемещения ЭИ относительно заготовки (либо наоборот).

Станки *для объемного копирования* используются при обработке в заготовках полостей сложной формы. Конструкции станков для объемного копирования и прошивочных аналогичны. Станок обычно имеет вертикально расположенный шпиндель для установки электродов-инструментов, снабжен ванной для заполнения рабочей жидкостью и осуществления обработки, генератором импульсов, системой ЧПУ. В электроэрозионных станках электроды-инструменты кроме вертикальной подачи для прошивания полости могут получать орбитальное движение относительно обрабатываемого контура в заготовке. Такое движение улучшает условия протекания электрической эрозии материала заготовки и совместно с прокачкой облегчает удаление продуктов обработки из МЭП. Конструкции станков для объемного копирования более сложные, чем координатно-прошивочных. Причем встречаются станки, в которых орбитальное движение осуществляется с помощью механических пере-

дач. В современных станках для объемного копирования орбитальное движение задается с помощью системы числового программного управления.

При *контурной обработке* обеспечивается получение в заготовках полостей и углублений сложной формы с помощью инструментов простой геометрической формы (стержней и трубок постоянного поперечного сечения). Конструктивное исполнение оборудования для контурной обработки обеспечивает перемещение электрода-инструмента простой формы по сложной траектории. Поверхность после обработки получается в результате сложения простых движений, выполняемых в пространстве электродом-инструментом и заготовкой. Последние получают соответствующие перемещения от приводов, которые в современных электроэрозионных станках управляются устройствами ЧПУ. Встречаются также электроэрозионные станки, в которых движение электрода-инструмента обеспечивается с помощью механических передач, гидравлических, электромагнитных и других устройств. Например, универсальные электроэрозионные головки обеспечивают передачу электроду-инструменту до одиннадцати различных движений. Однако парк станочного оборудования, в котором перемещение ЭИ и заготовки осуществляется с помощью кинематических передач, гидроцилиндров, гидродвигателей и т.п. за последнее время значительно сократился. На смену таким станкам приходят высокопроизводительные электроэрозионные системы с ЧПУ, в которых количество промежуточных кинематических передач минимально либо они вообще отсутствуют.

В конструкциях станков для контурной обработки используются модернизированные механизмы электроэрозионных вырезных и координатно-прошивочных установок. В ряде случаев для осуществления контурной обработки можно использовать станки для объемного копирования, система ЧПУ которых обеспечивает одновременное перемещение ЭИ и заготовки по трем и более направлениям.

Конструкции вырезных станков предусматривают наличие механизмов перемотки проволочного ЭИ через зону обработки, а также механизмы перемещения ЭИ и заготовки друг относительно друга. Вырезные станки должны обладать высокой жесткостью узлов и точностью приводов, поскольку электродом-инструментом при обработке в зависимости от области применения является проволока диаметром 0,03 – 0,36 мм.

1.6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Все станки для электроэрозионной обработки делятся на две большие группы:

- станки для объемного копирования (включая координатно-прошивочные и контурной обработки);
- проволочно-вырезные станки.

В пределах каждой группы можно выделить более мелкие подгруппы станков, предназначенные для выполнения определенного вида работ. Например, отдельную подгруппу координатно-прошивочных станков образуют установки для прошивания отверстий («супердрели» по японской и «дрели» по швейцарской классификации), в другую подгруппу входят 4-х – 8-ми координатные станки для контурной обработки материалов и т.д.

В зависимости от размеров обрабатываемых деталей электроэрозионные станки делятся на следующие подгруппы:

- станки для обработки мелких деталей в электронной промышленности, точном машиностроении и приборостроении, часовой промышленности и др. отраслях;
- классические станки для обработки деталей в станкостроении, машиностроении, инструментальном производстве и др., когда вес детали колеблется в пределах от нескольких килограммов до сотен килограммов;
- крупногабаритные станки для обработки деталей весом 3 – 20 т и более, при получении которых могут использоваться электроды весом более 5 т (при прошивочной обработке).

Станки для объемного копирования и вырезные установки в зависимости от достигаемой точности обработки делятся на следующие типы:

- крупногабаритные электроэрозионные установки нормальной точности;
- установки повышенной точности;
- прецизионные электроэрозионные установки.

Станки нормальной точности при обработке заготовок в стандартных рабочих жидкостях обеспечивают точность размеров на детали в пределах 5 – 10 мкм и параметры шероховатости поверхностей 0,7 – 0,8 мкм за 2 – 3 прохода. Точность, которую обеспечивают при обработке станки повышенной точно-

сти, составляет ± 3 мкм, а шероховатость поверхностей – 0,6 – 0,8 мкм. Прецизионные электроэрозионные установки обеспечивают точность обработки в пределах $\pm 1,5$ мкм. Шероховатость поверхностей колеблется в пределах 0,17 – 0,7 мкм. При использовании специальных сред параметры шероховатости поверхностей деталей, обработанных на приведенном выше оборудовании, составляют от 0,04 до 0,08 мкм.

Некоторые производители электроэрозионного оборудования для удовлетворения многократно возросших потребностей микроэлектроники предлагают вырезные станки (например, модели EXL100L – Sodick), обеспечивающие точность обработки в пределах $\pm 0,5$ мкм, которые не относятся к приведенной выше классификации.

В зависимости от применяемых диэлектрических жидкостей оборудование для электроэрозионной обработки подразделяется на следующие группы:

- станки, на которых обработка осуществляется в воде;
- станки, обеспечивающие обработку в углеводородном диэлектрике;
- станки, оснащенные комбинированными диэлектрическими системами.

Следует отметить, что при обработке деталей в воде достигается значительно бóльшая, по сравнению с обработкой в углеводородных диэлектриках, производительность обработки. Однако при использовании углеводородных сред можно добиться более высокого качества обработанной поверхности.

В зависимости от способа подачи рабочей жидкости в МЭП применяют электроэрозионные установки, работающие:

- при погружении детали и инструмента в диэлектрическую жидкость (станки с ванной для погружной обработки);
- при струйной промывке диэлектрика через межэлектродный промежуток;
- при отсосе продуктов обработки из зоны обработки.

1.6.2. ПРОИЗВОДИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Практически все мировое производство электроэрозионных прошивочных и вырезных станков с многофункциональными системами ЧПУ сосредоточено на предприятиях-изготовителях Японии и Швейцарии (примерно 50% и 37% соответственно). Основную долю электроэрозионных станков производят и потребляют предприятия Японии. Объемы производства и продаж электроэрозионного оборудования в самой Японии распределяются следующим образом (по данным на 12.2004 г.). Наибольшее количество станков производит Sodick Co., Ltd (около 49,2%), Mitsubishi (около 29,4%), Makino (около 10,1%), Fanuc (около 8,5%), Seibu (2,8%). Из перечисленных предприятий фирма Sodick производит в настоящее время, начиная с 2002 года, станки только с линейными двигателями, обеспечивая тем самым наиболее высокую точность обработки и качество поверхностей.

Наибольшее количество оборудования среди европейских производителей выпускают фирмы Charmilles Technologies (около 15% всего мирового производства ЭЭ станков) и AGIE (примерно 10%), входящие в настоящее время в состав концерна Georg Fischer.

Наряду с дорогостоящими электроэрозионными системами с ЧПУ, которые производят в настоящее время японские и швейцарские производители, первенство в производстве относительно недорогих электроэрозионных станков в последние годы занимает Тайвань и Китай. На Тайване производством электроэрозионных станков заняты в основном несколько ведущих фирм, например, CHMER EDM, Maximart, OSCARMAX и др. Кроме этого, на территории Китая, Таиланда и ряда других стран располагаются представительства по производству электроэрозионных станков известных фирм, например, Sodick, Charmilles Technologies и др.

Электроэрозионные прошивочные станки производят также в Германии, США, Южной Корее, Индии, проволочно-вырезное оборудование – в Южной Корее и Индии.

В государствах бывшего СССР в настоящее время электроэрозионные станки производятся только в России, причем в большинстве случаев – небольшими партиями или по единичным заказам. Первый в мире вырезной станок был изготовлен в г. Фрязино Московской области (начало 1954 г.). В настоящее время НПП «ЭЛС-Исток» (г. Фрязино) выпускает вырезные станки не-

большими сериями. Электроэрозионные станки производят также в Смоленске, Троицке, Санкт-Петербурге (в основном для объемного копирования) и Ульяновске (вырезные станки).

Значительная часть произведенного электроэрозионного оборудования используется в Японии, где сосредоточена почти половина всего мирового производства инструментально-штамповой оснастки. Второй по емкости – рынок США, затем, с небольшим отставанием, – рынок Западной Европы.

На предприятиях России, Беларуси и др. государств бывшего СССР применяется как отечественное, так и зарубежное электроэрозионное оборудование, в основном японских, швейцарских производителей (Jарах, Sodick, Charmilles Technologies, AGIE), а в последнее время выросли поставки оборудования из Китая и Тайваня, в том числе на предприятия республики. Например, на электроэрозионном участке ЗАО «Атлант» (МЗХ) применяется швейцарское электроэрозионное оборудование «AGIE», инструментальным производством РУПП «Витязь» используется оборудование Charmilles Technologies, закуплены 2 электроэрозионных станка на Тайване, «Брестским электротехническим заводом» приобретен пока единственный в Беларуси электроэрозионный станок фирмы Sodick. Другие предприятия республики также проводят модернизацию и замену парка устаревшего электроэрозионного оборудования.

1.6.3. УСТРОЙСТВО ВЫРЕЗНЫХ СТАНКОВ

Вырезные станки обеспечивают обработку в заготовках из сталей (конструкционных закаленных, нержавеющей, теплоустойчивых и др.) и твердых сплавов контуров различной сложности непрофилированным электродом-инструментом – проволокой. Для осуществления обработки необходимо обеспечить перематку проволоки через зону обработки и относительное перемещение ЭИ и заготовки для образования заданного контура.

Схема вырезного станка современной конструкции показана на рис.1.33.

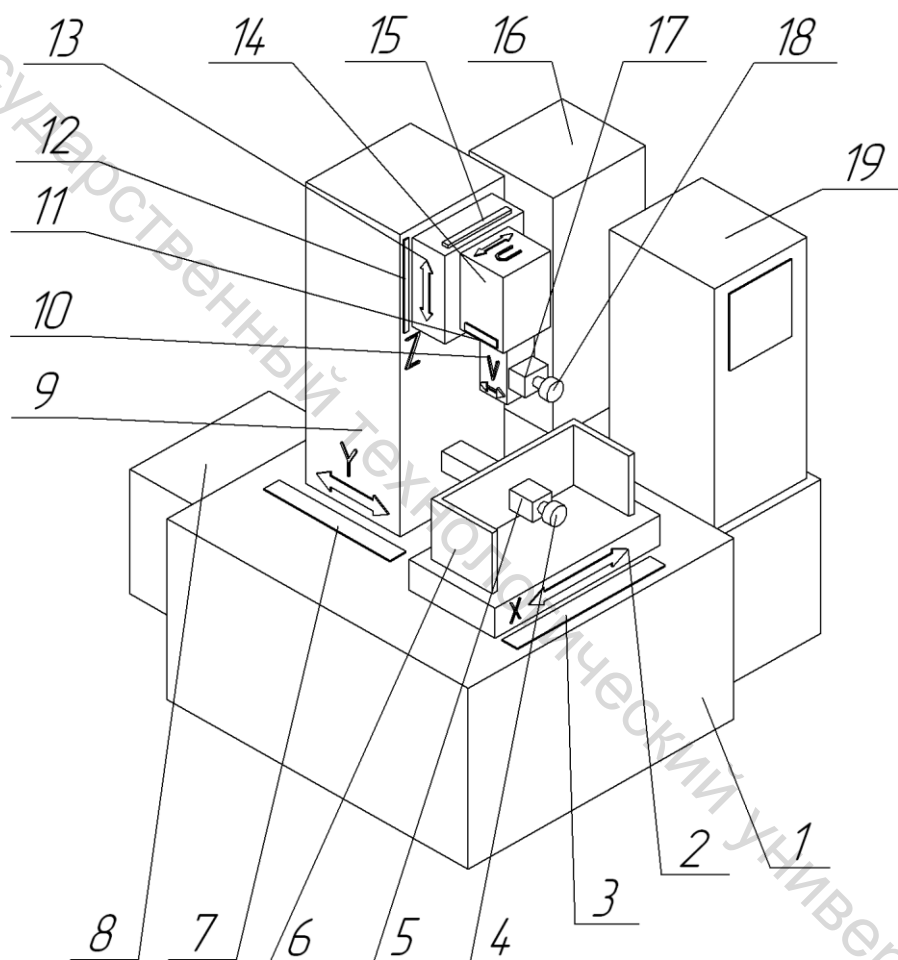


Рис.1.33. Схема вырезного станка:

1 – станина, 2 – стол, 3 – измерительная линейка оси X, 4 – керамический шкив, 5 – нижний кронштейн, 6 – ванна для диэлектрика, 7 – измерительная линейка оси Y, 8 – бак для диэлектрика, 9 – колонна, 10 – поперечные салазки, 11 – измерительная линейка оси V, 12 - измерительная линейка оси Z, 13 – ползун, 14 – каретка, 15 – измерительная линейка оси U, 16 – генератор импульсов, 17 – верхний кронштейн, 18 – керамический шкив, 19 – стойка ЧПУ

На станине станка 1 размещен с возможностью продольного перемещения стол 2 с закрепленной на нем ванной 6 (передняя стенка ванны условно не показана) для заполнения диэлектрической жидкостью при погружной обработке. Диэлектрик подается в ванну станка из бака 8. На направляющих станины с возможностью поперечного перемещения относительно стола станка установлена колонна 9. По вертикальным направляющим колонны перемещается ползун 13. По горизонтальным направляющим ползуна в продольном направлении перемещается каретка 14, относительно которой в поперечном направлении перемещаются салазки 10. На колонне и подвижных салазках станка закреплены соответственно верхний кронштейн 17 и нижний кронштейн 5 с блоками верхней и нижней проводки проволоки. Перемотка проволоки производится через верхний 18 и нижний 4 керамические шкивы и направляющие (фильеры). Кроме них в тракт перемотки проволоки входят также натяжные ролики, направляющие ролики или втулки (твердосплавные, сапфировые, алмазные), токоподводящие щетки или ролики и т.п. Положение частей станка относительно друг друга контролируется с помощью датчиков линейного положения и измерительных линеек 3, 7, 11, 12, 15 – при использовании в приводах регуляторов перемещений линейных двигателей, двигателей постоянного или переменного тока с механическими передачами. Кроме датчиков линейного положения могут применяться датчики углового положения (энкодеры), которые устанавливаются непосредственно на валах двигателей постоянного или переменного тока, либо на винтах передач винт-гайка качения, передающих движения от электродвигателей на стол, колонну, ползун или другие подвижные части станка. Энергетические и электрические параметры электрической эрозии задаются от генератора импульсов 16, управление которым, как и перемещением подвижных частей станка, осуществляется с помощью устройства числового программного управления (микропроцессора), расположенного в стойке 19.

Для стабильного протекания вырезной обработки необходимо, чтобы ЭИ в виде проволоки перемещался через зону обработки с определенной скоростью по заданной траектории. Для этих целей используются механизмы подачи, натяжения и перемотки проволоки. Механизмы подачи осуществляют перемещение проволочного электрода-инструмента по траектории, которая соответствует вырезаемому контуру с учетом межэлектродного зазора. Механизм натяжения обеспечивает прямолинейность проволоки при ее перемеще-

нии через зону обработки. Перемотка с катушки на катушку обеспечивает непрерывность процесса обработки и удаляет из зоны резания эрозированную проволоку. От точности подачи ЭИ, постоянства скорости перемотки, поддержания натяжения в заданных пределах, степени очистки рабочей жидкости, энергии разрядов и стабильности электрической эрозии зависит точность электроэрозионного вырезания.

На рис.1.34 показан тракт проводки проволоки, используемый в вырезных станках (например, Sodick).

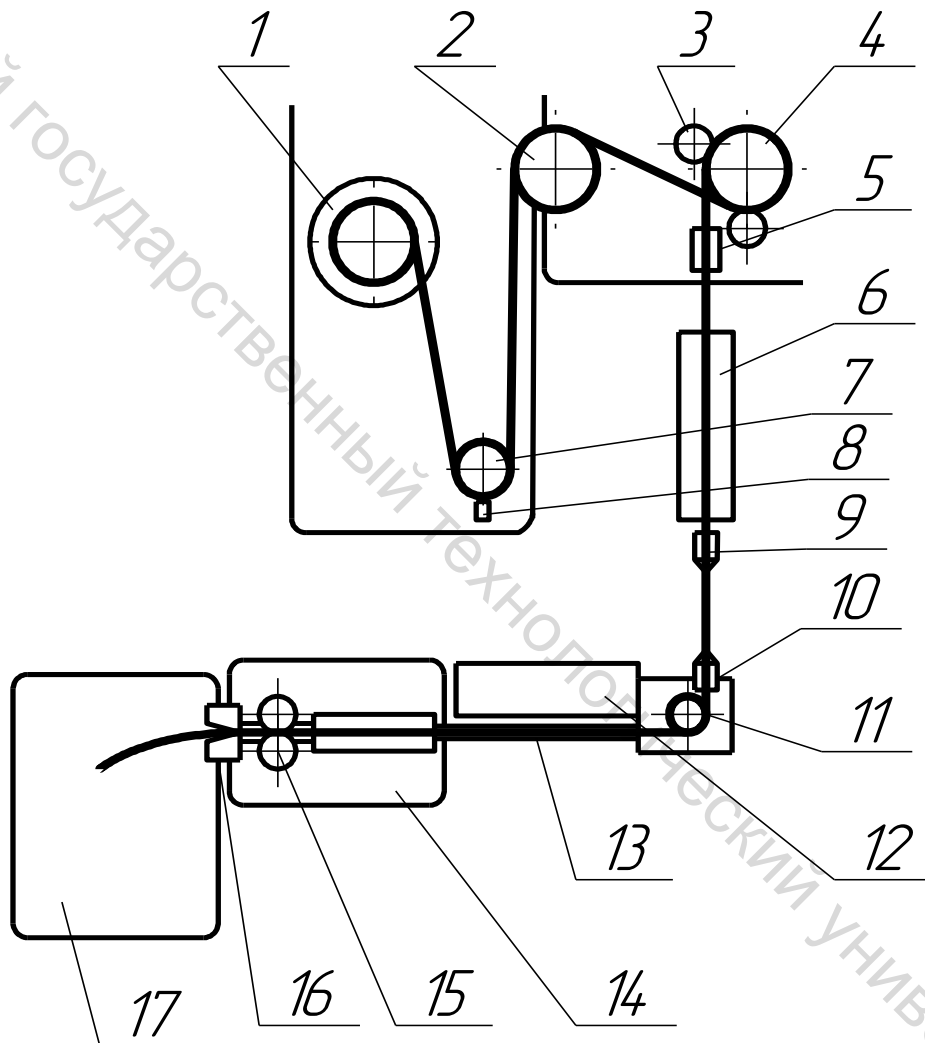


Рис.1.4. Проводка проволоки:

- 1 – катушка с проволокой; 2 – керамический шкив; 3 – прижимной ролик; 4 – натяжной ролик; 5 – керамическая направляющая; 6 – механизм автоматической заправки проволоки; 7 – керамический шкив; 8 – датчик обрыва проволоки; 9 – верхний блок алмазной направляющей; 10 – нижний блок алмазной направляющей; 11 – керамический шкив; 12 – нижний кронштейн станка; 13 – акриловая трубка; 14 – заборное всасывающее устройство; 15 – керамические ролики; 16 – выпускное сопло; 17 – корзина.

Проволока с катушки (бобины) 1 через керамические шкивы 7 и 2 огибает натяжной ролик 4, к которому прижимается керамическим прижимным роликом 3. С натяжного ролика через керамическую направляющую 5 проволока поступает в механизм автоматической заправки 6. Механизм состоит из трубчатой направляющей и устройства обработки конца проволоки. Из механизма автоматической заправки проволока подается в верхний 9 и нижний 10 блоки алмазных направляющих (фильер), затем огибает керамический шкив 11, установленный на нижнем кронштейне станка 12, и через акриловую трубку 13 заборным всасывающим устройством 14 удаляется керамическими роликами 15 через выпускное сопло 16 в корзину 17. Благодаря использованию керамических роликов выполнена гальваническая развязка тракта подачи и натяжения проволоки с другими частями станка. Удаление проволоки производится керамическими роликами через трубку, в которую проволока при автоматической заправке затягивается потоком воды, создаваемым всасывающим заборным устройством. В конструкцию блока верхней и нижней направляющей проволоки входят контактные щетки, которые обеспечивают подачу питания на проволочный ЭИ. Для регулировки токоподвода используется специальный инструмент регулировки контактной щетки. Материалом направляющих служат технические алмазы или сапфиры, обладающие высокой твердостью и износостойкостью.

Для выполнения вырезной обработки подвижным частям станка от приводов задаются перемещения по определенным направлениям. Для отсчета перемещений применяется система полярных или прямоугольных координат (на плоскости или в пространстве). Перемещения могут быть заданы в различных плоскостях. В горизонтальной плоскости, проходящей через поверхность стола, наиболее часто задаются перемещения по двум взаимно перпендикулярным направлениям X и Y. При этом перемещение стола с заготовкой осуществляется в направлении X (вправо отсчитываются положительные значения текущих координат), а колонна станка обеспечивает перемещение нижней направляющей проволоки с ЭИ по направлению Y (перемещения от рабочего считаются положительными). В некоторых вырезных станках стол одновременно получает перемещения по направлениям X и Y. Ползун станка перемещается в вертикальной плоскости по направлению Z. При перемещении ползуна вверх координата Z принимается положительной. Перемещение по Z чаще всего является установочным и необходимо для обработки различ-

ных по высоте заготовок. На уровне верхней направляющей проволоки каретка и поперечные салазки получают перемещения в двух взаимно перпендикулярных направлениях U и V. Перемещения по соответствующим координатным направлениям обычно задаются и одновременно контролируются системой ЧПУ. В вырезном станке приведенной конструкции возможно управление движением ЭИ и заготовки при обработке одновременно по пяти координатам. При этом на уровне верхнего кронштейна проводки проволоки обеспечивается вырезание одного контура, а на уровне нижнего кронштейна проводки – обрабатывается другой, иногда отличный от первого, контур. Программирование обработки осуществляется на периферийном оборудовании либо непосредственно на станке через взаимосвязанные точки, принадлежащие соответственно верхнему и нижнему вырезаемым контурам.

В конструкциях некоторых вырезных станков часто используются специальные индексные (управляемые) столы, которые обеспечивают поворот заготовки на некоторый угол относительно оси X или Y (такую координату называют A) и непрерывное вращение заготовки относительно оси Z (координата W).

Вырезные станки приведенной конструкции обладают самыми широкими технологическими возможностями и чаще всего используются при обработке матриц штамповой оснастки, форм литьевых машин, валков волочильных станов, нарезании зубчатых колес и т.п. Применяются также вырезные станки, в которых обработка осуществляется не в ванне с диэлектриком, а электрод-инструмент находится в струе рабочей жидкости, подаваемой в зону обработки под определенным давлением (0,1 – 8 МПа). Конструктивно такие станки (AGIE и др. фирм) отличаются отсутствием ванны для погружения электрода-инструмента и заготовки при обработке. Остальные узлы имеют практически одинаковую конструкцию с рассмотренной выше.

1.6.4. УСТРОЙСТВО СТАНКОВ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО КОПИРОВАНИЯ

Станки для объемного копирования применяются при обработке в заготовках отверстий постоянного сечения либо полостей сложной формы. При этом ряд фирм-производителей электроэрозионного оборудования производят специализированные станки для обработки отверстий. Этим оборудованием комплектуются обычно участки электроэрозионных вырезных установок, поскольку для вырезания контура необходимо вначале получить в заготовке отверстие для заправки проволоки через весь тракт проводки. Установки для объемного копирования называют также координатно-прошивочными станками или установками для контурной обработки.

Схема станка для объемного копирования приведена на рис.1.35.

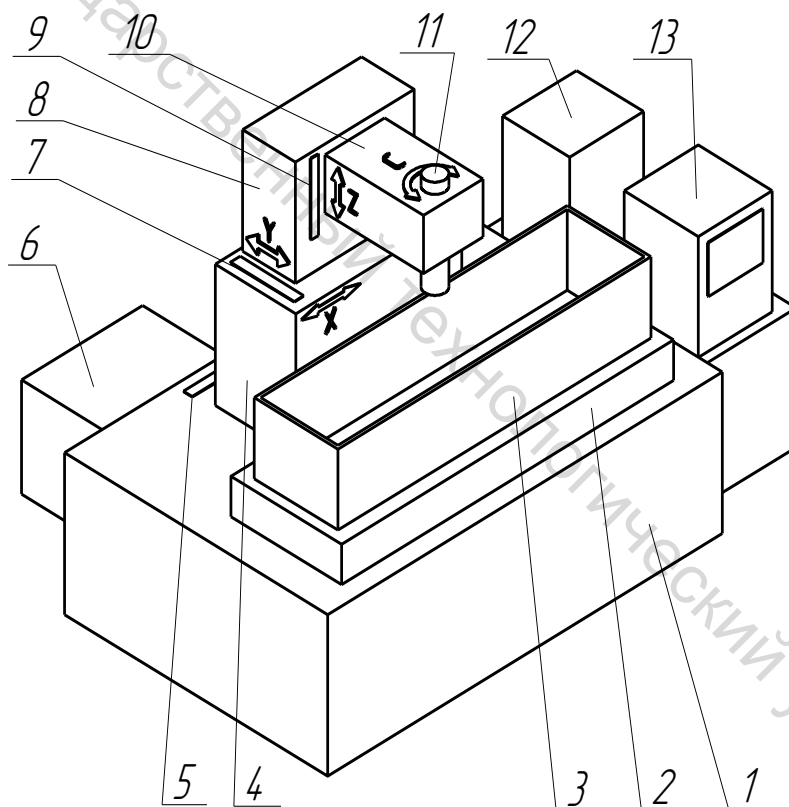


Рис.1.5. Схема прошивочного станка

Рис.1.35. Схема станка для объемного копирования:

1 – станина, 2 – стол, 3 – ванна для диэлектрика, 4 – колонна, 5 – измерительная линейка оси X, 6 – ванна для диэлектрика, 7 – измерительная линейка оси Y, 8 – поперечные салазки, 9 – измерительная линейка оси Z, 10 – ползун, 11 – шпindel, 12 – генератор импульсов, 13 – устройство ЧПУ

На станине станка 1 размещен стол 2, на котором закреплена ванна 3 для погружной обработки заготовок. На станине установлена с возможностью продольного перемещения колонна 4. На поперечных направляющих колонны размещены салазки 8. На вертикальных направляющих салазок размещен ползун 10, в котором смонтирован шпиндель 11. Контроль положения подвижных частей станка обеспечивается с помощью датчиков и измерительных линеек 5, 7, 9 либо датчиков углового положения (энкодеров), как и на вырезных станках. Хранение рабочей жидкости и ее подача в ванну осуществляется из бака 6. Задание энергетических и электрических режимов обработки обеспечивает от генератора импульсов 12. Управление генератором импульсов и подвижными частями станка осуществляется с помощью системы числового управления, размещенной в стойке 13.

В прошивочном станке перемещение подвижных частей осуществляется по следующим направлениям: продольное перемещение колонны относительно стола станка – по X, поперечное перемещение поперечных салазок – по Y, вертикальное перемещение ползуна – по Z перпендикулярно поверхности стола станка, и поворот шпинделя на фиксированный угол либо непрерывное вращение относительно оси Z. Повороту шпинделя соответствует направление C. В конструкциях некоторых станков шпиндель может располагаться в дополнительной головке и получать прямолинейное перемещение относительно ползуна в вертикальном направлении от соответствующего привода (по координате W). Непрерывное вращение шпинделя станка может осуществляться с различной частотой – от 0 до 3000 мин⁻¹. Наличие приведенных движений обеспечивает обработку отверстий и полостей в различных частях заготовки, закрепленной на столе станка в ванне с диэлектрической жидкостью, а также задание орбитальных осцилляций при объемном копировании полостей сложной формы. Поворот шпинделя на фиксированный угол необходим для прошивания отверстий, расположенных, например, на заданной концентрической окружности, а непрерывное вращение шпинделя применяется при прошивании круглых отверстий для уменьшения влияния погрешности изготовления ЭИ на точность обработки.

В зависимости от типоразмера станка его конструктивное исполнение может отличаться от приведенной выше схемы. В некоторых станках переме-

щение по направлениям (координатам) X и Y получает стол станка с закрепленной на нем ванной, а ползун вместе со шпинделем и электродом-инструментом перемещается в вертикальном направлении, причем ЭИ может одновременно вращаться.

Для увеличения технических возможностей станки для объемного копирования, как и вырезные станки, могут дополнительно оснащаться управляемыми от ЧПУ столами, позволяющими проводить обработку сложных пространственных поверхностей (например, лопаток турбин, насосов, гребных винтов и т.п.). Столы обеспечивают перемещение заготовок по дополнительным направлениям. При этом от ЧПУ возможно одновременное управление перемещением подвижных частей станка по 5 и более координатным направлениям (в некоторых станках до 8 – 12). Установки для объемного копирования, в которых возможно одновременное управление перемещением ЭИ и заготовки по нескольким направлениям, обеспечивают выполнение контурной обработки заготовок последовательными проходами с помощью электродов-инструментов простой формы. Такой вид обработки значительно сокращает затраты на изготовление электродов-инструментов сложной формы, которые традиционно применялись и до настоящего времени применяются при объемном копировании.

1.6.5. ПРИВОДЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКОВ

К числу основных узлов электроэрозионных станков относятся их приводы (регуляторы), которые обеспечивают выполнение команд устройств программного управления в соответствии с данными, полученными в результате эрозии материала заготовки. Приводы поддерживают межэлектродный промежуток в пределах, обеспечивающих стабильное протекание электрической эрозии. При оптимальной величине МЭП гарантируется протекание нормального режима электроэрозионной обработки, при котором скорость съема материала заготовки будет максимальной, а обработанная поверхность приобретет заданные параметры шероховатости.

Для перемещения рабочих органов электроэрозионных станков применялись приводы следующих конструкций: электрические (соленоидного типа, электродинамические и др.), электрогидравлические, гидравлические и другие типы регуляторов. Источниками движения таких регуляторов служили двигатели постоянного, переменного тока и шаговые двигатели, гидродвигатели и гидроцилиндры. В качестве параметров регулирования для управления перечисленными устройствами применялись и до настоящего времени используются такие параметры, которые косвенно отображают величину МЭП и изменяются вместе с ним, например, напряжение (среднее, максимальное) на межэлектродном промежутке и ток, проходящий через него, другие величины. Каждый из приведенных параметров с достаточной точностью характеризует зазор между электродами и состояние МЭП в установившемся режиме работы.

В дальнейшем были разработаны приводы, в которых последним звеном, обеспечивающим перемещение исполнительных органов (столов, ползунов и др. частей), служили шариковые винтовые передачи (ШВП). Основной частью такой передачи является винт и гайка, собранные в зацепление друг с другом посредством тел качения (шариков).

На рис. 1.36 показан привод с ШВП, широко используемый в различных конструкциях станков (вырезных и прошивочных японского, швейцарского, российского производства и др.). В некоторых приводах вместо ременной передачи используют червячные редукторы. В состав привода входят: двигатель постоянного тока 4, ременная передача 3 с зубчатым ремнем, причем один из шкивов ременной передачи – гладкий, что обеспечивает проскальзывание

ремня при изменении направления движения. В таких приводах применяются, кроме двигателей постоянного тока, шаговые двигатели переменного тока. Вращательное движение передается на передачу винт-гайка 1 – 2 (ШВП, тела качения не показаны) с механической защитой от соударений (пружинным креплением 7 гайки ШВП и концевым выключателем 6). Для определения текущего положения рабочего органа используются датчики (чаще всего, оптические или лазерные датчики и измерительные линейки) или датчики углового положения (энкодеры). Управление двигателем постоянного тока осуществляется по команде ЧПУ с помощью блока управления 5.

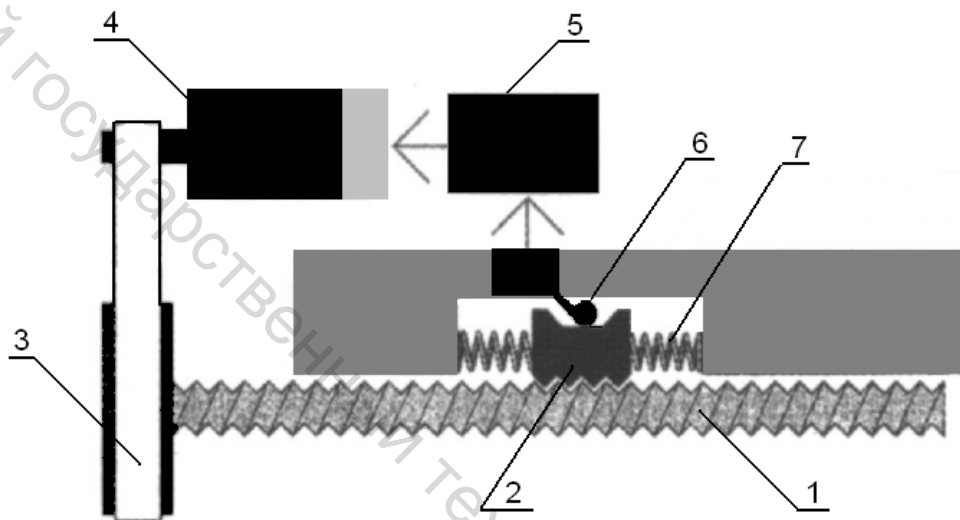


Рис. 1.36. Привод с шариковой винтовой и ременной передачами:
1 – винт ходовой, 2 – гайка, 3 – ременная передача, 4 – двигатель постоянного тока, 5 – блок управления, 6 – конечный выключатель, 7 – пружина крепления гайки ШВП

Появление высокомоментных двигателей постоянного тока, выдающих при одинаковой мощности с обычным двигателем постоянного тока более высокий крутящий момент, позволило устранить промежуточное звено, связывающее электродвигатель с рабочим органом, – передачу с зубчатым ремнем. В результате был разработан непосредственный привод с ШВП, показанный на рис. 1.37, у которого вал электродвигателя 3 соединен с винтом 1 ШВП. Винт перемещает гайку 2, закрепленную на подвижной части станка (столе). Текущее положение рабочего органа может определяться как с помощью датчиков углового положения на оси двигателя либо на винте шариковой винтовой передачи, так и измерительной линейкой 5 и датчиком 6. Устранение промежуточного звена (ременной передачи) позволило повысить точность перемещения рабочих органов станка и, соответственно, точность обработки при ис-

пользовании одних и тех же рабочих жидкостей, параметров импульсных разрядов и т.п.

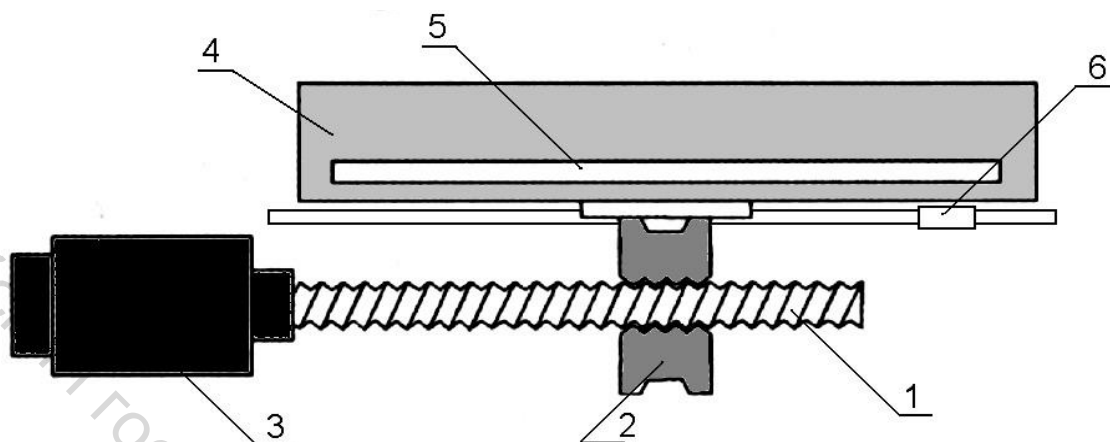


Рис. 1.37. Непосредственный привод с ШВП:

1 – ходовой винт, 2 – гайка, 3 – электродвигатель, 4 – стол, 5 – измерительная линейка, 6 – датчик

Применение непосредственного привода позволило создать конструкции, более стойкие к температурным и нагрузочным деформациям в течение всего периода эксплуатации станков, и повысить точность обработки по сравнению с приводами предыдущего поколения. В конструкциях станков начали использоваться детали из керамики, например, тела качения – ролики 3, закрепленные в сепараторе 2 и перемещающиеся по направляющим станины 1 (рис. 1.38). В ряде конструкций станков начали применяться керамические аэростатические направляющие стола. На рис. 1.39 показана схема стола станка, который перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно неподвижных частей по направляющим на воздушной подушке. Стрелками показано направление подачи воздуха к направляющим. Благодаря новым материалам, конструктивным особенностям станков, а также точным измерительным датчикам повысилась точность обработки до 10 – 20 мкм, что особенно важно при производстве мелких деталей сложной формы.

Однако приводы с шариковыми передачами имеют недостатки, связанные с их конструкцией. Главной причиной конструктивных изъянов является многоступенчатость преобразования энергии и движений: электрический импульс – электромагнитное поле – поворот ротора электродвигателя – работа ременной передачи – поворот винта – перемещение гайки ШВП – линейное перемещение.

Невысокая скорость перемещения, значительная инерционность, отсутствие равномерности хода не позволяют достаточно быстро и точно поддерживать величину межэлектродного зазора.

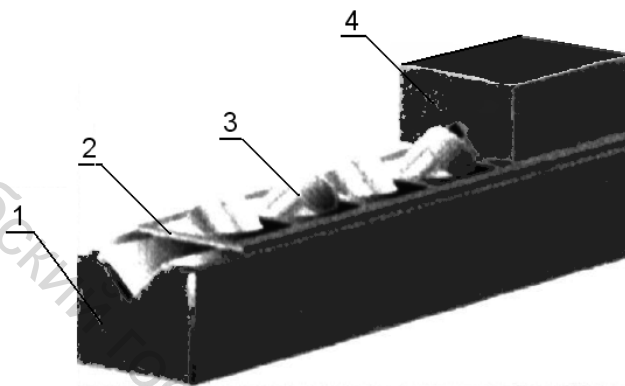


Рис.1.38. Керамические направляющие электроэрозионных станков:
1 – станина, 2 – сепаратор, 3 – тела качения, 4 – подвижная часть (стол)

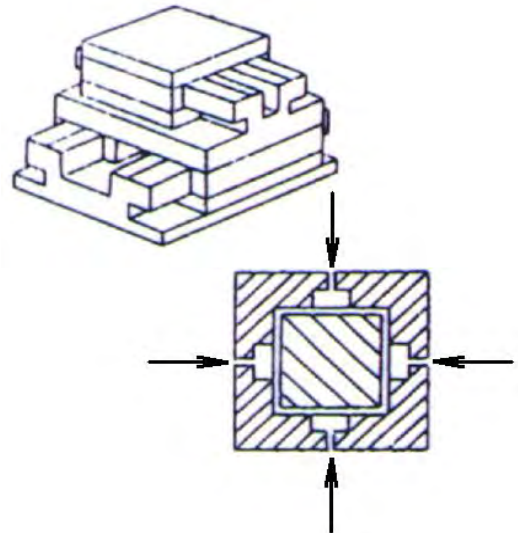


Рис.1.39. Схема аэростатических направляющих электроэрозионного станка

В результате при изменении направления движения в момент реверса имеет место мертвый ход (рис. 1.40). Основной причиной возникновения мертвого хода являются люфты в передающем механизме, что приводит к погрешностям обработки, показанным на рис. 1.41. Причина люфтов – зазоры в передающем механизме, без которых ни один из таких механизмов не работает. Очевидно, что наличие ременной передачи в приводе создает больше люфтов, чем непосредственный привод. Наряду с люфтами при реверсе винта ШВП имеет место задержка подачи из-за трения в передающем механизме (рис. 1.42). Вследствие задержки подачи при изменении направления движения круглограмма будет иметь следующий вид (рис. 1.43). Одним из путей существенного повышения производительности и точности электроэрозионной обработки явилось создание и внедрение в конструкции станков новых типов приводов и новых материалов, используемых для изготовления основных деталей (столов, ползунов, направляющих на них, тел качения и т.д.).

В качестве новых материалов для изготовления деталей электроэрозионных станков широко применяются, например, полимербетон (станины станков Charmilles, Швейцария), керамика FeineXSera (столы и др. детали, Япония) и т.д. Использование керамических и полимерных материалов снижа-

ет температуру нагрева подвижных частей станков. Так нагрев ШВП при длительной работе достигает $+15^{\circ}\text{C}$ к температуре помещения. Для керамических материалов изменение температуры не превышает $+2^{\circ}\text{C}$ (при выполнении особо точных работ – $+0,2^{\circ}\text{C}$).

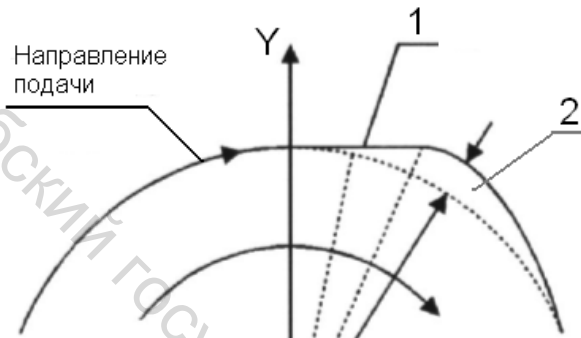


Рис. 1.40. Мёртвый ход при изменении направления: 1 – задержка подачи в момент реверса винта ШВП, 2 – величина погрешности

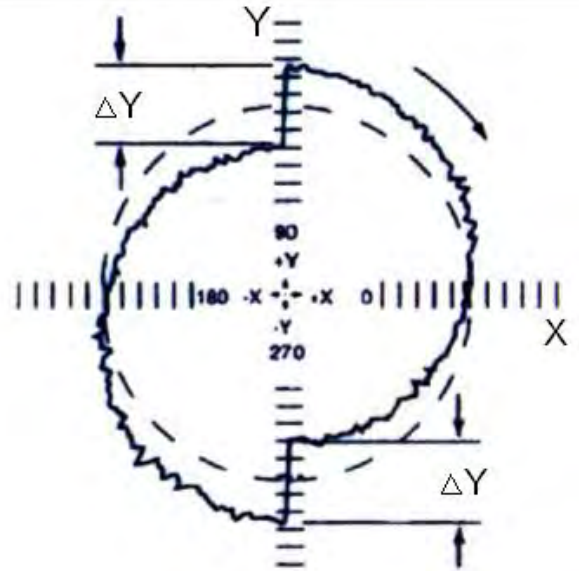


Рис. 1.41. Круглограмма мёртвого хода по оси Y

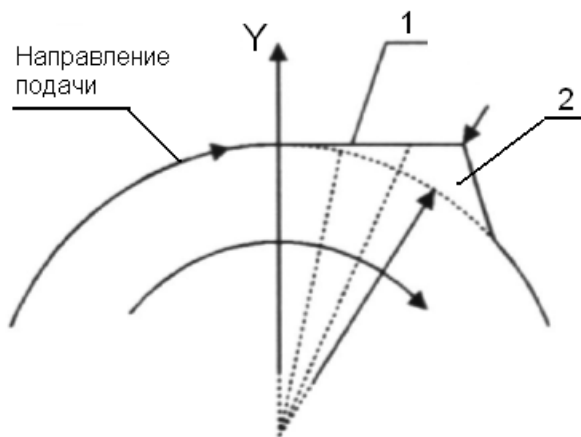


Рис. 1.42. Скачкообразная подача при изменении направления перемещения: 1 – задержка подачи по оси Y в момент реверса винта ШВП, 2 – величина скачкообразной подачи

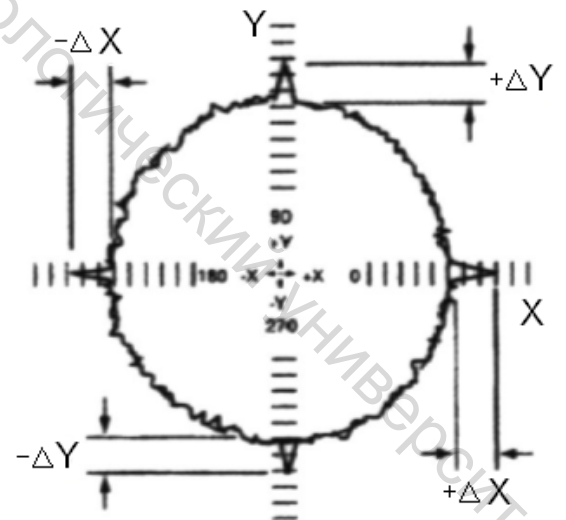


Рис. 1.43. Круглограмма обрабатываемого отверстия со скачками подачи

Применение керамических материалов в конструкциях позволяет не только существенно снизить температурные деформации в зоне электрической эрозии, но и сохранить производительность обработки в течение всего срока эксплуатации электроэрозионных станков.

На рис. 1.44 приведены данные о потере производительности в электроэрозионных станках с металлическими несущими конструкциями и станков с несущими конструкциями и деталями из керамики за 6 лет эксплуатации (по данным Sodick).

Поскольку инструментом при электроэрозионной обработке являются импульсные разряды, их характеристики в большой степени зависят от величины межэлектродного зазора. При оптимальном зазоре обеспечиваются оптимальные режимы обработки и, в конечном итоге, максимальная производительность. В идеальном случае в любой момент времени при обработке зазор должен быть равен командному значению, задаваемому ЧПУ.

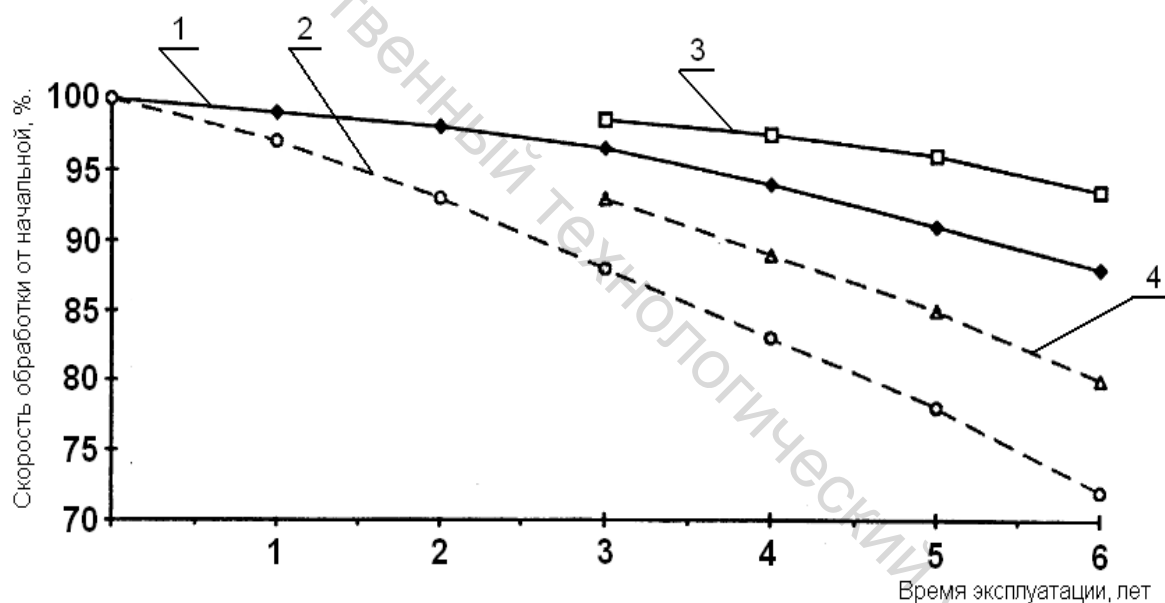


Рис.1.44. Зависимость производительности электроэрозионных станков при различных сроках эксплуатации: 1- для станков с керамическими несущими конструкциями, 2 – для станков с металлическими несущими конструкциями, 3 – то же, что 1 после чистки и замены токоподводов, 4 – то же, что и 2, после чистки и замены токоподводов

По мере увеличения межэлектродного зазора число искровых разрядов уменьшается. При определенной величине зазора обработка останавливается. При уменьшении межэлектродного зазора эффективность разрядов также падает, т.к. увеличивается количество газов в межэлектродном промежутке,

уменьшается количество импульсных разрядов, удаляющих материал, возрастает износ электрода, поскольку при определенной величине зазора возникают короткие замыкания электродов. Последнее обстоятельство приводит к порче детали и электрода. Большую часть времени станки с ШВП работают при фактических зазорах больших или меньших оптимального, от чего падает скорость обработки.

Приводы с шариковыми винтовыми передачами из-за значительных потерь в механизмах преобразования вращательного движения в линейное, а также инерционности, обеспечивают перемещение инструмента и заготовки в заданные точки с точностью приблизительно в 0,01 мм. Поэтому, несмотря на наличие адаптивных систем управления, станок сравнительно малую часть времени работает с оптимальными межэлектродными зазорами и, соответственно, в оптимальных электрических и энергетических режимах, обеспечивающих максимальную производительность.

Одним из направлений, позволяющих вывести электроэрозионную обработку на достижение более высоких показателей по точности и производительности, чем существовавшие до недавнего времени, является применение линейных двигателей. Применять линейные двигатели в электроэрозионных станках впервые начали в Японии на основе исследований, которые велись многие десятилетия с целью создания сверхскоростного поезда.

Однако известные конструкции не подходили для решения задач в области электроэрозионной обработки. Двигатели электроэрозионных станков должны обеспечивать достаточное тяговое усилие при большом ускорении, иметь малое энергопотребление, надежно работать в течение срока эксплуатации электроэрозионного станка, не выделять избыточное тепло и быть недорогими.

Экспериментально был найден оптимальный материал постоянных магнитов и угол их установки по отношению к электромагнитным катушкам (переменным магнитам), была создана эффективная масляная система охлаждения (по типу систем охлаждения высоковольтных трансформаторов). Для минимизации тепловых деформаций основные детали, которые перемещаются с помощью линейных двигателей, изготовлены из керамики с малым коэффициентом линейного расширения.

Линейные двигатели по сравнению с другими типами приводов обладают следующим преимуществами:

- высокими скоростями сервоподач – до 36 м/мин (600 мм/с), а в специальных устройствах – до 830 м/мин при ускорении до 1,89G (в ряде случаев до 32G) при значительной длине перемещений – от 100 до 2220 мм и более с тяговым усилием до 2000 кг;

- малой инерционностью;

- минимальными термическими деформациями частей станка благодаря применению термостойких керамических материалов и новых систем охлаждения;

- простотой конструкции вследствие отсутствия передаточных механизмов и устройств компенсации погрешностей изготовления деталей приводов.

Приведенные достоинства позволяют несколько упростить конструкцию приводов станков для объемного копирования (координатно-прошивочных) и проволочно-вырезных.

Линейный привод, схема которого показана на рис. 1.45, достаточно прост и включает всего три части: стационарный электромагнитный статор 1, подвижный «ротор» 2 с постоянными магнитами, закрепленный на столе 3 (или керамической каретке), измерительную линейку 4 и датчик положения 5.

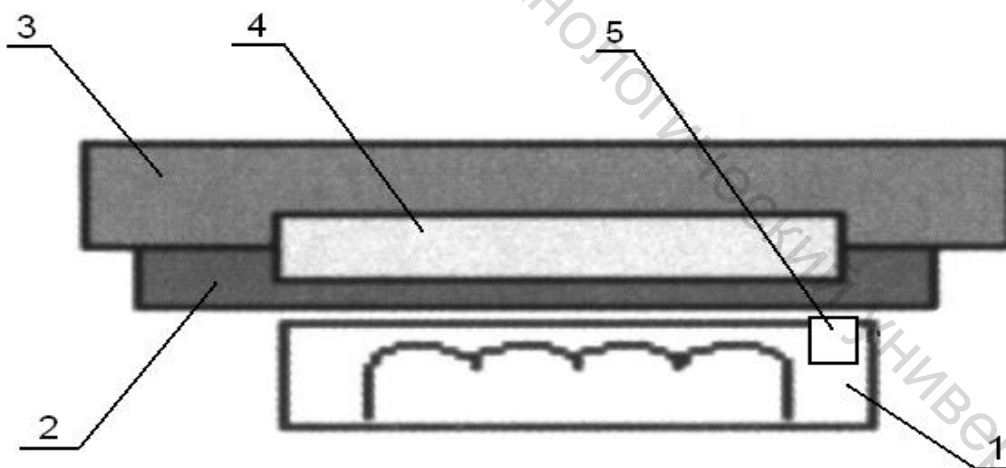


Рис. 1.45. Схема линейного привода:

1 – неподвижная обмотка с постоянными магнитами, 2 – постоянные магниты и подвижная обмотка, 3 – стол, 4 – измерительная линейка, 5 – датчик

Перемещение подвижной части относительно неподвижной осуществляется при взаимодействии электрических и магнитных полей, которые возникают в обмотках после подачи питающего напряжения. Отсутствуют передаточные механизмы, ШВП, зубчатые или ременные передачи. При поломке

конструкция является весьма ремонтпригодной. Двигатель меняется не весь, а по частям, что дешевле.

Наиболее ответственным узлом координатно-прошивочных установок являются шпиндельные узлы. На рис. 1.46 показана схема сдвоенного линейного привода оси Z, на рис. 1.47 – фотография каретки вертикального ползуна. Перемещение электрода-инструмента 4 осуществляется с помощью каретки 3, на которой закреплены постоянные магниты 5. Общий вид электромагнитов статора показан на рис. 1.48. Каретка начнет перемещаться в том случае, когда на обмотку электромагнитов ползуна 2 будет подано напряжение. Подача напряжения контролируется системой ЧПУ в соответствии с условиями обработки. При стабильной эрозии материала заготовки электрод-инструмент будет подаваться вглубь заготовки. В противном случае осуществляется его перемещение в обратном направлении для промывки МЭП. В случае возникновения аварийной ситуации, связанной с прекращением подачи напряжения, автоматически срабатывает механизм противовеса 7 и перемещение каретки стопорится. Механизм противовеса растормаживают сжатым воздухом. Для надежной работы привода перемещения ЭИ используют сдвоенную конструкцию линейного двигателя.

Точность перемещений исполнительных органов с помощью линейных двигателей при использовании лазерных датчиков положения оценивается в микрометры и доли микрометра. Благодаря этому в ходе сервоподдачи поддерживается практически идеальный межэлектродный зазор, а в каждом рабочем цикле – оптимальные энергетические режимы, что обеспечивает рост скорости и качества обработки. При использовании линейных двигателей рост производительности проволоочно-вырезной обработки по сравнению с вырезанием на станках с ШВП может достигать 40 - 100% в зависимости от степени сложности работ; рост производительности координатно-прошивочной обработки и объемного копирования – 50 – 200%. Причем имеет место значительная экономия расходных материалов, т.к. на обработку заготовок затрачивается меньшее количество проходов.

На рис. 1.49 приведено сравнение затрат времени на обработку детали на электроэрозионных станках с обычным приводом с ШВП и линейным приводом. Применение линейных приводов позволяет сократить длительность как грубой, так и чистовой обработки в 1,5 – 2 раза.

Наблюдается также и рост точности обработки, поскольку линейные двигатели обеспечивают точное перемещение рабочих органов за счет дискретности приводов в 0,1 мкм, а контроль таких перемещений осуществляют с помощью измерительных датчиков (точность оптических линеек Sony – 0,1 мкм; новое поколение лазерных линеек Heidenhein обеспечивает точность отсчета перемещений до 0,01 мкм).

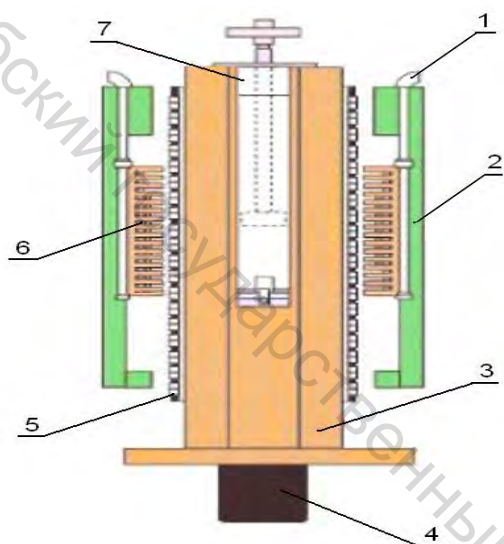


Рис. 1.46. Схема сдвоенного линейного привода оси Z: 1 – патрубок системы охлаждения, 2 – ползун, 3 – каретка, 4 – электрод-инструмент, 5 – постоянные магниты каретки, 6 – электромагниты ползуна, 7 – противовес



Рис. 1.47. Фотография каретки вертикального ползуна оси Z



Рис. 1.48. Общий вид электромагнитов статора оси Z с внутренней и внешней стороны

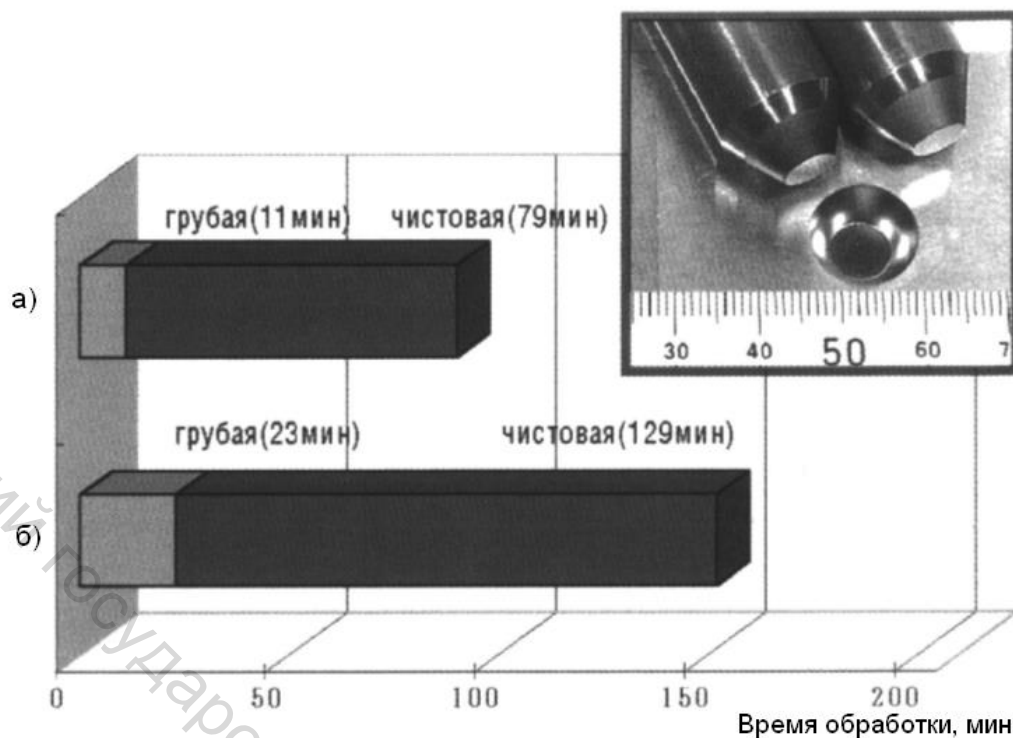


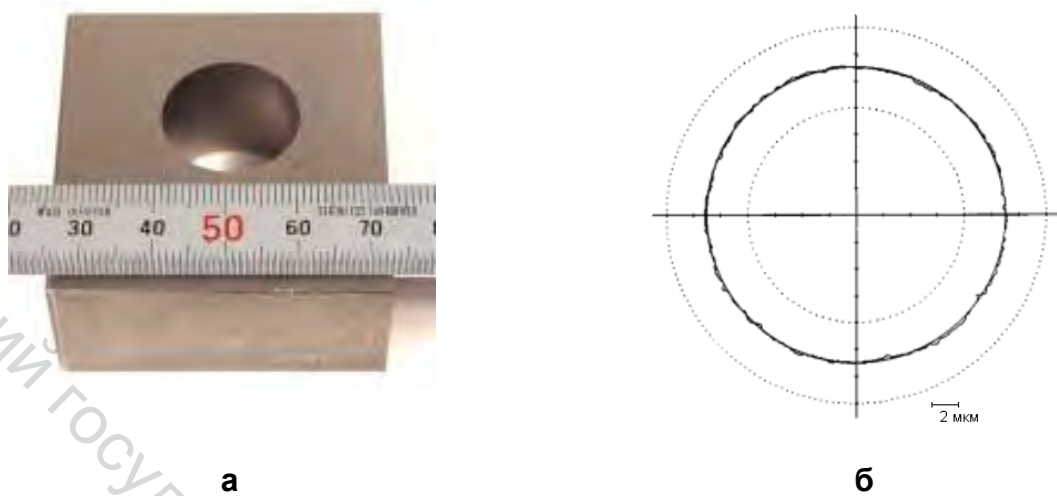
Рис. 1.49. Примеры обработки занижения в шарике: а – на электроэрозионном станке с линейным приводом, б – на электроэрозионном станке с ШВП. Генератор импульсов LQ1W (Sodick). Материал – сталь, ЭИ – медь. Параметры обработки: диаметр торца – 7 мм, глубина занижения – 5 мм, шероховатость – 0,06 мкм (Ra)

Макетные и рабочие испытания линейных сервоприводов доказали их значительно бóльшую точность и скорость, а также более высокую надежность и долговечность по сравнению с шаговыми электродвигателями или электродвигателями постоянного или переменного тока, соединенными с ШВП. Срок службы линейных электродвигателей определяется сроком службы постоянных магнитов. Для магнитов, используемых в современных линейных приводах, срок службы при экспериментальных исследованиях превысил 15 лет и оценивается в 25 – 30 лет.

Для наглядности достижений по точности рассмотрим пример обработки отверстия $D = 20$ мм (рис. 1.50) в углеводородной жидкости (масло 30 Neutral) на электроэрозионной вырезной установке AP200L (Sodick). Материал детали – сталь X12M (SKD 11, Япония) толщиной 15 мм. Вырезание производилось за 10 проходов.

При измерении круглости на измерительной машине (Taylor Hobson Tayrond 250) отклонение от круглости составляет 0,65 – 0,7 мкм (по Rmax), в то

время как ранее, при обработке на станках с ШВП, это значение достигало 1,2 мкм (по Rmax) (см. круглограммы отверстий на рис. 1.51).



**Рис. 1.50. Пример обработки отверстия на вырезном станке с линейным приводом:
а – заготовка с отверстием, б – круглограмма отверстия**

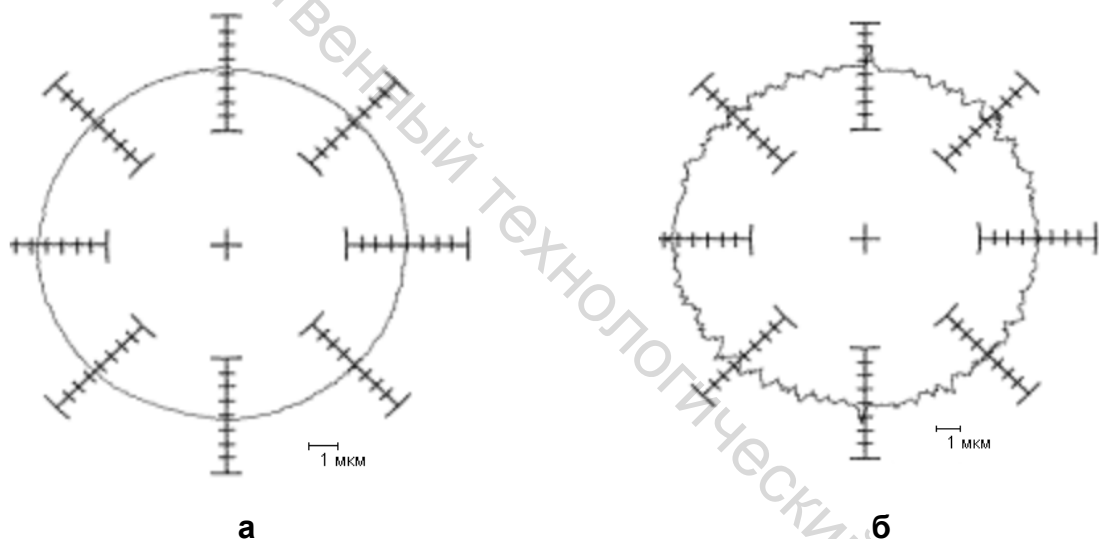


Рис. 1.51. Сравнение круглограмм отверстия: а – обработанного на станке с линейным приводом, б – обработанного на станке с ШВП

Использование линейных приводов в электроэрозионных станках привело к тому, что их стали применять, начиная с 2001 года, в массовом порядке в конструкциях других станков и устройств.

1.6.6. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ

Одной из важных частей электроэрозионного оборудования является генератор импульсных разрядов, предназначенный для подачи дозированного количества энергии в межэлектродный промежуток в течение заданного времени.

При электроэрозионной обработке используются импульсные потоки энергии мощностью $10^7 - 10^{-2}$ Вт/м², подаваемые на ограниченные участки поверхности. Форма импульсов, их параметры и полярность определяют эрозию обоих электродов и стабильность процесса. При униполярных импульсах эрозия электродов неодинакова, поэтому полярность их включения в цепь генератора импульсов выбирается такой, чтобы эрозия ЭИ была минимальной, а заготовки – максимальной.

Униполярные и пульсирующие импульсы используют при электроэрозионной обработке для объемного формообразования, несимметричные знакопеременные импульсы применяют для выполнения вырезных работ. Генераторы импульсов обеспечивают длительность импульсов тока в пределах $10^{-7} - 10^{-1}$ с, скважность – 1,05 – 10, амплитудное значение силы тока – до нескольких тысяч ампер.

Получение униполярных периодических или знакопеременных импульсов может осуществляться:

- прерыванием постоянного или переменного тока полупроводниковыми прерывателями, однополупериодным выпрямлением и т.п.;
- суммированием напряжений переменного тока различной частоты и величины и напряжения постоянного тока;
- преобразованием постоянного или переменного тока в импульсный при помощи тиристоров, транзисторов или их сочетанием с преобразователями частоты;
- преобразованием непрерывного переменного тока в импульсный переменный с помощью нелинейных устройств и его последующее выпрямление;
- генерированием импульсов напряжения за счет преобразования механической энергии в электрическую и последующим выпрямлением знакопеременных импульсов.

Черновую и чистовую обработку выполняют на различных режимах работы генератора импульсов одного типа.

Первым генератором, который применялся для выполнения электроэрозионной обработки, стал RC-генератор, предложенный Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Позже стали использовать ламповые и машинные генераторы импульсов. Ламповые генераторы позволили получить более мощные, чем в RC-генераторах, импульсы, параметры которых не зависели от состояния межэлектродного промежутка. В ламповых генераторах управление импульсами напряжения производилось от электронной лампы. Такие генераторы обеспечивали получение импульсов с высокой частотой их следования (до 20 кГц) независимо от состояния МЭП. К недостаткам генераторов импульсов такого типа следует отнести низкий к.п.д. и ограничение энергии импульса.

Машинные генераторы состояли из генераторов постоянного тока, связанных с электродвигателями. В таких генераторах энергия импульсов достигала больших значений, что использовалось при обработке крупных заготовок.

Более высокую энергию импульсных разрядов можно получить в магнитонасыщенных генераторах, простых, надежных в работе, обеспечивающих получение больших токов. Однако частота импульсов таких генераторов ограничена и возможно ее использование только при обработке заготовок на весьма грубых режимах.

В дальнейшем были разработаны генераторы импульсов на полупроводниковых приборах – транзисторах и тиристорах, которые и получили наибольшее применение.

Из достаточно большого количества возможных типов генераторов в электроэрозионных станках получили распространение RC- (RLC, CC и подобных типов) и широкодиапазонные генераторы импульсов.

Наиболее простыми генераторами импульсов большой скважности являются генераторы на основе токоограничивающего резистора и конденсатора (типа RC). Электрическая схема такого генератора приведена на рис. 1.52. Генератор работает следующим образом. От источника питания U напряжением 100 – 250В через токоограничивающий резистор R конденсатор C запасает некоторое количество энергии. Напряжение на конденсаторе возрастает до величины пробивного, при котором происходит пробой МЭП и выделяется энергия в виде импульсного разряда большой мощности. После этого имеет место

падение напряжения на конденсаторе, ток начинает быстро уменьшаться, а затем прекращается.

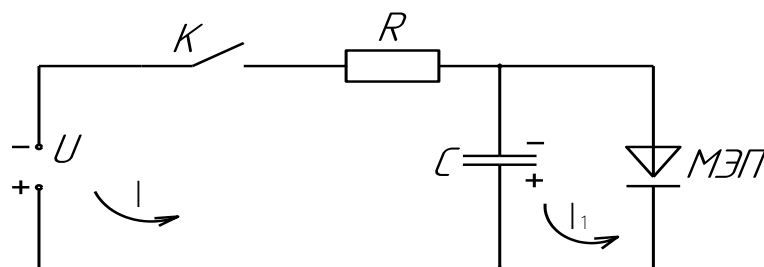


Рис. 1.52. Схема зависимого релаксационного генератора:
U – источник питания, **K** – выключатель, **R** – резистор, **C** – конденсатор,
МЭП – межэлектродный промежуток

Затем восстанавливается электрическая прочность диэлектрика и тотчас начинается зарядка конденсатора, происходит повторение процесса с определенной частотой, которая зависит от параметров схемы, расстояния между электродами и количества эрозированных частиц в зазоре между ЭИ и заготовкой. Восстановление электрической прочности промежутка зависит преимущественно от энергии прошедшего импульса, так как ею определяется степень ионизации промежутка.

Импульсы при нормальном режиме следуют друг за другом со значительными интервалами. Скорость нарастания напряжения на конденсаторе должна быть меньше скорости восстановления прочности МЭП, что достигается подбором величин токоограничивающего резистора и конденсатора.

Для облегчения условий зарядки конденсатора в разрядную цепь некоторых генераторов импульсов вводят индуктивность (**L**). При правильном подборе величины индуктивности значительно уменьшается величина токоограничивающего сопротивления и увеличивается частота процесса, что в свою очередь повышает производительность электрической эрозии. Величина индуктивности не должна быть слишком большой, т.к. кроме перезарядки, влияющей на производительность обработки, возможны повторные пробой МЭП, но на обратной полярности, что повышает износ ЭИ, приводит к возникновению дуговых разрядов, при следовании которых обработка некоторых материалов невозможна (например, твердых сплавов).

К.п.д. генераторов по схеме RC весьма низок, а конструкция мощных генераторов слишком громоздка и энергоемка. Поэтому генераторы приведенного типа могут быть вполне применимы при мощностях до 5 – 8 кВт.

Генераторы импульсов, в схемы которых включена индуктивность, благодаря меньшей величине потерь в токоограничивающей цепи обладают более высоким к.п.д.

В электроэрозионных станках средней мощности применяются генераторы импульсов по схеме СС, работающие по двухполупериодной схеме выпрямления. Отсутствие потерь энергии на токоограничивающем резисторе значительно увеличивает к.п.д. таких генераторов импульсов и повышает производительность станков.

Наибольшее распространение в станках советского, а сейчас и российского производства получили генераторы на управляемых полупроводниковых приборах: на основе инверторов, в которых тиристоры регулируют период зарядки и разрядки конденсаторов в релаксационных генераторах, и широкодиапазонные генераторы импульсов (ШГИ), структурная схема которого показана на рис. 1.53. Такие генераторы обеспечивают высокий к.п.д., генерируют импульсные разряды в широком диапазоне энергии, длительности и частоты следования.

В состав широкодиапазонных генераторов входят несколько силовых блоков (**СБ₁**, ..., **СБ_n**). В зависимости от количества одновременно включенных силовых блоков в МЭП подается различная энергия. При выполнении электроэрозионной обработки с поджигающими импульсами их выработка обеспечивается блоком поджигающих импульсов **БПИ**. Блок защитных импульсов **БЗИ** уменьшает износ электрода-инструмента при следовании знакопеременных импульсов и снижает эрозионное воздействие рабочей жидкости на обработанную поверхность. Возможные короткие замыкания при обработке устраняются с помощью блока ликвидации коротких замыканий **БЛКЗ**.

В генераторах импульсов иностранных фирм применяют транзисторные широкодиапазонные генераторы импульсов аналогичных типов, обеспечивающие как электроискровые, так и электроимпульсные режимы электроэрозионной обработки. В разрядном контуре таких генераторов в зависимости от режима работы может быть одновременно включено различное количество

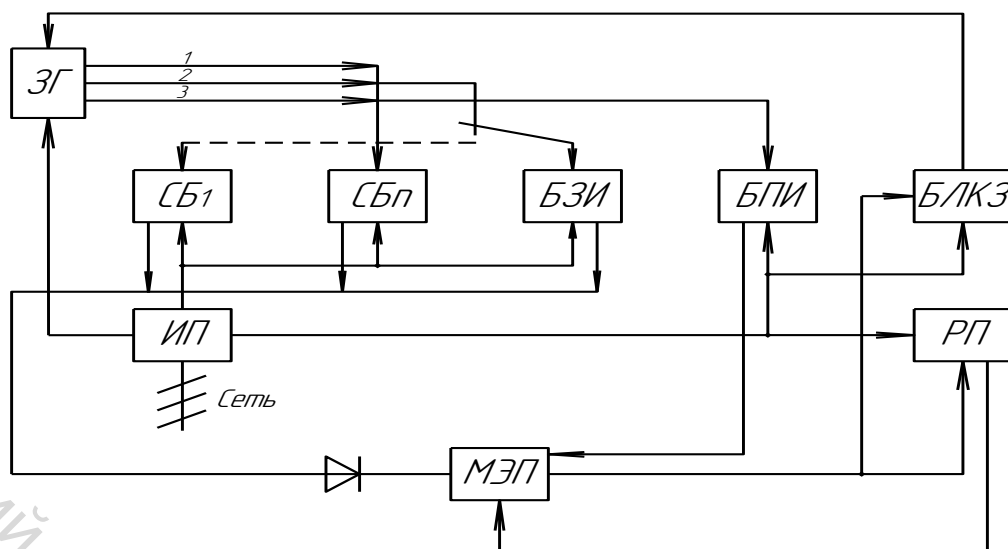


Рис.1.53. Структурная схема ШГИ:

ЗГ – задающий генератор, **СБ₁** – **СБ_n** – силовые блоки. **БЗИ** – блок защитных импульсов, **БПИ** – блок поджига, **ИП** – источник питания, **БЛЗК** – блок ликвидации коротких замыканий, **РП** – регулятор подачи, 1 – 3 – каналы управления блоками

управляемых полупроводниковых приборов. Такие генераторы обеспечивают регулирование режимов обработки в широких пределах, обеспечивая тем самым черновую, чистовую, доводочную обработку, а при использовании специальных рабочих жидкостей – полирование поверхностей.

1.6.7. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Расширение технологических возможностей электроэрозионного оборудования обеспечивается за счет использования при обработке деталей приспособлений и соответствующей инструментальной оснастки. К ним относятся электрододержатели, патроны, зажимные устройства, поворотные столы, палеты, автоматические сменщики заготовок, палет и инструментов и др. Применение такой оснастки повышает производительность обработки и точность изготовления деталей. Затраты времени при обработке деталей распределяются следующим образом: 50% затрачивается непосредственно на обработку; 7% – на замену инструментальной оснастки; 3% – износ инструментов (при обработке резанием); 24% – на организацию производства; 16% – на смену деталей. Сокращение непроизводительных затрат обеспечивает существенное повышение производительности обработки. При этом управление некоторыми типами приспособлений (например, поворотными столами, автосменщиками и т.п.) осуществляется по командам от систем ЧПУ, что способствует автоматизации обработки и достижению высокой точности.

Получение высоких результатов по точности обработки и параметрам шероховатости на электроэрозионном оборудовании возможно в том случае, когда положение заготовки на столе станка и электрода-инструмента относительно заготовки в процессе обработки точно определено, а усилие зажима обеспечивает их надежную фиксацию. Отличительной особенностью электроэрозионной обработки является незначительная сила резания, что упрощает закрепление заготовки и электрода-инструмента. Однако при выполнении быстрых перемещений и переходе к обработке различных участков заготовки сила прижима базовыми поверхностями к столу или установочным частям приспособлений должна быть достаточной для предотвращения сдвига заготовки из-за инерционных сил. Это связано с тем, что вес заготовок, обрабатываемых на электроэрозионных станках, в некоторых случаях составляет 3 – 20 т, а ускорение, с которым перемещаются исполнительные органы оборудования, достигает 2G и более. Электроды-инструменты также должны быть надежно закреплены.

Развитие и совершенствование инструментальной оснастки и приспособлений для закрепления заготовок происходило неразрывно с развитием конструкций электроэрозионного оборудования. Ранее на электроэрозионных станках для установки, выверки и закрепления электродов-инструментов и заготовок, сообщения ор-

битального движения электроду-инструменту применялись механические устройства, в большинстве случаев сложной конструкции. Такие приспособления состоят из ряда сопрягаемых деталей, перемещение которых обеспечивает, например, установку ЭИ в требуемое положение, позволяет определить взаимное положение ЭИ и заготовки, изменить угол проводки проволоки, задавать орбитальные осцилляции электрода-инструмента и т.д. Точность изготовления деталей таких устройств и приспособлений определяла точность обработки заготовок на электроэрозионном оборудовании. С ростом требований к точности обработки деталей, конструкции применявшихся ранее приспособлений перестали удовлетворять потребителей оборудования. Это обстоятельство связано с тем, что громоздкие приспособления для установки заготовок состояли из большого количества деталей и обеспечивали точность обработки не более 0,02 – 0,03 мм, что в большинстве случаев уже было недостаточно. Поэтому производители электроэрозионных станков и технологической оснастки пошли по пути унификации и упрощения конструкций приспособлений. При этом благодаря мощному развитию ЧПУ появилась возможность большинство выполняемых работ возложить как раз именно на эти системы. Например, выполнение орбитальных движений, выверка положения электрода-инструмента относительно заготовки, обмер последней, вырезание контуров сложной формы и выполнение конусного резания, перезаправка проволоки, смена электрода-инструмента и заготовки, установка и снятие палет с заготовками и др. операции в большинстве современных станков для электроэрозионной обработки выполняются по командам устройств ЧПУ. Учитывая дискретность современных приводов электроэрозионных станков, высокую скорость перемещений исполнительных органов и точность контроля таких перемещений, появилась возможность существенно упростить используемые приспособления и инструментальную оснастку. Например, для обработки нескольких одинаковых отверстий, расположенных на окружности, достаточно использовать встраиваемый поворотный шпиндель для электроэрозионных прошивочных установок, с помощью которого осуществляется поворот ЭИ на заданный угол с точностью $0,001^0$ (в некоторых станках – $0,0005^0$). При этом для выполнения обработки достаточно использовать один ЭИ как простой, так и сложной формы.

Для установки и закрепления электродов-инструментов и заготовок используется различная технологическая оснастка. Ее изготавливают в настоящее время специализированные предприятия (EROWA, System 3R, Hirschmann, Mecatool и др.), выпускающие комплекты инструментальной оснастки и приспособлений для электроэрозионных, токарных, сверлильных станков, обрабатывающих центров, а также из-

мерительные машины и устройства. Приспособлениями и инструментальной оснасткой широко пользуются изготовители электроэрозионного оборудования. В ряде случаев технологическую оснастку для станков выпускают сами производители электроэрозионных станков.

Установку крупных заготовок и приспособлений на электроэрозионных станках осуществляют непосредственно на столы, которые в последнее время начали изготавливать из керамических материалов, что уменьшает нагрев элементов конструкций станков и заготовок и повышает тем самым точность обработки. Это особенно важно при выполнении высокоточных работ, а также при обработке мелких деталей. Закрепление крупных заготовок на столах станков для объемного копирования осуществляют с помощью специальных болтов для Т-образных пазов и прихватов различных форм. Установку и закрепление на станках заготовок средних размеров и нескольких заготовок малых размеров можно осуществлять следующим способом.

На рис. 1.54 показан позиционирующий стол. Стол такой конструкции применяют для установки заготовок и приспособлений различного назначения на станках для объемного копирования, а также в качестве спутника при перемещении заготовок со станка на станок. Позиционирующий стол устанавливают и закрепляют на столе станка. Размеры столов выбираются в зависимости от типоразмера соответствующего электроэрозионного станка или станков других типов. На позиционирующем столе с шагом 100х 100 мм выполнены отверстия для специальных разжимных оправок диаметром 20 мм, которые обеспечивают позиционирование размещаемых приспособлений или заготовок, а также обработаны крепежные резьбовые отверстия с шагом 50х 50 мм.

Принцип установки и зажима приспособлений и заготовок на позиционирующие столы приведенного выше типа показан на рис. 1.55. Любое приспособление или заготовка должны иметь точно обработанные базовые отверстия, шаг которых кратен шагу отверстий позиционирующего стола, а диаметр соответствует диаметру отверстий позиционирующего стола (например, 20 мм). В отверстия устанавливаются разжимные оправки, которые при повороте специального ключа обеспечивают установку заготовки относительно стола. Резьбовые отверстия могут использоваться для дополнительного прижима заготовки или приспособления к поверхности позиционирующего стола. Таким способом на столе можно расположить и закрепить для обработки одновременно несколько заготовок или приспособлений различного назначения. Точность позиционирования последних при использовании приведенной выше системы установки и зажима составляет 0,002 мм.

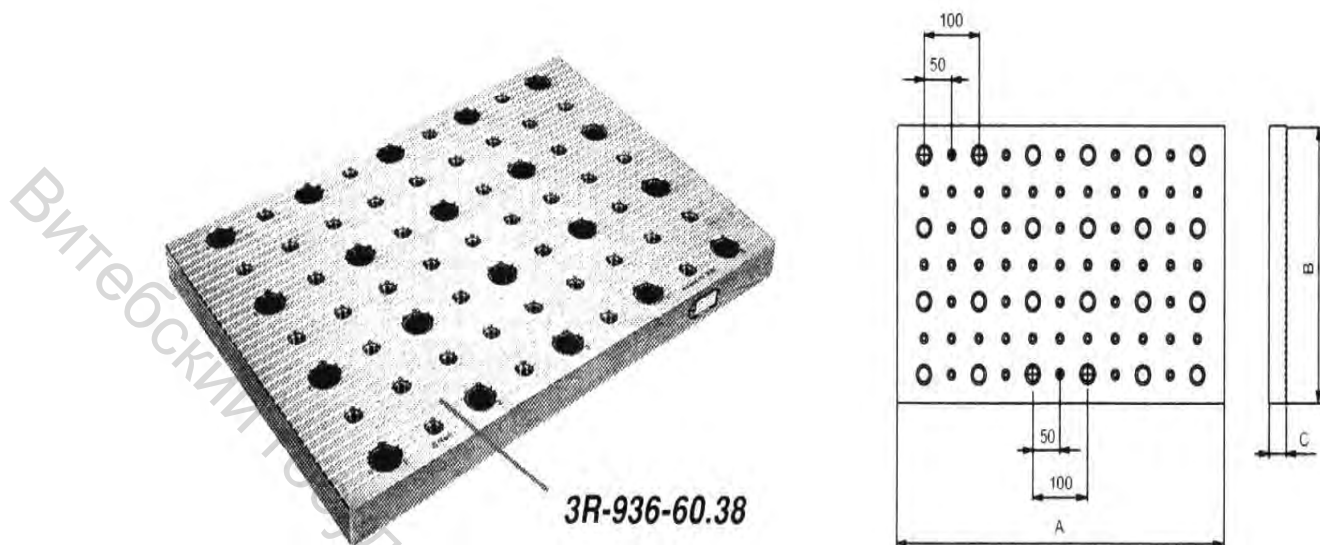


Рис. 1.54. Позиционирующий стол (фирмы System 3R) к станкам для объемного копирования



Рис. 1.55. Способ зажима заготовок и приспособлений на позиционирующем столе

Для выполнения некоторых видов работ могут применяться поворотные столы, общий вид одного из которых показан на рис. 1.56. На верхней поверхности стола размещают и зажимают заготовку, которая при необходимости может быть повернута вручную на определенный угол относительно оси Z. Величина угла поворота отсчитывается по соответствующим шкалам (основной и шкале нониуса).

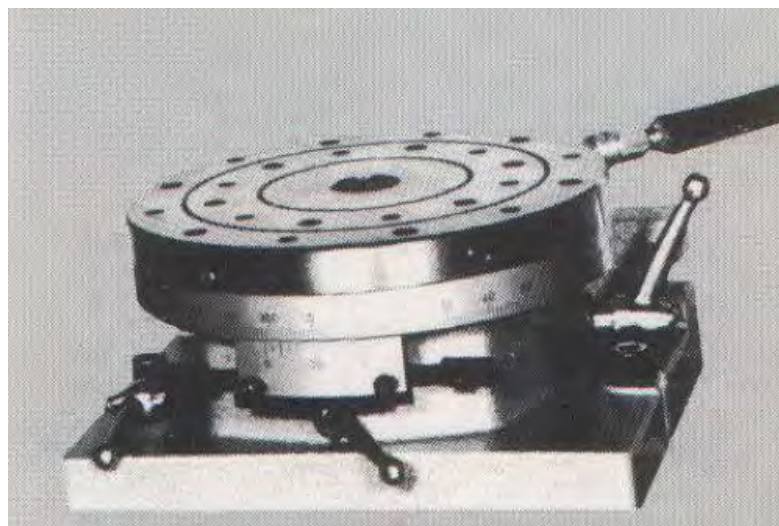


Рис. 1.56. Общий вид поворотного стола

Поворотные столы приведенной выше конструкции применяют при выполнении объемного копирования (прошивочной обработки) любого числа отверстий и полостей различной формы, которые располагаются, например, в разных частях заготовки. В некоторых случаях на поворотном столе можно установить одновременно несколько заготовок, в каждой из которых необходимо обрабатывать отверстия либо полости различной конфигурации. После зажима производится обработка соответствующей поверхности заготовки электродом-инструментом определенной формы. При непрерывном вращении стола может производиться обработка цилиндрических и конических отверстий, а также наружных поверхностей тел вращения. Вращение стола обеспечивается встроенным электродвигателем, управляемым ЧПУ. Скорость вращения может регулироваться в определенных пределах. При использовании вращающихся столов производительность обработки отверстий по сравнению с обычным прошиванием увеличивается примерно вдвое, т.к. улучшаются условия удаления эрозированных частиц и газов из межэлектродного промежутка.

Достаточно часто при выполнении объемного копирования электроду-инструменту необходимо сообщать орбитальное движение относительно обрабатываемого контура. При орбитальном движении в процессе электроэрозионной обработки происходит увеличение межэлектродного зазора между боковыми стенками ЭИ и обрабатываемой полости. Орбитальное движение ЭИ значительно улучшает условия удаления продуктов эрозии из зоны обработки, повышает производительность, позволяет снизить конусность прошиваемых отверстий. Раньше орбитальное движение задавалось механически. Это движение представляет собой круговое плоскопараллельное перемещение относительно обрабатываемого контура. Амплитуда орбитального движения ЭИ в зависимости от типоразмера станка не превышала 5 мм и

регулировалась с невысокой точностью в широких пределах. Программное обеспечение современных электроэрозионных установок обеспечивает выполнение приводами перемещения ЭИ и заготовки большого количества орбитальных движений произвольной формы. К числу последних можно отнести орбитальное движение ЭИ по конусу, сфере, пирамиде, обратному конусу, копы, многоугольнику с произвольным количеством граней, трехмерному произвольному сложному контуру и т.д.

Для обработки пространственных поверхностей могут применяться делительные головки. На рис. 1.57 показана головка, обеспечивающая поворот заготовки относительно трех координатных направлений (X, Y, Z). Используя приведенные приспособления можно вручную изменять положение заготовки относительно электрода-инструмента. Однако наиболее целесообразно управлять поворотными столами и делительными головками с помощью систем ЧПУ, которые обеспечивают одновременное перемещение заготовки и электрода-инструмента по нескольким координатным направлениям, что позволяет обрабатывать сложные поверхности (например, лопатки турбин, насосов, гребные винты, косозубые зубчатые колеса и др. детали).



Рис. 1.57. Общий вид делительной головки

Для автоматизации прошивочных работ при объемном копировании полостей сложной формы в деталях различного назначения (в случае оснащения электроэрозионных станков автоматическими сменщиками) в условиях серийного производства широко применяют закрепление заготовок на палетах. Последние представляют собой специальные приспособления, на установочных элементах которых размещают

заготовки. Затем палеты располагают на поворотных механизмах автоматических сменщиков. Последние по программе ЧПУ электроэрозионного станка обеспечивают перемещение палет с обработанными деталями на поворотный механизм сменщика, а затем отправляют на стол станка очередную палету с закрепленной на ней заготовкой (или заготовками). После этого ЧПУ обеспечивает обмер заготовки и определяет ее положение относительно ЭИ. Затем производится обработка новой заготовки. Палеты и системы их автоматической замены производят и поставляют для комплектования электроэрозионных и других типов станков перечисленные выше изготовители инструментальной оснастки.

Для изготовления электродов-инструментов, их установки и зажима на станках для объемного копирования и прошивочном оборудовании применяют оснастку, показанную на рис. 1.58.

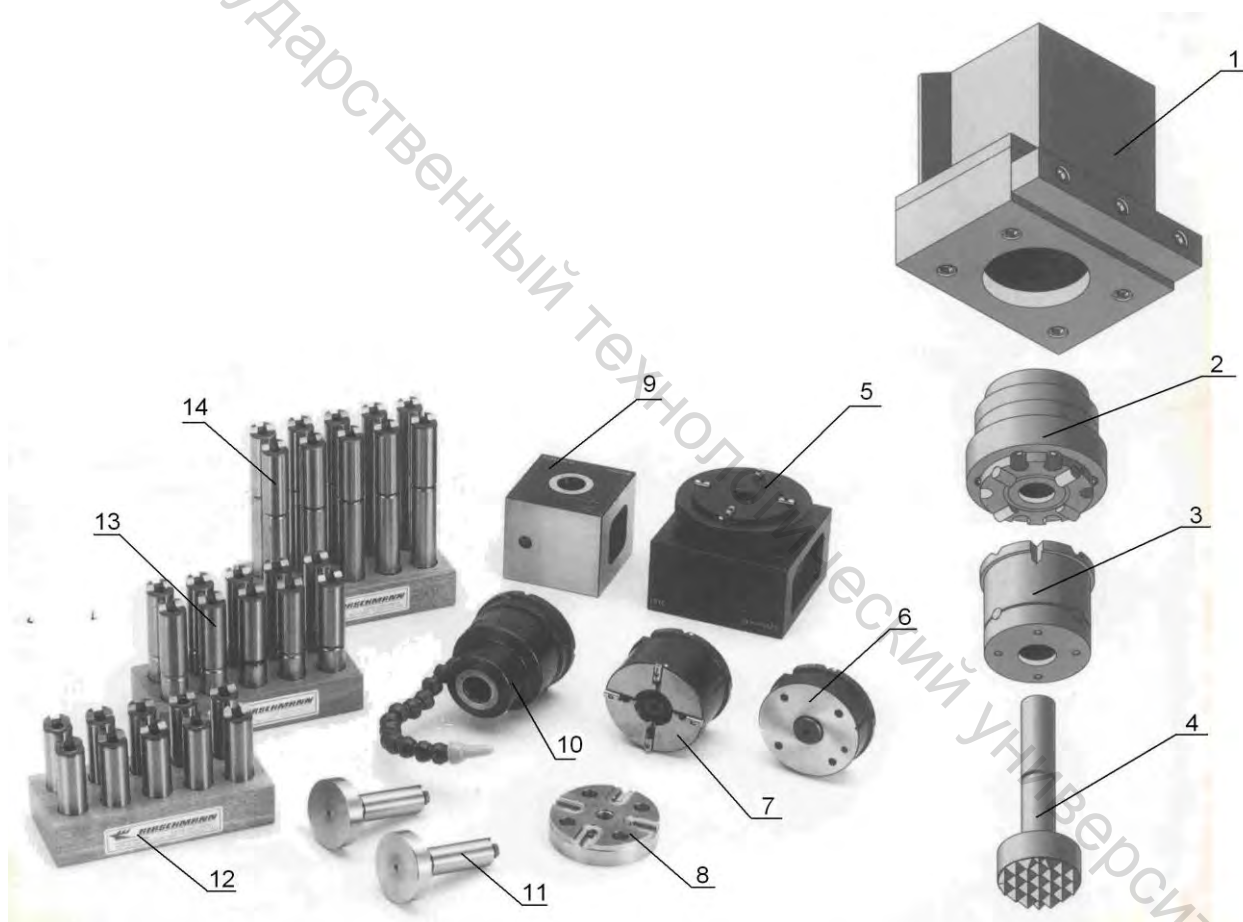


Рис. 1.58. Инструментальная оснастка станков для объемного копирования и пример ее использования: 1 – ползун станка, 2 – шпиндель, 3 – патрон (цанговый, пневматический или электромагнитный), 4 – электрод-инструмент, 5 – автоматический патрон, 6, 7, 8 – сменные планшайбы для патрона, 9 – держатель для электрода-инструмента, 10 – сменная планшайба с оправкой для промывки, 11 – держатель электрода-инструмента, 12, 13, 14 – хвостовики для изготовления электродов-инструментов

Электроды-инструменты изготавливают, используя для этого хвостовики соответствующей длины (12, 13, 14). Наиболее часто применяют держатели, к которым заготовки электродов-инструментов припаивают с помощью специальных шайб и припоев (их обычно поставляют изготовители оснастки). Хвостовые части электродов-инструментов имеют форму и размеры, которые обеспечивают их точную установку в соответствующие приспособления при обработке на различных станках (токарных, фрезерных, сверлильных и т.п.). Использование одних и тех же баз при изготовлении электродов-инструментов и для их последующего размещения на электроэрозионных станках позволяет свести погрешности установки и базирования к нулю, что значительно повышает точность обработки заготовок.

На вырезном оборудовании заготовки располагают так, чтобы под них можно было подвести механизм нижней проводки проволоки. Для этого приспособления к вырезным станкам, а также крупные заготовки размещают на опорных элементах столов станков. Для установки заготовок при вырезании могут быть использованы приспособления следующих типов. На рис. 1.59 показаны части приспособления для установки и зажима заготовок различной формы. В состав приспособления входят базовые элементы (пластины), держатели заготовок различной формы, зажимы, тиски, линейки, шаблоны, планки и другие детали.

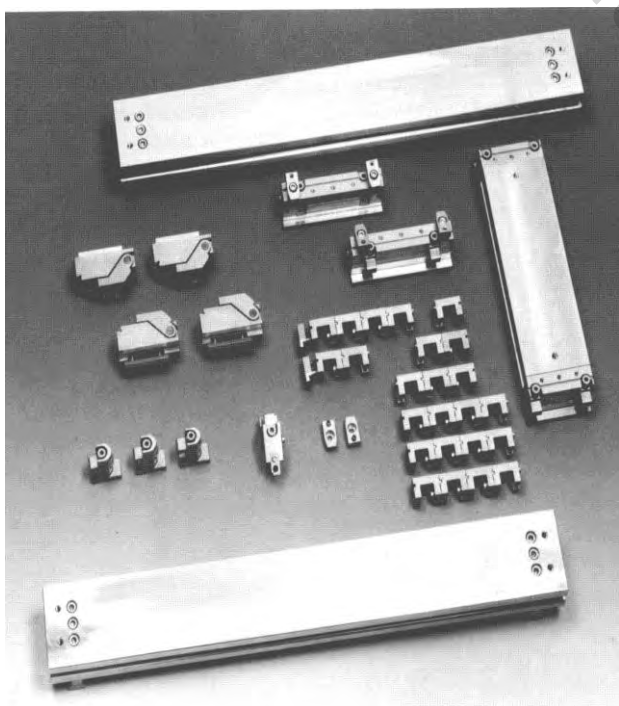


Рис. 1.59. Фотография деталей приспособления вырезного станка

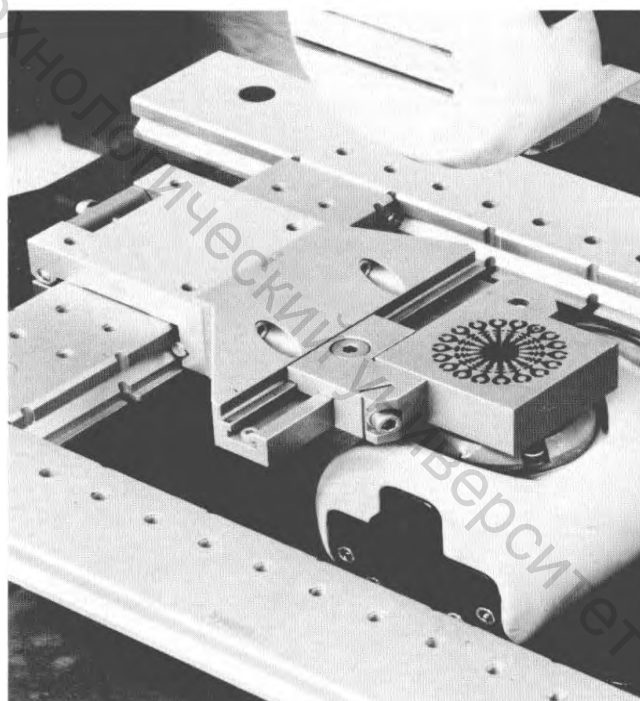


Рис. 1.60. Пример использования приспособления на вырезном станке

Пример использования приспособления, показанного на рис. 1.59, для вырезной обработки сложного контура в детали приведен на рис. 1.60. Использование соответствующих частей приспособления (планок и зажимов) обеспечивает быструю и точную установку заготовки в требуемое положение и ее надежный зажим. Над деталью и под ней видны круглые корпуса механизмов верхней и нижней проводки проволочного электрода-инструмента. Для замены заготовки достаточно ослабить несколько болтов с внутренним шестигранным отверстием, чтобы отвести подвижную часть приспособления и извлечь деталь. На ее место может быть установлена следующая заготовка, причем ее форма может отличаться от предыдущей. В некоторых случаях в целях экономии вспомогательного времени на переустановку целесообразно осуществлять установку сразу нескольких заготовок. В этом случае необходимо оснащать станок механизмом автоматической перезаправки проволоки, чтобы обеспечивалась последовательная обработка нескольких заготовок без участия оператора. Пример применения приспособления показан на рис. 1.61. Для вырезания в приспособлении закреплены одновременно две заготовки, причем разных габаритов, в каждой из которых будут последовательно обработаны соответствующие контуры.

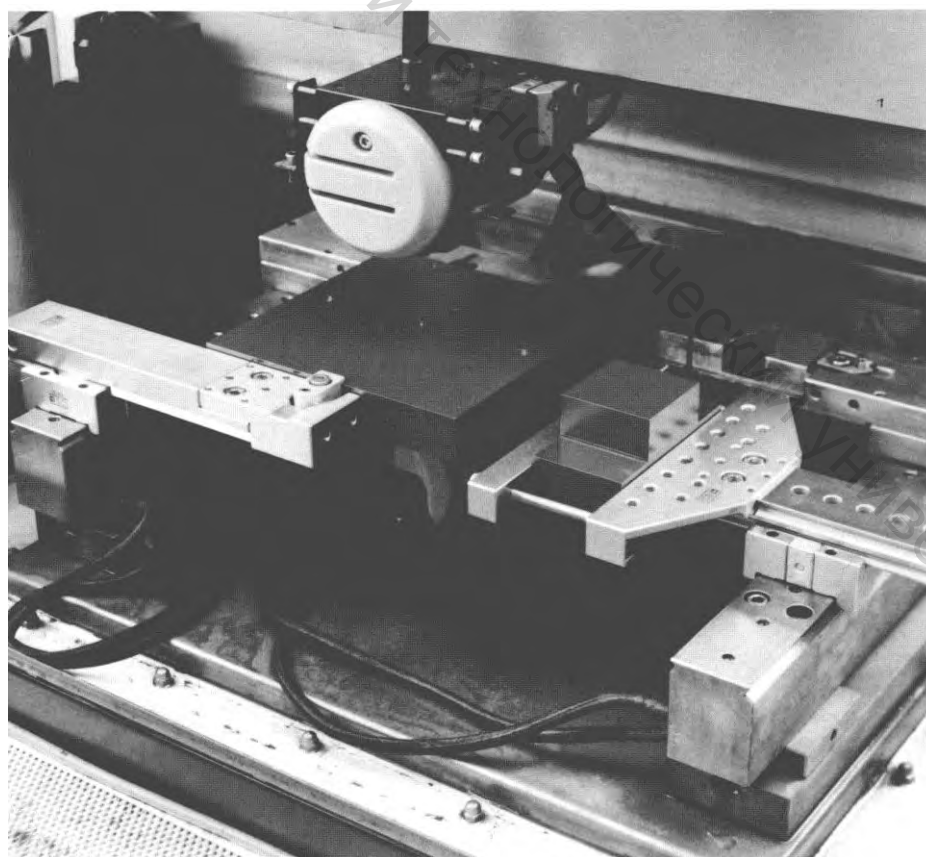


Рис. 1.61. Пример одновременной установки в приспособлении двух заготовок

Зажим заготовок в приспособлениях осуществляют вручную с помощью динамометрических ключей, отверток, а также пневматических зажимов. Закрепление электродов-инструментов в патронах станков для объемного копирования производят с помощью цанговых втулок, а в автоматизированном оборудовании используют гидравлический, пневматический или электромагнитный зажимы. Удаление из приспособлений, шпинделей станков, тракта проводки проволоки остатков рабочей жидкости и шлама осуществляют продувкой указанных частей сжатым воздухом. Для этих целей приспособления и инструментальная оснастка станков для электроэрозионной обработки снабжены каналами, которые соединяются трубопроводами с системой подачи сжатого воздуха.

Перед началом обработки важно знать взаимное расположение электрода-инструмента и заготовки. В ряде случаев для этих целей операторы электроэрозионных станков используют позиционирование по искре. Однако в настоящее время, используя программное обеспечение большинства станков, можно производить позиционирование в автоматическом режиме. ЧПУ станков обеспечивает выполнение следующих операций: позиционирование по центру отверстия в заготовке, поиск поверхности, поиск краев (углов) заготовки, поиск центра колонны станка по внешним стенкам заготовки, поиск заготовки по искре и т.д.

На рис. 1.62 показан пример автоматического выставления по вертикали проволочного ЭИ на вырезных станках.

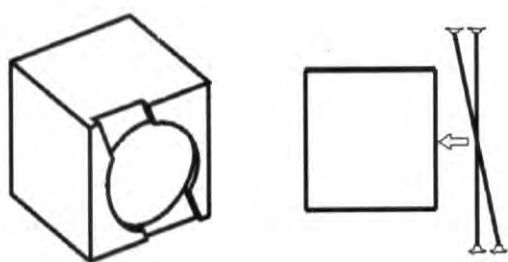


Рис. 1.62. Пример автоматического позиционирования проволочного ЭИ с использованием эталонного куба

Проволока последовательно касается верхней и нижней граней куба (прилагается к станку), который устанавливается у края стола под разными углами. Проводится 5 измерений по контакту с изменениями угла касания с дискретностью $2 - 2,4^\circ$. Вертикальность рассчитывается и выставляется автоматически по результатам измерений.

Достаточно часто при выполнении вырезания возникает необходимость производить обработку поверхностей, которые расположены относительно друг друга под различными углами. На рис. 1.63 показан пример использования поворотного приспособления при вырезании в заготовке заданных контуров.

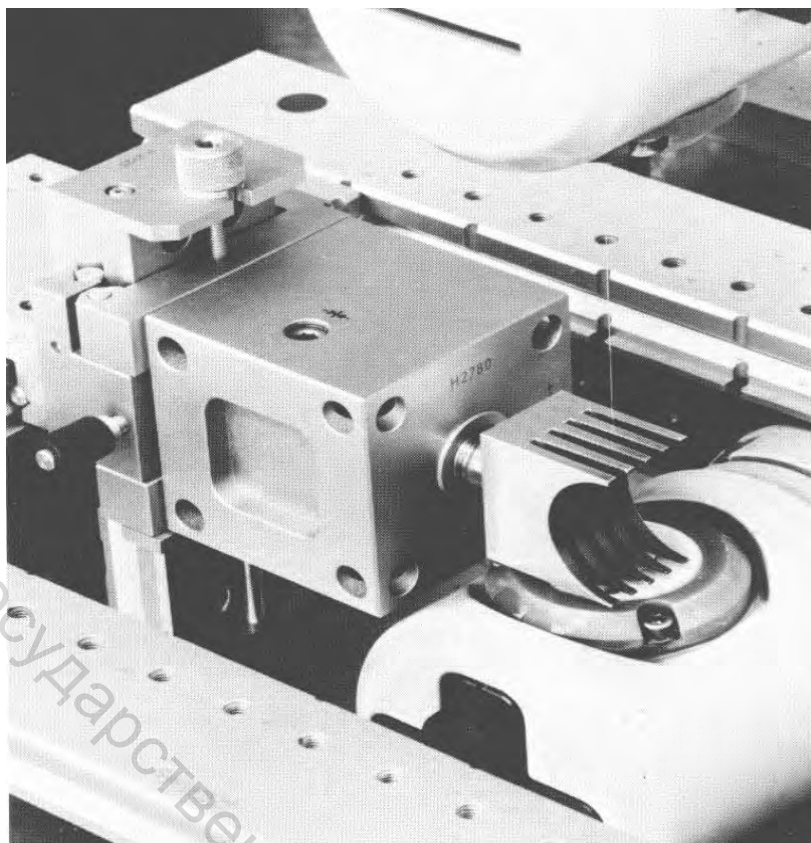


Рис. 1.63. Фотография поворотного приспособления, используемого для вырезания

После установки заготовки производится вырезание контура в одной плоскости, затем, после выхода электрода-инструмента из зоны резания, осуществляется поворот заготовки на заданный угол (в приведенном случае на 90°) вручную либо от устройства ЧПУ и выполняется окончательная обработка следующего контура.

При выполнении обработки крупногабаритных заготовок для установки в шпинделе станка крупногабаритного электрода-инструмента используют специальные переходные плиты. Конструкция таких плит обеспечивает их установку на самые различные типы электроэрозионных станков для объемного копирования. На рис. 1.64 показан пример установки в шпинделе прошивочного станка ЭИ с помощью переходной плиты и обработанная с ее помощью деталь – полуформа для изготовления коленчатого вала.

Для автоматизации обработки на электроэрозионном оборудовании в последнее время начали широко использоваться роботы различного назначения, которые обеспечивают перемещение электродов-инструментов из инструментального магазина станков для объемного копирования к шпинделю, их последующий захват, замену заготовок и т.д. Для перемещения заготовок или палет с заготовками применяют также подъемные устройства.

Витебский госуд

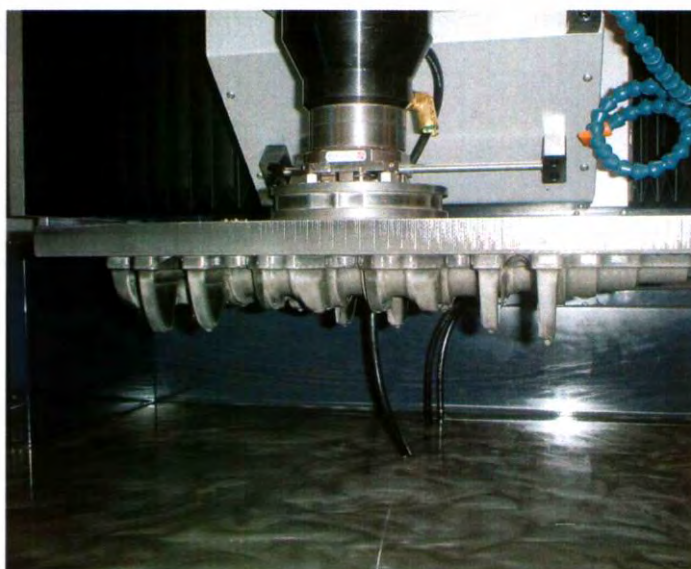


Рис. 1.64. Способ установки крупногабаритного электрода-инструмента на станке с помощью переходной плиты и обработанная полуформа

Витебский госуд
технический университет

1.7. УСТРОЙСТВО И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СТАНКА С ЧПУ

Высокой эффективности использования электроэрозионной обработки можно добиться при оснащении станков системами программного управления. В программное обеспечение таких систем закладывают максимально возможное количество выполняемых функций, важнейшими из которых является автоматическое регулирование зазора, режимов обработки, поддержание оптимальной скорости подачи.

Автоматическое регулирование имеет смысл в том случае, когда значение регулируемой величины непрерывно или периодически изменяется и невозможно, например, по показаниям приборов определить какие она примет значения. Основные затруднения возникают при выборе параметров, с помощью которых может быть обеспечено автоматическое регулирование процесса обработки.

Для нормального функционирования электроэрозионного станка величина межэлектродного зазора должна быть такой, чтобы скорость съема имела максимальное для данных условий обработки значение, обеспечивалось удаление продуктов эрозии, между рабочими поверхностями возникали импульсные разряды, обеспечивающие нормальный режим обработки. К числу факторов, которые определяют устойчивость электрической эрозии, относятся: площадь обработки и ее изменение, глубина обработки, изменение состава рабочей жидкости, изменение давления прокачки, температура рабочей жидкости, возможные короткие замыкания электродов, колебания питающего напряжения, вибрации ЭИ, орбитальное движение ЭИ и т.д.

Одной из основных характеристик, которая оказывает влияние на процесс обработки и ее регулирование является одной из главных задач системы управления станком, является зависимость «зазор – скорость съема». Из-за эрозии материала заготовки зазор между ЭИ и заготовкой постоянно изменяется. Непосредственно измерять зазор и скорость удаления эрозированных частиц материала не представляется возможным, т.к. невозможно определить точки электродов, между которыми в данный момент времени произойдет разряд.

Рассмотрим способы, с помощью которых может быть получена информация об изменении межэлектродного зазора и использована затем для автоматического регулирования положения электродов при обработке.

Для задания приводам, определяющим положение электрода-инструмента или заготовки, соответствующих перемещений, может использоваться *зависимость между зазором и напряжением пробоя*, снятая при постоянном напряжении. *Приведенная зависимость показывает, что определенному расстоянию между электродами соответствует определенное напряжение, при котором образуется канал проводимости. При постоянном напряжении разряды будут протекать в одинаковых условиях.* Пусть в начале обработки электроды, к которым приложено импульсное напряжение, начинают перемещаться друг к другу с равномерной скоростью. В начальный момент сближения электродов расстояние между ними больше зазора, при котором может возникнуть импульсный разряд. Это связано с тем, что максимального напряжения импульса недостаточно для пробоя начального зазора. При прохождении импульса холостого хода ток между электродами равен нулю. Дальнейшее сближение электродов приведет к уменьшению зазора до величины, при которой напряжение достигнет напряжения пробоя и между электродами образуется канал сквозной проводимости. Напряжение скачком упадет до уровня, при котором возникнет искродуговой (при электроискровом режиме) или дуговой (при электроимпульсном режиме) разряд, и некоторое время сохранит свою величину. Ток, поступление которого начнется с момента пробоя межэлектродного зазора, будет изменяться в соответствии с формой импульса напряжения. По окончании импульса напряжения прекратится прохождение тока. При дальнейшем уменьшении зазора за счет продолжающегося сближения электродов возможно протекание новых импульсных разрядов, но при напряжениях, меньших пробивного. Длительность таких импульсов соответственно будет больше предыдущих, а амплитуда примерно такая же, как и у рабочих импульсов. В этом случае создаются условия для протекания так называемых фиктивных разрядов с меньшим, чем при дуговом (или искродуговом) разряде, падением напряжения и большим током, наличием в межэлектродном зазоре большого количества эрозированных частиц. Полезного съема такие разряды не производят.

Дальнейшее сближение электродов может привести к уменьшению зазора до величины, при которой произойдет короткое замыкание и резко возрастет ток. Т.о., используя измерительное устройство, можно зафиксировать некоторое среднее напряжение на электродах за время движения электродов от начального зазора, при котором отсутствуют импульсные разряды, до практически нулевого зазора, при котором имеет место короткое замыкание электродов. При этом среднее напряжение на электродах будет равно среднему значению э.д.с. холостого хода генератора импульсов на установленном режиме работы. Поскольку амплитуда импульса э.д.с. соответствует зазору, при котором возможно возникновение импульсного разряда, а при увеличении зазора действующее напряжение будет превосходить среднее значение, то на привод перемещения ЭИ не поступит информация о величинах зазора, бóльших тех значений, при которых начнут возникать импульсные разряды. Поэтому привод продолжит сближение электродов. В период действия импульсного разряда напряжение также функционально не связано с зазором: по мере уменьшения зазора постепенно сокращается напряжение зажигания, но среднее значение напряжения, подаваемое на вход привода перемещения ЭИ, изменяется мало. Следовательно, *среднее напряжение на электродах может использоваться для косвенного определения величины зазора между ЭИ и заготовкой.*

Определим характеристику, которая отражала бы наряду с изменением зазора в процессе эрозии скорость съема. Непосредственно измерить скорость эрозии затруднительно. В данном случае также *можно использовать косвенные параметры.* В общем случае через межэлектродный зазор протекает несколько типов импульсных разрядов. К их числу относятся *импульсы холостого хода, рабочие импульсы, фиктивные импульсы и импульсы короткого замыкания.* Импульсы холостого хода не потребляют энергии и не производят съема металла. Фиктивные импульсы и импульсы короткого замыкания также потребляют энергию, разрушают ЭИ, нагревают и разлагают рабочую жидкость, однако, как указывалось выше, не удаляют металл с заготовки. *Рабочие импульсы обеспечивают съем металла, частично разрушают материал ЭИ (в различной степени в зависимости от режима обработки) и производят пиролиз диэлектрической жидкости.* Из приведенных импульсов складывается общее количество, выработанное генератором. Предположим, что каждый рабочий импульс, возникающий в одинаковых условиях, удаляет определенное

количество металла с электрода-инструмента и заготовки и образует одинаковое количество продуктов пиролиза рабочей жидкости. В этом случае *скорость съема примерно пропорциональна количеству рабочих импульсов*. Это утверждение справедливо для определения общего съема металла, пропорционального общему количеству прошедших за определенное время импульсов. Следовательно, характеристика объекта управления может быть представлена *зависимостью числа рабочих импульсов как функции зазора*. Вид такой зависимости зависит от абсолютных значений зазора и от скорости его изменения, что является следствием нелинейности и статистики процесса. Для предельных случаев введем понятия *динамической и статической характеристики процесса*. *Динамической характеристикой* называют такую зависимость числа рабочих импульсов как функцию изменения зазора, которая может быть получена при условии

$$\frac{dS}{dt} \gg \frac{m_K + m_A}{F}, \quad (1.10)$$

т.е. при скорости изменения зазора значительно большей линейной скорости эрозии при данном режиме обработки,

где m_K, m_A – масса материала, удаленного с катода и анода при следовании рабочих импульсов;

F – площадь электродов, участвующих в эрозии.

Динамическая характеристика в пределе приближается к характеристике единичного разряда.

Противоположное условие

$$\frac{dS}{dt} \ll \frac{m_K + m_A}{F}, \quad (1.11)$$

определяет статическую характеристику процесса эрозии.

Динамическая характеристика описывает процессы, происходящие в межэлектродном пространстве при изменении положения электродов друг относительно друга, т.е. при выделении продуктов эрозии. Такая зависимость может быть получена при проведении экспериментальных исследований на заданных режимах работы. Для каждого из них находят величину зазора и соответствующие значения числа рабочих импульсов, подсчитываемые по осцил-

лограмме. Осциллограф обеспечивает запись напряжения на межэлектродном промежутке и тока, проходящего через него.

Первые импульсные разряды возникают при расстоянии между электродами, величина которого соответствует амплитуде напряжения импульса холостого хода. *Импульсы при этом могут быть рабочими и холостыми.* Дальнейшее уменьшение зазора за счет сближения электродов приводит к переходу практически всех разрядов в рабочие, которые обеспечивают съем материала. Число таких разрядов резко возрастает. Зазор, при котором образуются рабочие разряды, может изменяться в достаточно широких пределах. Импульсы при этом незначительно различаются только длительностью и напряжением. При дальнейшем уменьшении зазора между электродами даже на несколько микрометров рабочие импульсы быстро переходят в фиктивные и импульсы короткого замыкания. При действии импульсных разрядов образуются продукты эрозии в виде частиц различной крупности, которые должны быть удалены из зазора. Причем зазор между электродами должен быть таким, чтобы даже частицы максимального размера удалялись из межэлектродного промежутка, в противном случае часть рабочих импульсов будет расходоваться на повторное диспергирование таких частиц.

Статическая характеристика определяет поведение системы автоматического регулирования в установившемся режиме работы, когда наступило динамическое равновесие между образующимися и удаляемыми продуктами электрической эрозии материалов ЭИ, заготовки и пиролиза рабочей жидкости. Приведенная характеристика может быть получена следующим образом. В зависимости от положения ЭИ специальным анализатором импульсов с интегратором при определенном режиме работы и площади обработки подсчитывается число рабочих импульсов. Величина зазора определяется в относительных единицах, соответствующих положениям потенциометра задатчика привода перемещения ЭИ.

Статические характеристики для различных площадей и режимов обработки представляют собой кривые с явно выраженным максимумом (рис. 1.65). Ход левой части кривой до максимума объясняется благоприятными условиями удаления продуктов эрозии из МЭП, а число фиктивных импульсов практически равно нулю, что соответствует наступлению установившегося режима эрозии. Ход правой части кривой от максимума объясняется

только влиянием условий удаления продуктов обработки из межэлектродного зазора на процесс обработки.

Физические процессы, протекающие в зазоре между ЭИ и заготовкой, определяются видами импульсных разрядов. Существуют *первичные импульсные разряды*, удаляющие металл с заготовки и его частицы из зоны обработки, и *вторичные разряды*, которые диспергируют частицы, полученные в результате действия первичных разрядов. Могут возникать промежуточные импульсные разряды, воздействующие на эрозированные частицы материала. Вероятность повторного диспергирования частиц будет выше там, где их количество в МЭП больше и крупнее сами частицы. Вторичные разряды не производят съема материала, однако их наличие обеспечивает образование ударных волн в диэлектрической жидкости.

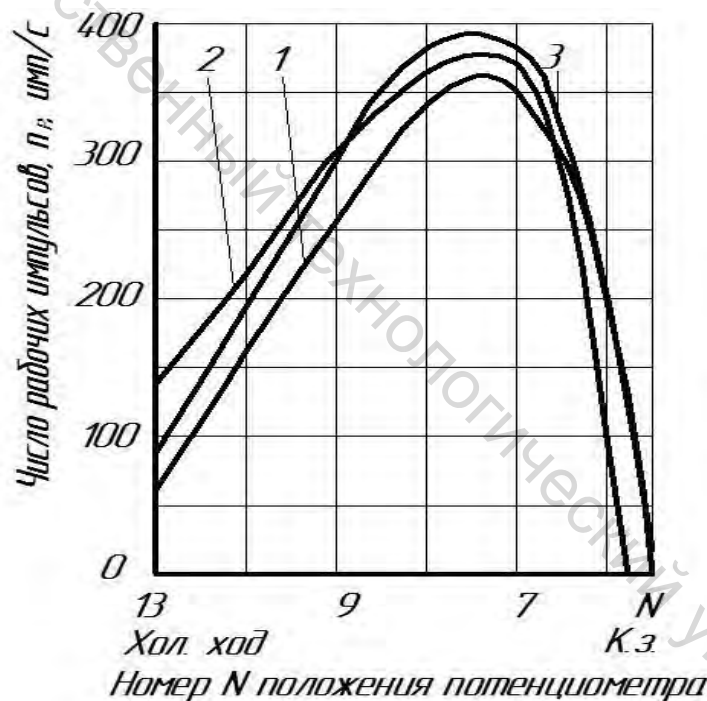


Рис. 1.65. Статическая характеристика зазора для площадей: 1 – 6000 мм²,
2 – 1500 мм², 3 – 700 мм²

Для перемещения эрозированных частиц с целью их удаления из зоны обработки необходимо время, средняя величина которого является характеристикой конкретных условий процесса. Можно также предположить, что среднее время удаления частицы из межэлектродного зазора связано со средним интервалом времени между двумя короткими замыканиями, поскольку последнее характеризует время устойчивой работы при условии практически полного уда-

ления образовавшихся продуктов обработки. Увеличение среднего времени удаления эрозированных частиц из зазора при прочих равных условиях вызывает уменьшение среднего времени между короткими замыканиями. Пусть обработка производится при зазорах, которые не обеспечивают удаление продуктов эрозии. Создаются условия для роста вероятности появления импульсов короткого замыкания за счет уменьшения числа рабочих импульсов. Скорость съема упадет, а с ростом количества не удаленных частиц возрастет вероятность возникновения вторичных диспергирующих разрядов, система при этом будет стремиться к увеличению скорости удаления частиц за счет дополнительных разрядов. Это приведет к некоторому увеличению среднего времени между короткими замыканиями и соответственно к новому установившемуся состоянию системы с увеличенным числом импульсов короткого замыкания. При дальнейшем уменьшении зазора скорость увеличения вероятности появления импульсов короткого замыкания резко возрастает, что в конечном итоге приведет к длительному короткому замыканию, при котором привод перемещения обеспечит реверсирование ЭИ, а зазор возрастет до начальной величины, соответствующей напряжению холостого хода. При разведении электрода инструмента и заготовки произойдет удаление некоторого количества эрозированных частиц из МЭП. В случае проведения дальнейшей обработки при зазорах, не обеспечивающих удаление практически всех продуктов эрозии, в зависимости от степени отклонения действительного зазора от оптимального, произойдет либо ускорение, либо некоторое запаздывание момента реверсирования ЭИ.

При возникновении короткого замыкания между электродами происходит шлакование их поверхностей, т.к. замыкание электродов обычно происходит через частицы металла, образующие между поверхностями нагретый мостик. За счет пиролиза рабочей жидкости наблюдается рост его размеров и дальнейший распад жидкости. Причем привод перемещения ЭИ при начавшемся реверсировании электродов может прекратить их разведение, поскольку образовавшийся мостик имеет сопротивление и характеристику, близкие к фиктивному импульсу. В этом случае возможна порча ЭИ и детали. Однако процесс реверсирования обычно происходит достаточно быстро, поэтому шлакование электродов минимально. *Возникновение частых коротких замыканий свидетельствует о неблагоприятных условиях работы с малыми зазорами, недо-*

статочной прокачке жидкости, неправильном выборе режимов и последовательности обработки и т.д.

Статическая характеристика свидетельствует о том, что данным условиям обработки оптимальному значению зазора соответствует минимальное количество холостых, фиктивных импульсов и импульсов короткого замыкания, а число рабочих импульсов максимально. Величина оптимального зазора определяется площадью обработки. При ее изменении изменяется абсолютная величина оптимального зазора между электродами и положение оптимума. Под влиянием глубины обработки оптимальная величина зазора также изменяется.

Для выбора параметра регулирования важно знать соотношение между первичными и вторичными рабочими импульсами. Приближенные значения приведенных импульсов можно найти, используя анализатор рабочих импульсов при одновременном измерении времени прошивания полости любой формы при определенных условиях обработки. При изменении глубины обработки изменяется число первичных и вторичных рабочих импульсов. На поверхности обработки практически все импульсные разряды являются первичными рабочими, обеспечивая съем материала. С увеличением глубины обработки количество первичных рабочих импульсов уменьшается и соответственно увеличивается количество вторичных рабочих импульсов. При увеличении глубины обработки, например, на 30 мм количество вторичных импульсов возрастает обратно пропорционально падению производительности и составляет уже около 40% от первоначального количества рабочих импульсов. Число первичных импульсов при этом резко падает, поэтому резко снижается производительность обработки.

Соотношение первичных и вторичных рабочих импульсов может быть определено другим способом. В основе этого способа лежит предположение о том, что участки ЭИ в местах возникновения вторичных разрядов должны иметь повышенный износ. Такие участки располагаются в местах резкого изменения кривизны, переходных участков и других частях электрода-инструмента. Отношение избыточного износа к общему износу будет в этом случае характеризовать соотношение вторичных и общего количества рабочих импульсов.

При выборе параметра регулирования для автоматизации обработки следует учитывать возможность саморегулирования процесса. В большинстве случаев все экстремальные ситуации в целом и частотная характеристика эрозионной обработки могут быть объяснены взаимодействием физических процессов образования продуктов эрозии и их удаления. Приведенная статическая характеристика служит примером экстремальной ситуации в результате взаимодействия приведенных процессов. Главной особенностью частотной характеристики является снижение производительности и рост энергетических затрат с увеличением частоты импульсных разрядов. Рост энергоемкости связан с интенсификацией эрозии, а снижение производительности происходит вследствие изменения условий удаления продуктов обработки. С увеличением частоты снижение энергии импульсов уменьшает способность импульсных разрядов к удалению продуктов эрозии. Причем уменьшение зазора приводит к росту числа повторных разрядов, увеличивает энергоемкость процесса, возрастает сопротивление удалению продуктов эрозии. С ростом частоты следует уменьшать площадь обработки, т.к. ухудшаются условия удаления эрозированных частиц, а при определенной площади для данной частоты и скважности эрозия прекратится. Существует определенная площадь обработки, для которой можно подобрать соответствующую частоту и скважность импульсных разрядов, при этом эрозия будет протекать в стабильном режиме. Кроме приведенных характеристик следует учитывать и подобрать также соответствующую амплитуду напряжения, оптимальную скорость подачи для поддержания зазора, требуемую скорость прокачки рабочей жидкости, релаксации электрода-инструмента и некоторые другие.

Влияние процесса съема металла на процесс удаления образовавшихся частиц можно проследить, исследуя зависимость производительности от импульсов холостого хода. Пусть при некотором увеличении зазора между электродами проходит несколько импульсов холостого хода. Очевидно, увеличение числа холостых импульсов снижает производительность обработки. Однако при увеличении зазора улучшаются условия удаления продуктов эрозии из межэлектродного пространства и уменьшается необходимое количество вторичных импульсов, осуществляющих диспергирование частиц металла и их удаление. Следовательно, существует оптимальное для данных условий эрозии количество импульсов холостого хода, при котором будет

минимально число рабочих импульсов, обеспечивающих вторичное диспергирование, а производительность процесса для заданных условий будет максимальной. При этом затраты времени на холостой ход компенсируются увеличением числа первичных рабочих импульсов за счет вторичных импульсов. Аналогичные взаимосвязи устанавливаются при выполнении любых действий, направленных на улучшение условий удаления продуктов эрозии. Например, релаксацию электродов для промывки межэлектродного пространства следует проводить так, чтобы увеличение съема за счет увеличения числа первичных рабочих импульсов перекрывало потери производительности от вынужденного холостого хода ЭИ. Аналогичным образом следует поступать при задании электроду-инструменту вибрации, орбитального движения, принудительной прокачки рабочей жидкости и т.п.

Из вышесказанного следует, что условия удаления продуктов эрозии определяют *требования*, предъявляемые к системам автоматического регулирования. К таким требованиям относят, независимо от параметров регулирования, *чувствительность системы управления и ее быстродействие*.

Применительно к устройствам, регулирующим зазор между ЭИ и заготовкой, *быстродействие* характеризует способность поддерживать стабильность процесса эрозии, предотвращать шлакование ЭИ, минимизировать время переходных процессов, которые возникают либо могут возникнуть при различных отклонениях от выбранного режима работы. Т.е. быстродействие определяется той скоростью, которую должен обеспечить привод перемещения ЭИ и заготовки, чтобы устранить воздействие, которое ухудшает условия обработки.

Чувствительность привода определяет возможную степень отклонения межэлектродного зазора от номинального значения. На чувствительность влияет наличие и величина сил трения в передаточных механизмах, осуществляющих перемещение ЭИ или заготовки, люфты и зазоры в механических передачах и т.д. В идеальном случае величина таких зазоров и люфтов должна быть равна нулю. Однако в реальных условиях такие погрешности могут быть сравнимы с величиной межэлектродного промежутка, необходимого для осуществления эрозии. Для повышения чувствительности приводов электроэрозионных станков стараются уменьшить число звеньев, передающих движение электроду-инструменту и заготовке. В современных установках благодаря внедрению линейных приводов количество таких звеньев минимально, что поз-

воляет поддерживать межэлектродный зазор в оптимальных пределах. При этом отклонения зазора значительно меньше, чем аналогичные отклонения, которые имели место при использовании приводов предыдущего поколения. Благодаря этому, а также высокому быстродействию линейных приводов обеспечивается существенный рост производительности, который по некоторым данным (например, Sodick) достигает 40 – 200% в зависимости от выполняемого вида работ. Использование приводов электроэрозионных станков нового поколения подтвердило предположение советских ученых, высказанное более 30 лет назад, о возможности значительного повышения (в 5 – 10 раз) производительности электроэрозионной обработки в случае использования сервосистем, обеспечивающих протекание нормального режима электроэрозионной обработки.

Выше рассматривались вопросы реализации автоматического регулирования для поддержания оптимального межэлектродного зазора. Определены косвенные параметры, воздействуя на которые появляется возможность управлять исполнительными органами электроэрозионного оборудования. Современное эрозионное оборудование дополнительно оснащается другими системами, обеспечивающими более стабильную обработку при выполнении различных видов работ, например, вырезании радиусных закруглений, ступенчатом резании, разрезании трубных заготовок и т.п. В каждом из приведенных случаев подключаются системы регулирования, которые не только изменяют скорость перемещения электродов, но и управляют напряжением, величиной тока в импульсе, энергией импульса, снижают скорость прокачки рабочей жидкости через МЭП, осуществляют релаксации ЭИ. Благодаря этому при некотором снижении съема металла в местах, где обработка затруднена, достигается более высокое качество поверхностей и точность, а вероятность возникновения коротких замыканий между электродом-инструментом и заготовкой, обрыв проволочного ЭИ и другие негативные факторы, препятствующие обработке, устраняются практически полностью.

1.8. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ

Важная роль в процессе электроэрозионной обработки принадлежит рабочим жидкостям. Они должны обеспечить выбранные технологические показатели обработки, поддерживать электрические и энергетические параметры обработки в заданных пределах, обладать низкой коррозионной активностью к материалу электрода-инструмента, заготовки и элементам станка и т.д.

Наиболее часто в электроэрозионных вырезных станках в качестве диэлектрика при черновой обработке используется вода, при выполнении точных работ и при чистовой обработке применяются специальные жидкости, в станках для объемного копирования (прошивочных) и для контурной обработки – углеводородные диэлектрики (масла различных марок, специальные углеводородные среды). Электропроводность воды должна составлять $(4-5) \times 10^{-4} \Omega^{-1} \times \text{см}^{-1}$ при черновой обработке, и $(3-4) \times 10^{-4} \Omega^{-1} \times \text{см}^{-1}$ – при чистовой обработке, при обработке твердых сплавов – около $0,4 \times 10^{-8} \Omega^{-1} \times \text{см}^{-1}$. Применение специальных систем выхаживания позволяет проводить обработку, не уменьшая перед чистовыми проходами удельную проводимость воды. Вязкость рабочих жидкостей при выполнении черновой обработки должна быть около $(5-8) \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, а на чистовых режимах – $(1,5-3) \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Применение воды обеспечивает высокую производительность вырезной электроэрозионной обработки ($310 - 360 \text{ мм}^2/\text{мин}$ до $550 \text{ мм}^2/\text{мин}$ – для вырезных станков Sodick, Mitsubishi, Charmilles), однако вода оказывает значительное коррозионное воздействие на все поверхности обрабатываемой детали, особенно на поверхность вырезаемого контура, имеет место электролитическая эрозия поверхностей, а также выпадение кобальта при обработке твердых сплавов. Для уменьшения влияния перечисленных факторов, а также ускорения процесса деионизации МЭП в воду добавляют ионообменную смолу. Масло и специальные углеводородные жидкости в качестве среды для электроэрозионной обработки значительно привлекательнее воды, т.к. отсутствуют перечисленные выше недостатки, а также значительно уменьшаются величины межэлектродных зазоров, поскольку высокое удельное сопротивление позволяет генерировать очень малые (доли Дж по энергии импульсов) искровые разряды. Это наиболее важно при вырезании прецизионного инструмента и деталей малых размеров. При этом качество и стойкость поверхности инструмента после резания в масле существенно выше по сравнению с вырезанием в воде.

В вырезных станках российского производства используются, в основном, вода, керосин, масла различных марок, другие углеводородные среды.

В целях получения заданной электропроводности и уменьшения коррозионного воздействия воды на элементы оборудования и заготовки в нее вводят 0,02 – 0,06% NaNO_2 и такое же количество $\text{N}(\text{C}_2\text{OH})$. Для уменьшения шероховатости обработанной поверхности в воду добавляют до 4% кальцинированной соды, а для уменьшения коррозии применяют добавки уротропина.

В импортном оборудовании используются диэлектрические среды, разработанные каждым изготовителем для определенных типов своих станков. При этом в большинстве импортного оборудования также могут применяться углеводородные жидкости РЖ-3, РЖ-8, производимые в России (АО «ЭНИМС»).

Основными характеристиками диэлектрических жидкостей являются: вязкость, температура вспышки и температура начала кипения, испаряемость, фильтруемость, химическая агрессивность, токсичность. Для станков российского производства предпочтительно использование нафтенопарафиновых фракций с преобладанием нафтенов и минимальным содержанием ароматических углеводородов, асфальто-смолистых, сернистых и кислотных соединений, которые, обеспечивая получение высоких технологических показателей, не имеют неприятного запаха, образуют при разложении меньше токсичных веществ и твердых продуктов, причем образующиеся твердые продукты быстро осаждаются, улучшая этим очистку рабочей жидкости.

Для работ в диапазоне токов от 0,5А до 65А может быть рекомендована «Рабочая жидкость РЖ-3 для электроэрозионных станков» с температурой вспышки 80°С и вязкостью 2,9 сСт (по ТУ38.101964-83) и сырье углеводородное для производства сульфанола с температурой вспышки 62°С и вязкостью 2,2 сСт (по ТУ 38.101845-80 с изменением №1). Эти жидкости обладают улучшенной осаждаемостью.

Если работы ведутся на грубых режимах с токами свыше 80А при нижнем пределе тока 10А, может использоваться «Основа рабочей жидкости для электроэрозионных станков РЖ-8» с температурой вспышки 125°С и вязкостью 6-8 сСт. Допускается при работах на грубых режимах использование смеси осветительного керосина КО-30 и индустриального масла И12А (ГОСТ 20799-88 с изм. 5 1-2001) в соотношении 2:1 или 1:1.

Для вырезных станков обычная вода при прохождении через ионообменную смолу деионизируется. В качестве ионообменной смолы может применяться смола МВ-2 (пр-ва Японии), Ion-Exchange Resin (Германия), смола АО "НИИ ПМ" (г. Москва, Россия) и др. Обычный расход смолы составляет до 200 г на 100 л воды для работы

станка на рекомендованных режимах в течение 1 – 2 месяцев при двухсменной работе.

Вода как диэлектрик обеспечивает при вырезной обработке высокую скорость резания. Однако ее свойства не позволяют снижать энергию разрядов в резе и уменьшить межэлектродный зазор, что бывает необходимо для вырезки сложных контуров с очень мелкими деталями, для которых требуется уменьшать ширину реза, например, при обработке деталей микродвигателей, в микроэлектронике, микрооптике, для изготовления штампов, литьевых и прессовых форм повышенной точности.

Углеводородные диэлектрики допускают обработку с малыми зазорами, что повышает точность обработки. Углерод из рабочей среды диффундирует в поверхностный слой заготовки и за счет карбидизации увеличивается его твердость. Благодаря этому удается избежать аномальных разрядов и уменьшить износ электрода, облегчается контроль над образованием импульсных разрядов. При использовании углеводородных диэлектриков производительность обработки невысока.

Резание в углеводородном диэлектрике позволяет, в сравнении с обработкой в воде, повысить твердость обработанной поверхности на несколько (2...7 и более) единиц по Роквеллу по сравнению с твердостью основного материала заготовки. Улучшается также и структура поверхностного слоя.

Скорости съема металла при резании в углеводородном диэлектрике обычно не превышают 50 – 60 мм²/мин, что намного меньше, чем при резании в водяном диэлектрике. Это явно недостаточно при вырезании контуров с большой длиной резания.

Чтобы совместить скорость и качество обработки некоторые электроэрозионные станки, рассчитанные на обработку преимущественно крупных заготовок, комплектуются комбинированными диэлектрическими системами. В состав установки входит собственно вырезной станок, система ЧПУ и генератор импульсов, собранные в общей стойке и два диэлектрических агрегата, каждый из которых содержит соответствующую рабочую жидкость. Например, для черновой обработки применяют воду с добавками ионообменной смолы, а при чистовой обработке – масло (30 Neutral).

Принцип работы электроэрозионной установки, снабженной двойной диэлектрической системой, показан на рис. 1.66: во время скоростного первого прохода работает водяной диэлектрический агрегат 2, подавая рабочую жидкость в МЭП. При

этом достигается высокая скорость обработки. Для окончательных проходов и при обработке сложных контуров вода сливается в диэлектрический агрегат, затем по команде ЧПУ кран 4 переключается и в ванну 5 подается специальная рабочая среда из другого агрегата 3. Такая система обеспечивает получение параметров шероховатости поверхностей деталей 0,04 – 0,08 мкм (по Ra) после 8...12 чистовых проходов за счет использования специальной диэлектрической жидкости и последовательного перехода через ряд ступеней режимов обработки.

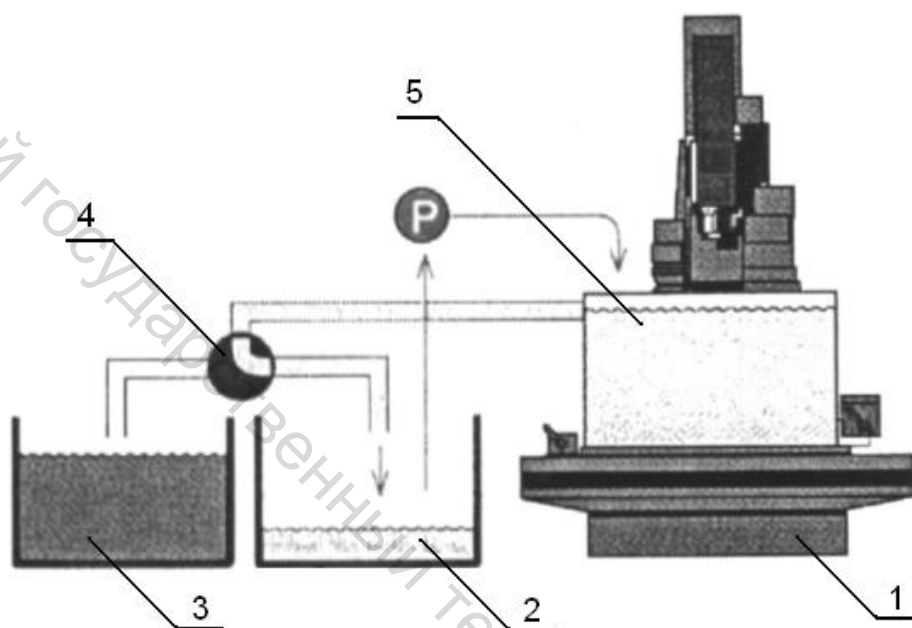


Рис.1.66. Устройство и работа прошивочной установки, оснащённой двойной диэлектрической системой: 1 – станина, 2 – резервуар с обычной диэлектрической средой, 3 – специальная углеводородная жидкость, 4 – кран, 5 – рабочая ванна

В качестве диэлектрических жидкостей в импортном электроэрозионном оборудовании применяются вода с добавками антикоррозийного раствора и ионообменной смолы, углеводородные рабочие жидкости (Sorepi LM, Vitol – KS, IME MH – Ionopuls, масла различных марок – ESSO, Shell, BP и др.), специальные углеводородные жидкости для полирования (Vitol – 10 и др.) с порошковыми добавками.

Следует учитывать особенности поведения диэлектрических жидкостей при электроэрозионной обработке. Углеводородные жидкости при воздействии импульсных разрядов воспламеняются, их пары токсичны, поэтому следует предусматривать всасывание паров.

Поскольку вода является источником мощной коррозии, часть станков, особенно японского и швейцарского производства, оснащаются системами подавления электролитической эрозии и быстрого выхаживания – BS-II, Super BS (по

сокращению слов «beautiful surface» – прекрасная поверхность) и др. Сравнение характеристик электроэрозионного вырезания в воде и масле приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

	ЭЭ РЕЗАНИЕ В ВОДЕ	ЭЭ РЕЗАНИЕ В МАСЛЕ
Скорость обработки	310 мм ² /мин	60 мм ² /мин
Наименьшая достижимая шероховатость поверхности	1 мкм R _{max} (< 0,13 мкм Ra)	< 0,5 мкм R _{max} (< 0,06 мкм Ra)
Наименьший межэлектродный зазор	10 – 20 мкм	1 – 10 мкм
Достижимая точность обработки	± 5 мкм	± 2,5 мкм
Достижимая прямолинейность	± 2 мкм	± 1 мкм
Достижимая угловая точность	0,001 ⁰	0,0005 ⁰
Модифицированный слой (твердость слоя на стали)	1000 HV*	1300 HV (до 1600 HV)
Модифицированный слой (выпадение карбидов)	имеет место выпадение кобальта**	выпадения кобальта нет
Коррозия	наблюдается***	отсутствует
Ионообменная смола	необходима	не требуется
Обработка с проволокой d < 0,1 мм (для вырезания мелких элементов)	затруднена и нестабильна (из-за большого зазора работа с тонкой проволокой малоэффективна)	углеводородная среда обеспечивает обработку проволокой малых диаметров
* - С системой Super BS измененный слой имеет меньшую толщину (~1 мкм) ** - С системой Super BS выпадение кобальта практически не происходит *** - Super BS обеспечивает подавление коррозии		

Электроэрозионное резание в воде в определенной степени сопровождается электролитической эрозией и коррозией, снижающей качество и твердость поверхности реза. Использование специальных добавок позволяет улучшить качество вырезания, что особенно важно при обработке заготовок сложных форм малых размеров (рис.1.67).

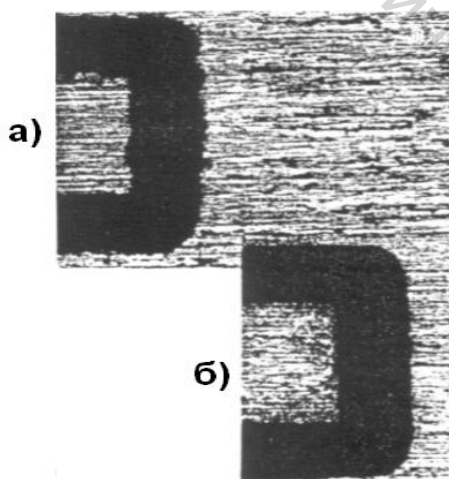


Рис. 1.67. Качество реза в обычной воде и с использованием специальных сред: а – обычный рез, б – рез с системой BS-2. (Увеличение x300) Материал: инструментальная сталь (NAK 55), диэлектрик: вода – $5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \times \text{см}^{-1}$

В наибольшей степени *отрицательный эффект электролиза* проявляется при обработке твердых сплавов (например, карбида вольфрама), где анодное окисление разрушает кобальт, служащий связкой. Механизм действия электролитической эрозии показан на рис. 1.68. В соответствии со схемой обработки (рис. 1.68, а) проволочный ЭИ 5 и заготовка 2 включены в цепь источника питания 7, между ними возникают импульсные разряды. Через верхнее сопло 4 системы прокачки рабочей жидкости в межэлектродный зазор поступает вода, после прохождения зоны обработки она захватывается нижним соплом 1 и уносится на очистку. В результате протекания импульсного разряда в пределах МЭП, измеряемого долями миллиметра (рис. 1.68, б), образуются ионы 4, часть которых сохраняется после прекращения разряда. Наличие ионов приводит к тому, что вода начинает разрушать межкристаллитные границы обрабатываемого материала, что особенно вредно сказывается на свойствах твердых сплавов.

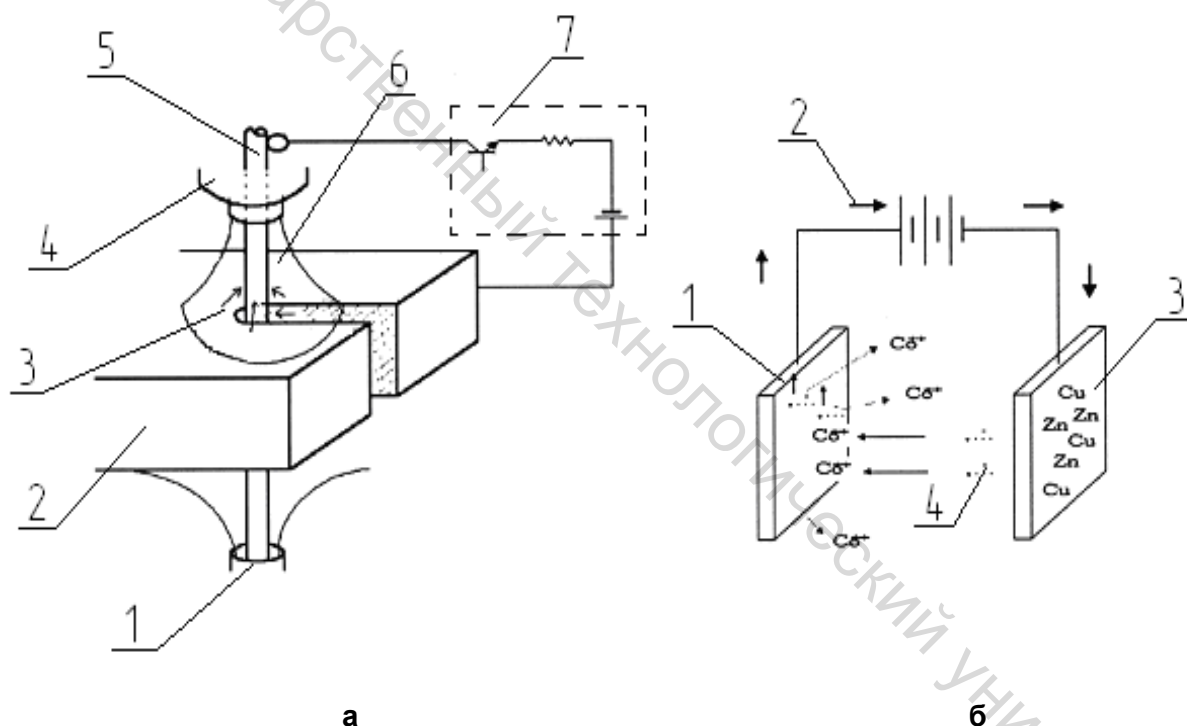


Рис. 1.68. Механизм анодного окисления при обработке твердых сплавов:
а – схема обработки: 1 – нижнее сопло системы прокачки рабочей жидкости, 2 – заготовка, 3 – направление тока анодного окисления, 4 – верхнее сопло системы прокачки рабочей жидкости, 5 – проволока, 6 – рабочая жидкость, 7 – генератор импульсов, **б** – схема выпадения кобальта в твёрдом сплаве: 1 – анод (деталь из карбида вольфрама), 2 – ток анодного окисления, 3 – катод (латунная проволока), 4 – ионизированная рабочая жидкость (вода)

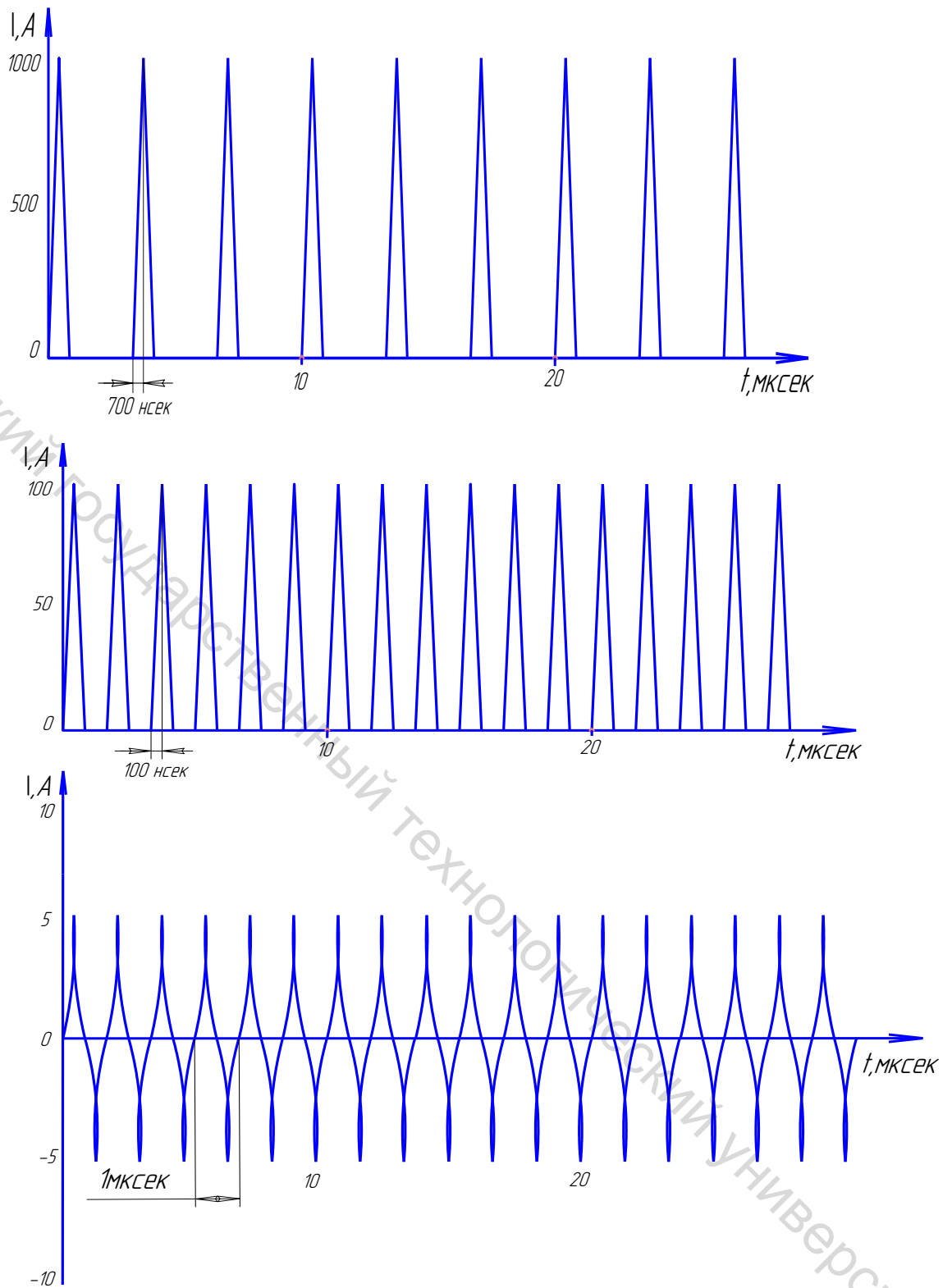
Для уменьшения, а в ряде случаев, и полного устранения условий электролитической эрозии применяют импульсы сверхмалой длительности (10^{-6} с) и биполярные импульсы. До недавнего времени в известных схемах подавления эрозии использовались противоимпульсы малой длительности (вспомогательные или защитные импульсы), длительность которых составляла около 10^{-4} с. Использование импульсов такой длительности при выполнении обработки в воде позволяло несколько уменьшить выпадение кобальта из твердых сплавов.

Принцип работы антиэлектролизных систем заключается в следующем.

На первом проходе используются особо короткие импульсы с шириной фронта 700 нс при пиковом токе более 950А (рис. 1.69). На втором проходе система доводочной обработки снижает фронт импульсов до 100 нс, поддерживая ток 90А. На третьем проходе ток в импульсе не превышает 5А при длительности 1 мкс.

Использование импульсов приведенной формы и длительности позволяет получать изделия, шероховатость поверхностей которых составляет 0,7 мкм (Ra) на втором проходе. Начиная с 3-го прохода, после включения в цепи генератора импульсов схемы коротких биполярных импульсов тока получают поверхности с шероховатостью $\approx 0,18$ мкм Ra при последующих проходах. Вырезание как на грубых, так и на чистовых режимах при использовании систем доводки и полирования производится при удельном сопротивлении воды около $50 \text{ к}\Omega \times \text{см}$, благодаря чему уменьшается расход ионообменной смолы.

Достоинства приведенной системы не ограничиваются тем, что удается бороться с электролизом и коррозией. Такие системы очень эффективно работают при чистовом выхаживании поверхности. Чтобы получить при электроэрозионном вырезании заготовок из стали поверхность, шероховатость которой 0,18 мкм (Ra), нужно только 4 прохода, а для достижения шероховатости 0,32 мкм (Ra) – всего 3. Ранее для достижения таких показателей необходимо было затрачивать более шести проходов. Очевидно, имеет место существенная экономия расходных материалов, электроэнергии, снижается стоимость изготовления деталей и т.п.



**Рис.1.69. Параметры импульсов при работе антиэлектролизной системы:
на первом, втором и третьем проходе (сверху вниз)**

1.9. ПРОКАЧКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Производительность и устойчивость обработки, а также достижение высоких результатов по шероховатости и точности возможны только при создании хороших условий циркуляции (прокачки) диэлектрической жидкости через межэлектродный промежуток. При этом отходы материала заготовки, диэлектрика и газы должны быть немедленно удалены из зазора между ЭИ и заготовкой. В противном случае возможно изменение электрического сопротивления в МЭП и возникновение аномальных разрядов.

При объемном копировании различают два типа прокачки:

- прокачка инжекцией или созданием избыточного давления в МЭП (рис. 1.70);
- прокачка отсасыванием (отсосом) (рис. 1.71).

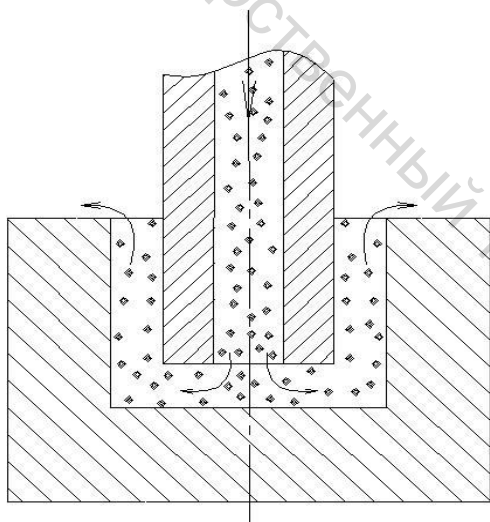


Рис. 1.70. Прокачка рабочей жидкости созданием избыточного давления

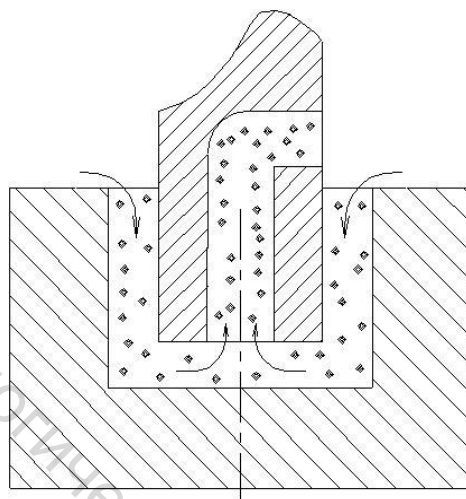


Рис. 1.71. Отсос рабочей жидкости через отверстие в электроде-инструменте

В процессе прокачки может иметь место также паразитная эрозия при эвакуации частиц диэлектриком, что приводит к изменению профиля обрабатываемой поверхности. В случае подачи рабочей жидкости 4 под давлением через отверстие в ЭИ 2 (рис. 1.72 а) эрозированные частицы удаляются практически одинаково по всему зазору между электродами. Искажение профиля при этом будет одинаковым по всей прошиваемой полости. Если рабочую жидкость 4 (рис. 1.72, б) подавать в МЭП через сопло струйной прокачки 5, концентрация эрозированных частиц 3 со стороны, противоположной установке сопла прокачки, будет вы-

ше. Это приведет к одностороннему искажению профиля прошиваемого отверстия или полости. Приведенные особенности удаления продуктов эрозии необходимо учитывать при выборе типа прокачки и изготовлении отверстий для ее осуществления.

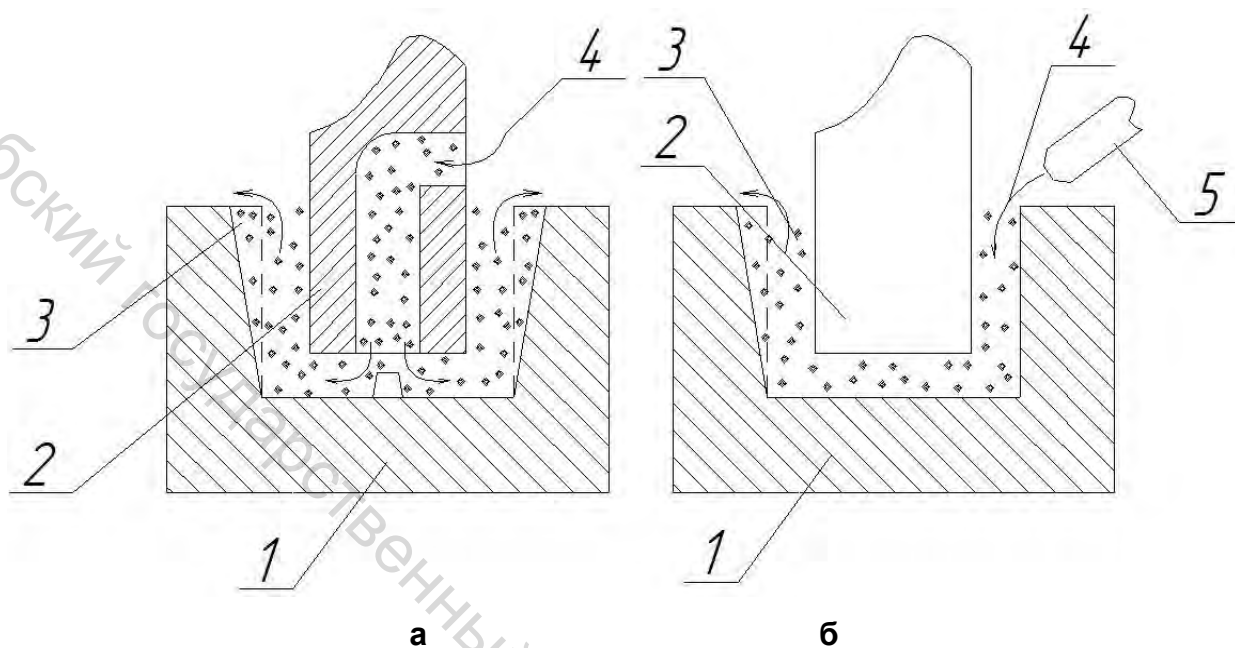


Рис. 1.72. Паразитная эрозия при прокачке диэлектрической жидкости:
а – через отверстие в ЭИ: 1 – заготовка, 2 – электрод–инструмент, 3 – эрози-
рованные частицы, 4 – рабочая жидкость,

б – через сопло для струйной прокачки: 1 – заготовка, 2 – электрод–
инструмент, 3 – эрозированные частицы, 4 – рабочая жидкость, 5 – сопло

При обработке некоторых деталей в них изготавливают сквозные отверстия. Прокачка рабочей жидкости через отверстие в детали позволяет намного улучшить условия циркуляции диэлектрика (рис. 1.73) и практически полностью устранить паразитную эрозию в МЭП.

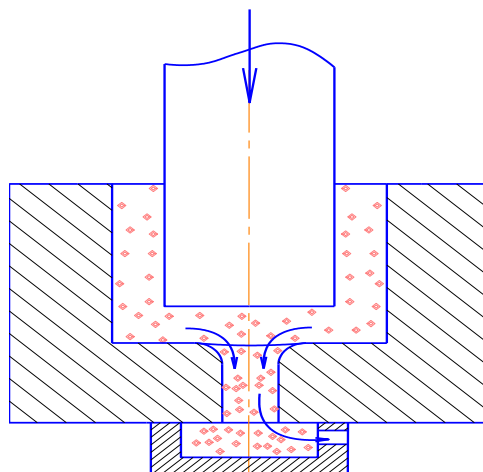


Рис.1.73. Вариант прокачки диэлектрика через отверстие в детали

При вырезании и контурной обработке прокачка должна осуществляться вдоль проволоки или другого инструмента.

При следовании разрядов образуются продукты, загрязняющие МЭП: твердый шлам (металлические частицы + сажа) и газы (газообразные продукты пиролиза рабочей жидкости). Если рабочая жидкость – масло, основные продукты пиролиза (высокотемпературного распада жидкости) – водород (около 50%), а также этилен и ацетилен. Эвакуация продуктов электрической эрозии – проблема, известная с того времени, как появились первые электроэрозионные станки.

Традиционно продукты удаляются направленной струей диэлектрика, подаваемой под давлением через сопло, а также через технологические отверстия в электроде или заготовке. Более интенсивно удаление продуктов электрической эрозии происходит в момент релаксации электрода. Также известны методы «струйной прокачки», «форсированной прокачки» (при большом давлении) или «струйной промывки» (при малом давлении).

Удалить все продукты электрической эрозии материала из МЭП затруднительно. Некоторая их часть остается в зазоре между ЭИ и заготовкой. В результате наблюдаются вторичные разряды через металлические частицы, что приводит к повышенному и неравномерному износу электрода и браку на детали. На рис. 1.74 показаны положения, которые занимают ЭИ и заготовка при релаксации электрода с целью промывки МЭП (слева) и при обработке после окончания релаксации (на рис. справа). Несмотря на то, что при механических релаксациях электрод-инструмент 2 удаляется из полости в заготовке 1, а с помощью рабочей жидкости 3, подаваемой из сопла струйной прокачки 4 в образовавшийся зазор поступает обновленная жидкость, полностью удалить эрозированные частицы 5 не удастся. Причем особенно трудно удаляются мелкодисперсные частицы шлама. После промывки ЭИ вновь входит в зону обработки, однако некоторая часть частиц остается в прошиваемой полости, причем располагается более кучно со стороны, противоположной установке сопла струйной прокачки. В местах скопления частиц шлама наблюдается искажение профиля обрабатываемого отверстия или полости в заготовке.

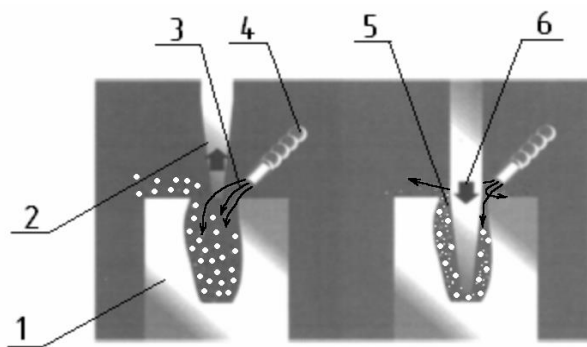


Рис. 1.74. Влияние прокачки на эрозию заготовки: 1 – заготовка, 2 – электрод–инструмент, 3 – рабочая жидкость, 4 – насадка для подачи рабочей жидкости, 5 – эрозированные частицы, 6 – направление релаксации инструмента

во многом зависят от опыта оператора. Со струйной прокачкой невозможно добиться равномерного зазора между электродом и заготовкой.

К традиционным методам прокачки диэлектрических жидкостей в последнее время добавился еще один способ. Сущность способа заключается в следующем.

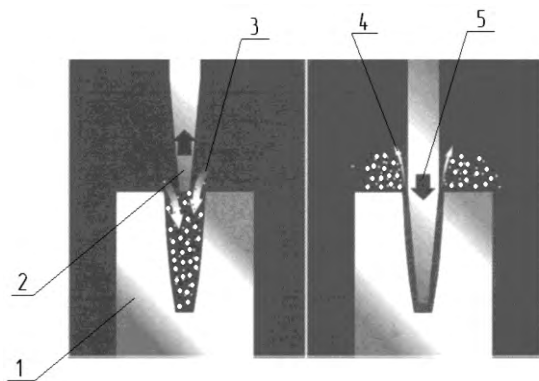


Рис. 1.75. Быстрые релаксации ЭИ: 1 – заготовка, 2 – электрод–инструмент, 3 – направление течения рабочей жидкости при быстрых релаксациях, 4 – направление выноса эрозированных частиц, 5 – направление релаксаций

Если продукты вообще не удалять, то в местах скопления их образуется «гнездо разрядов», приводящее к перегреву электрода, появлению коротких замыканий и образованию наростов на электроде и на детали в виде шлака (зашлаковыванию). Организация прокачки в каждом случае зависит от формы электрода, глубины и направления обработки и для каждого случая обработки подбирается индивидуально. Во многих случаях организовать прокачку слишком сложно, часто – невозможно. Результаты обработки

Движение электродов-инструментов в последних моделях некоторых станков осуществляется от линейных двигателей, причем скорость может достигать 600 мм/сек и более с ускорением до 1,89G. Динамически перемещаясь, электрод 2 при этом работает как поршень насоса, эвакуируя продукты электрической эрозии 4 намного эффективнее струйной прокачки (рис. 1.75), что объясняется помповым эффектом быстрых релаксаций 5. Такие движения электрода обеспечивают вымывание шлама, поэтому отпадает необходимость в дополнительной прокачке.

Эффективность использования приведенного метода эвакуации продуктов обработки показана на рис. 1.76. На рисунке показаны зависимости трудоемкости обработки полости при различных видах прокачки рабочей жидкости через МЭП.

Наиболее трудоемкой операцией, занимающей 4 ч. 34 мин., является прошивание полости только с релаксациями без использования промывки МЭП струей диэлектрика. Дополнительная промывка МЭП позволяет не только сократить (до 3 часов) время на обработку, но и прошить за меньшее время полость большей глубины. Время обработки полости на станке с линейным приводом сокращается до 2 час. 15 мин.

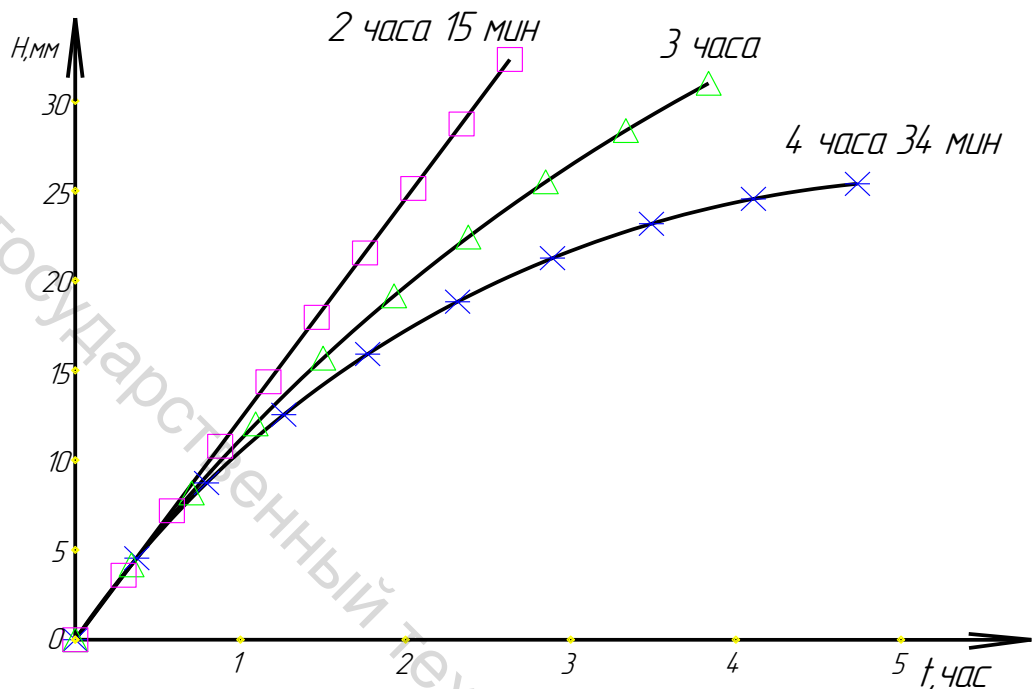


Рис. 1.76. Зависимость трудоемкости обработки полости от вида прокачки рабочей жидкости: □ – обработка на станке с линейным приводом без прокачки (релаксации 36 м/мин), Δ – обработка с релаксациями 1 м/мин (прокачка при давлении 0,05 МПа), * – обработка с релаксациями 1 м/мин (без прокачки)

Из приведенных зависимостей следует, что появляется возможность существенно сократить (в 1,3...2 раза) время при прошивании полости по сравнению с традиционными методами прокачки жидкости и удаления шлама. Кроме этого, практически независимо от глубины обработки повышается точность обработки деталей и уменьшается величина боковых зазоров между электродом и деталью (рис. 1.77).

Использование нового способа прокачки рабочей жидкости позволяет не только сократить время на обработку поверхности, но и согласно опытным данным производителей и пользователей электроэрозионного оборудования выполнять работы, которые ранее осуществить было невозможно либо затруднительно. Это относится, например, к прошиванию тонких глубоких пазов и щелей. Применение линейных приводов с лазерными датчиками контроля линейного положения

рабочих органов в настоящее время обеспечивает прошивочную обработку пазов шириной 0,4 – 1,7 мм и длиной 100 мм и более на глубину свыше 70 мм. Ранее выполнять такую обработку не представлялось возможным, т.к. величина люфтов в механизмах привода в ряде случаев была сравнима с величиной межэлектродного зазора, при которой обеспечить стабильность эрозии не удавалось.

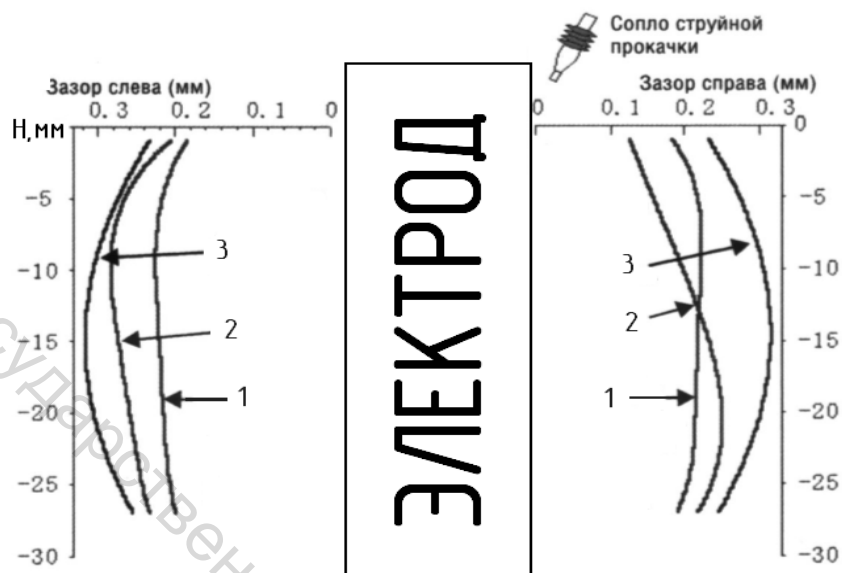


Рис. 1.77. Прокачка диэлектрика и величина МЭП при различной глубине обработки:

1 – на станке Sodick с линейными приводами (без прокачки с релаксациями),

2 – релаксации 1 м/мин с прокачкой при давлении 0,05 МПа,

3 – релаксации 1 м/мин обработка без прокачки

1.10. ЭЛЕКТРОДЫ-ИНСТРУМЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Материалы для ЭИ должны обеспечить устойчивость электроэрозионной обработки, получение деталей заданной геометрической формы требуемого качества, обладать высокой эрозионной стойкостью, теплопроводностью, малым переходным сопротивлением, низкой стоимостью, технологичными в обработке, не быть дефицитными.

Таким условиям соответствуют следующие материалы.

При вырезной электроэрозионной обработке:

- *латунная проволока, имеющая наиболее низкую из применяющихся материалов стоимость и малый относительный износ;*
- *медно-цинковая проволока, позволяющая увеличить съём материала по сравнению с латунной проволокой благодаря более высокой теплопроводности медного покрытия;*
- *молибденовая проволока, обеспечивающая получение тонкого реза за счет высоких механических характеристик и эрозионной стойкости.*

В настоящее время выпускается и применяется в различных отраслях промышленности проволока диаметром от 0,03 до 0,36 мм. Стандартной в машиностроении считается проволока диаметром 0,25 мм.

При прошивочной обработке (объемном копировании) перечисленным выше требованиям соответствуют и применяются:

- *металлические материалы;*
- *материалы на основе графита.*

К металлическим материалам относятся:

- *электролитическая медь, наиболее часто применяемая и обеспечивающая наилучшие условия обработки за счет высокой теплопроводности;*
- *композиции меди с вольфрамом, имеющие высокую стоимость, но незаменимые при обработке твердых сплавов, титана, вольфрама благодаря как высокой теплопроводности, так и эрозионной стойкости;*
- *медные сплавы, обладающие лучшей, по сравнению с медью, обрабатываемостью резанием и улучшенными литейными свойствами;*
- *серый чугун, используемый при обработке твердосплавных заготовок вращающимся электродом-инструментом;*

- *первичный алюминий и алюминиевые сплавы*, используемые для предварительной обработки отверстий и полостей в заготовках из сталей и жаропрочных материалов.

Электродные материалы на основе меди составляют основную часть применяемых металлических материалов. Наиболее часто используется электролитическая медь марок М1 и М2, имеющая высокую электро- и теплопроводность и выпускающаяся в виде листов, полос, лент, прутков. Медные ЭИ должны иметь при обработке сталей и твердых сплавов при $f \leq 44$ кГц ($t_{\text{и}} > 20$ мкс) прямую полярность. При обратной полярности медного ЭИ скорость съема материала значительно снижается при увеличении износа независимо от соотношения амплитуды импульса тока к его длительности. Износ компактных ЭИ из меди с увеличением скорости течения (расхода) жидкости в МЭП увеличивается (в отличие от пористых медных и графитовых ЭИ). Для уменьшения износа ЭИ из меди следует поддерживать давление прокачки и скорость протекания диэлектрика минимально возможными для достижения стабильного протекания процесса электроэрозионной обработки. Электроды-инструменты из меди применяют при обработке деталей из твердых сплавов, прошивочной обработке узких полостей и отверстий малого диаметра, при чистовой обработке заготовок.

Применение *ЭИ из меди с пористой структурой* (материал МП-15) позволяет на режимах с прямоугольной формой импульсов до 1,5 раз по сравнению с электродами из меди М1 повысить скорость съема материала детали и стойкость ЭИ.

В настоящее время используются также *композиционные материалы на основе меди с дисперсными добавками окислов, боридов, нитридов*, предназначенные для изготовления электродов-инструментов методами порошковой металлургии. Они позволяют повысить эксплуатационные свойства ЭИ. Лучшими из них являются электроды-инструменты из композиционного материала КМК-Б20 (70% вольфрама и 30% меди), позволяющие повысить до 2-3 раз скорость съема материала детали и стойкость ЭИ. В практике электроэрозионной обработки твердых сплавов применяются ЭИ из композиции МНБ-3, в состав которой входит 97% меди и 3% нитрида бора. Применение методов порошковой металлургии при изготовлении больших партий ЭИ из композиционных материалов позволяет существенно повысить экономическую эффективность электроэрозионной обработки деталей из твердых, жаропрочных и титановых сплавов, а также термически обработанных сталей.

ЭИ из композиций меди с вольфрамом используются для обработки деталей повышенной точности из твердых сплавов, тугоплавких металлов и сплавов.

Латунь ЛС-59-1 имеет ограниченное применение при обработке закрытых полостей из-за пониженной до 1,5 – 3 раз эрозионной стойкости по сравнению с медью. Однако ЭИ из латуни применяются при обработке сквозных полостей и отверстий вследствие того, что по сравнению с электродами-инструментами из меди скорость съема материала детали увеличивается на 20 – 40%. *Латунные ЭИ применяются в ряде случаев на доводочных режимах при электроэрозионной обработке твердосплавных фасонных деталей.* Это обстоятельство объясняется тем, что при доводке наблюдается повышенный относительный износ, равный 200 – 350% объема удаленного материала твердого сплава. ЭИ из латуни быстро прирабатываются к поверхности, точно воспроизводя контуры детали, а после приработки протекает собственно процесс доводки поверхности. Преимуществом латуни ЛС-59 по сравнению с медью является ее лучшая обрабатываемость резанием.

Из графитовых материалов наиболее широко используются:

- *графит*, обеспечивающий вследствие высокой эрозионной стойкости больший по сравнению с ЭИ из меди съем материала и малую шероховатость поверхности;
- *графито-полимерные композиции* для изготовления сложных по форме ЭИ.

Графитовые материалы рекомендуется применять в зависимости от их плотности (пористости), гранулометрических характеристик (размеров зерен и пор), прочностных свойств.

Для черновых режимов повышение скорости съема материала детали достигается применением графитовых ЭИ с большими значениями размеров зерен, пор и пористости. Уменьшение средних размеров зерен и увеличение плотности графитовых ЭИ приводит к повышению их прочности, тепло- и электропроводности, что обеспечивает повышение стойкости, а также качества обработанной поверхности и скорости съема материала детали на чистовых и получистовых режимах обработки.

На работоспособность электродов-инструментов из графита влияет прокачка диэлектрика. Расход рабочей жидкости должен быть $\geq 0,1 - 0,2 \text{ см}^3/\text{с}$ на 1 см^2 обрабатываемой поверхности. Основным методом формообразования графитовых ЭИ до недавнего времени был слесарно-механический (вихревое копирование инструментами, обработанными на электроэрозионных станках при уста-

новке грубых режимов, шаржирование алмазной крошкой и т.п.). В настоящее время наиболее часто при изготовлении ЭИ из графита применяют высокоскоростное фрезерование и электроэрозионные методы обработки: вырезание проволочным инструментом, объемное копирование, контурную обработку.

Некоторые типы фасонных электродов-инструментов получают методами порошковой металлургии, например, прессованием порошка графита и полимерного связующего с последующим спеканием при температуре свыше 1300°С (до 1800°С). Необходимость использования специального оборудования и оснастки ограничивает их область применения обработкой на черновых режимах при большой серийности деталей из жаропрочных сталей и сплавов.

При изготовлении электродов-инструментов для прошивочной обработки следует выбрать не только материал ЭИ, но и определенное сочетание материала ЭИ и заготовки. Для этого необходимо знать и учитывать:

- материал обрабатываемой детали;
- цену материала инструмента;
- возможные варианты и режимы обработки поверхности;
- количество электродов для обработки (чистовой, черновой и др.);
- наличие системы автоматической смены инструмента и магазина инструментов для проектирования базовых поверхностей и хвостовиков электродов.

Выбор материала ЭИ производится следующим образом. По таблицам технологических инструкций или по результатам тестовых испытаний *подбираются электрический и гидродинамический режимы обработки в совокупности с материалом и методом изготовления ЭИ. Основным критерием этого выбора является минимальная величина стоимости электроэрозионной обработки, рассчитанная следующим образом:*

$$C_{\text{ЭЭО}} = C_{\text{ст}} \cdot T_{\text{шт}} + T_{\text{см}} + \frac{C_{\text{м}} + C_{\text{ф}} + C_{\text{н}}}{\Pi}, \quad (1.12)$$

где $C_{\text{ст}}$ - стоимость станкоминуты, руб./мин;

$C_{\text{м}}, C_{\text{ф}}, C_{\text{н}}$ - стоимость материала, операций формообразования и

накладные расходы при изготовлении ЭИ, руб.;

Π - количество поверхностей, обрабатываемых одним ЭИ;

$T_{\text{см}}$ - время смены ЭИ и его наладки, мин;

$T_{шт}$ - штучно-калькуляционное время, мин;

На практике в большинстве случаев принимается $T_{шт} \approx (1 \div 1,2) \cdot T_o$,

где T_o - основное (технологическое) время, которое находят как сумму

для « n » переходов (режимов)

$$T_o = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{M_{ai} \cdot I_{раб.i} \cdot k_{\phi i}} \cdot (1 + k_p), \text{ мин} \quad (1.13)$$

где для i -го перехода (режима):

V_i - объем удаляемого материала, мм³;

M_{ai} - нормативная удельная скорость съема материала детали (по технологической инструкции или тестовым испытаниям), мм³/мин;

$I_{раб.i}$ - величина среднего рабочего тока, А;

$k_{\phi i}$ - коэффициент снижения производительности при ЭО фасонной полости (обычно $k_{\phi i} \approx 0,7-0,9$);

k_{pi} - коэффициент релаксации (отвода) ЭИ ($k_{pi} = \frac{\tau_{рсп}}{\tau_{раб}}$)

Номинальный размер ЭИ определяется выражением

$$B = A - 2(\delta + z_{\delta} + z_o), \quad (1.14)$$

где A – требуемый размер детали;

δ – величина межэлектродного зазора;

z_{δ} – толщина слоя, который необходимо снять для удаления по-

верхностных неровностей и дефектного поверхностного слоя, полученных на выполняемом переходе;

z_o – толщина слоя металла, компенсирующего погрешности обра-

ботки.

Каждому сочетанию электрических, гидродинамических и геометрических параметров процесса обработки соответствуют определенные значения δ, z_{δ}, z_0 .

Полученное значение себестоимости электроэрозионной обработки используют в дальнейшем при сравнении различных методов обработки, а в случае невозможности обработки поверхности иными методами – при расчете себестоимости изготовления готовой детали.

Электрод-инструмент для прошивочной обработки состоит из рабочей части, поверхность которой участвует в формообразовании, и вспомогательных элементов, базовые поверхности которых служат для его установки, выверки и закрепления в шпинделе станка. Формообразование рабочей поверхности ЭИ осуществляется различными методами: слесарно-механическим, электроэрозионным по методу копирования или вырезанием, а также гальванопластикой. Рабочая часть ЭИ для объемного копирования является негативной копией обрабатываемой поверхности с размерами, уменьшенными на величину межэлектродного зазора, припуска на последующую обработку и скорректированными, при наличии орбитального движения, на величину его амплитуды.

Раздел 2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Технологию рассматривают, во-первых, как совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката в процессе производства, а во-вторых, как науку о способах воздействия на сырье, материалы или полуфабрикаты соответствующими орудиями производства.

Основные термины и определения, относящиеся к технологической подготовке производства, стандартизованы (ГОСТ 3.1109-82).

Методы обработки составляют обычно такую последовательность, в результате выполнения которой из заготовки или полуфабриката получают готовое изделие.

Полуфабрикатом называют изделие предприятия-поставщика, подлежащее дополнительной обработке и сборке. В качестве полуфабрикатов применяют заготовки, прошедшие частичную обработку.

Заготовкой называют предмет производства, из которого путем изменения формы, размеров, чистоты поверхности, свойств материала изготавливают деталь или неразъемную сборочную единицу.

Исходной заготовкой является заготовка перед обработкой. В качестве заготовок для электроэрозионной обработки применяют сортовой прокат различных видов (трубы, прутки, полосы, ленты), а также поковки, штампованные и литые заготовки из различных материалов (инструментальных, нержавеющей стали, твердых сплавов, магнитных и др. материалов).

Электроэрозионная обработка, наряду с другими видами обработки, входит в состав технологических операций, выполнение которых должно обеспечить требуемую размерную точность обработанных деталей и качество поверхностей. Качество поверхностей деталей после обработки в общем случае определяется макрогеометрией, шероховатостью, физико-механическими свойствами поверхностного слоя, его структурой и остаточными напряжениями. Приведенные параметры зависят от режимов электроэрозионной обработки. Режимы обработки подразделяют на черновые, чистовые и доводочные. *Обработку заготовок выполняют, последовательно переходя от черновых режимов обработки к чистовым и*

в ряде случаев – доводочным. Электроэрозионная обработка может производиться за одну или несколько операций, на одном или разных станках.

Черновые операции выполняют при условии достижения максимальной производительности. После черновой обработки получают грубую шероховатую поверхность. Поверхностный слой имеет физико-механические, химические свойства и структуру, отличающиеся от основной массы материала заготовки. Вследствие воздействия высоких температур в материале возникают внутренние напряжения.

Набор всех операций технологического процесса должен обеспечивать наряду с достижением требуемых параметров точности и качества и минимальные затраты времени на обработку.

Для выполнения всех операций технологического процесса обработки заготовок необходимо иметь оборудование и технологическую оснастку.

В качестве технологического оборудования при электроэрозионной обработке используют установки для вырезания, объемного копирования, прошивочной и контурной обработки.

К технологической оснастке для осуществления обработки относят орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части технологического процесса. К оснастке относятся электроды-инструменты, приспособления для установки и закрепления ЭИ и заготовок, выверки их положения и перемещения со станка на станок (спутники, сменщики и т.п.) и т.д.

Операции электроэрозионной обработки могут занимать различное место в процессе изготовления деталей. Наиболее целесообразно располагать их после термической обработки заготовок, либо в конце технологического процесса изготовления детали, обеспечивая как черновую, так и чистовую, а также доводочную обработку, а в ряде случаев, выполнять обработку заготовок за одну установку только на электроэрозионном оборудовании.

2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Основными показателями электроэрозионной обработки являются производительность и факторы, оказывающие влияние на ее изменение, точность обработки, качество поверхности и возможные способы его повышения. На произво-

длительность обработки оказывают влияние площадь обрабатываемой поверхности, состояние межэлектродного промежутка, обрабатываемость материала, энергия импульса, ток импульсного разряда и некоторые другие факторы. Точность обработки характеризуется степенью соответствия обработанной детали ее рабочему чертежу по геометрической форме и размерам. Качество поверхности определяется ее геометрией, структурой поверхностного слоя, остаточными напряжениями в нем и возможным упрочнением.

2.2.1. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

При прошивочной обработке (объемном копировании) в результате воздействия многократных импульсных разрядов на поверхность заготовки с нее удаляется слой материала. На обработанной поверхности воспроизводится форма обратная профилю электрода-инструмента. Производительность электроэрозионной обработки в этом случае определяется отношением объема или массы удаленного с заготовки материала ко времени обработки ($\text{мм}^3/\text{мин}$ или $\text{г}/\text{мин}$). В качестве критерия производительности при обработке непрофилированным электродом-инструментом (вырезной электроэрозионной обработке) принимают отношение площади боковой поверхности паза ко времени его вырезания ($\text{мм}^2/\text{мин}$). При этом площадь боковой поверхности паза определяется произведением длины пути, пройденного проволочным электродом-инструментом в направлении подачи за время обработки, на толщину заготовки.

На производительность электроэрозионной обработки оказывают влияние площадь обработки, состояние межэлектродного промежутка, количество холостых импульсов, характеристики импульсов, прокачка рабочей среды через межэлектродный зазор.

Кроме этого производительность обработки зависит от обрабатываемости данного материала, мощности, подводимой к межэлектродному промежутку, правильного сочетания материалов электрода-инструмента и заготовки.

Электроэрозионной обрабатываемостью называется сравнительная производительность обработки различных материалов при прочих равных условиях, а именно, параметрах импульсов тока, мощности, межэлектродных зазорах и т.д.

Электроэрозионная обрабатываемость зависит в основном от теплофизических констант материалов, температуры плавления и кипения, теплопроводности и теплоемкости. Зависимость электроэрозионной обрабатываемости от

теплофизических констант и параметров импульсов определяется материалом электрода-инструмента и заготовки и определенными их размерами.

Обработываемость различных материалов при постоянных условиях обработки может оцениваться критерием фазового превращения Палатника

$$П = C\lambda\gamma T_{пл}, \quad (2.1)$$

где **C** – теплоемкость;

λ – коэффициент теплопроводности;

γ – плотность материала;

$T_{пл}$ – приведенная температура плавления.

Данный критерий пропорционален времени и указывает, какой из металлов (электрода-инструмента или заготовки), находящийся в одинаковых условиях, раньше нагревается до температуры плавления. Для учета скрытой теплоты плавления в формуле указана приведенная температура плавления.

Чем больше критерий при равных условиях для различных материалов, тем выше эрозионная стойкость и соответственно ниже обрабатываемость металла.

При электроэрозионной обработке за количественную оценку принят коэффициент обрабатываемости, определяющий отношение производительности обработки данного материала к производительности обработки стали 45, при одинаковых условиях работы. Обработываемость стали 45 условно принята за единицу. Значения коэффициентов обрабатываемости при соответствующих параметрах режимов электроэрозионной обработки различных материалов для генераторов импульсов типа ШГИ приведены в таблице 2.1. Кроме этого в таблице указаны удельный съем, относительный износ ЭИ и шероховатость поверхности после обработки на заданной частоте и при определенной форме импульсов тока.

Углеродистые конструкционные, инструментальные и низколегированные стали как закаленные, так и незакаленные обрабатываются практически с одинаковой производительностью.

Серые чугуны, не включенные в приведенную таблицу, обрабатываются несколько хуже сталей из-за наличия включений графита, что приводит к локализации процесса эрозии на отдельных участках обрабатываемой поверхности.

Жаропрочные сплавы на основе никеля обладают лучшей обрабатываемостью по сравнению со сталями. Скорость съема для ряда жаропрочных сплавов на 30-50 – 200% превышает аналогичный показатель обрабатываемости обычных ста-

лей. Это связано с уменьшением температуропроводности жаропрочных материалов. Добавление тугоплавких компонентов в состав сплавов ухудшает обрабатываемость жаропрочных сплавов.

Алюминий и его сплавы по обрабатываемости близки к сплавам на основе никеля (жаропрочным). Скорость съема достаточно велика вследствие низкой температуры плавления алюминия.

Таблица 2.1

Обрабатываемый материал	Полярность	Материал ЭИ	Форма импульсов	Коэффициент обрабатываемости	Удельный съем металла, мм ³ /А×мин	Относительный износ ЭИ, %	Частота импульсов, кГц	Параметры шероховатости, Ra, мкм
Углеродистые, легированные коррозионно-стойкие стали и магнитные сплавы	Обратная	Медь	Прямоугольная	1,05 – 1,15	8 – 10	10 – 120	≥ 3	0,5
			Гребенчатая	–	6 – 8	0,2 – 10		
		Графит	Прямоугольная	1,1 – 1,25	10 – 12	0,1 – 40	≥ 8	–
			Гребенчатая	–	6 – 8	0,05 – 0,5		
Алюминиевые сплавы	Прямая	Медь	Прямоугольная	2,5 – 3	18 – 20	0,5 – 25	≥ 3	1,1 -1,3
			Гребенчатая	2,3 – 2,8	10 – 15	0,5 – 3		
		Графит	Прямоугольная	2,7 – 3,2	15 – 20	1 – 10		
			угольная	2,8 – 3,5	25 – 30	10 – 30		
Титановые сплавы	Обратная Прямая	Медь Графит	Прямоугольная	0,9 – 1 1 – 1,1	4 – 7 5 – 8	5 – 20 10 – 60	1 – 22 22 – 440	0,9 – 1,0
Твердые сплавы ВК	Обратная Прямая	Медь		0,3 – 0,35	1 – 2,5	25 – 40	1 – 22	0,25 – 0,35
		Медь		0,2 – 0,25	1,3 – 1,5	80 – 200		
		Латунь Сплав МНБ-3		0,3 – 0,35 0,4 – 0,5	1,5 – 2 2,6 – 3	120 – 500 35 – 50		
Тугоплавкие сплавы на основе никеля	Прямая	Медь	Прямоугольная	0,25 – 0,35	1 – 2	35 – 100	3 – 22	0,25 – 0,3
		Латунь		0,3 – 0,35	1,5 – 2,5	60 – 500		
		Сплав МНБ-3 Графит		0,4 – 0,5 –	2,5 – 4 5 – 10	15 – 60 25 – 40		
Медь и медные сплавы		Медь	Прямоугольная	0,5 – 0,7	5 – 7	30 – 75	8 – 440 8 – 440 1 – 22	0,4 – 0,5
		Латунь		0,4 – 0,5	3 – 5	25 – 55		
		Графит		1 – 1,2	8 – 10	20 – 35		

Обрабатываемость твердых сплавов по сравнению со сталями в несколько раз меньшая.

При выполнении черновой обработки стремятся добиться максимальной производительности. Однако необходимо иметь в виду, что в ряде случаев высокая

производительность обработки является причиной грубой шероховатой поверхности и возникновения на обрабатываемой заготовке погрешностей формы (особенно при выполнении вырезной обработки), которые в дальнейшем затруднительно исправить на других переходах.

Одной из основных характеристик электроэрозионной обработки является взаимосвязь между энергией импульса или током, площадью обработки и скоростью съема. Для достижения высокой производительности выбирают сочетание площади обрабатываемой поверхности и мощности импульсов. Такой выбор для ряда станков выполняют в пространственных координатах сила тока – площадь обработки – производительность.

В общем случае зависимость скорости съема от площади обработки имеет следующий характер. Увеличение площади обработки при постоянном значении тока ведет вначале к росту производительности, затем рост замедляется, а в дальнейшем с увеличением тока наблюдается некоторое уменьшение скорости съема. Каждому значению импульса тока соответствует оптимальная площадь обработки, при которой скорость съема максимальная. С ростом тока оптимальная величина площади обработки сдвигается в сторону бóльших значений.

Каждому значению площади обработки соответствует оптимальная мощность или ток импульсного разряда, которые могут быть эффективно использованы в МЭП от генератора импульсов.

Процесс обработки при оптимальных соотношениях мощности и площади обрабатываемой поверхности осуществляется с близкими удельными скоростями съема, т.е. скорость прошивания по глубине имеет практически стабильное значение и не зависит от площади обработки.

Пространственная диаграмма дает представление о связи между электрическим режимом, площадью обработки и скоростью съема материала для электродов-инструментов простой формы.

Зависимость оптимального тока и площади обработки используют также для определения электрического режима при обработке сложных пространственных поверхностей. Количество металла, удаляемого с любого участка такой поверхности при поступательном движении электрода-инструмента, в этом случае пропорционально подводимой энергии.

Однако с изменением формы обрабатываемой поверхности и глубины обработки условия осуществления процесса сильно изменяются. Причем затруднение эвакуации продуктов эрозии является существенным фактором, влияющим на

устойчивость обработки. Глубина прошивания весьма сильно влияет на процесс обработки, что связано с ухудшением условий удаления шлама. При увеличении глубины обработки производительность уменьшается в 1,5 и более раза, а при некоторой глубине процесс обработки становится невозможным, например, при обработке глубоких узких пазов и т.д. Выходом может стать релаксация ЭИ, однако в ряде случаев и ее использование не приносит желаемых результатов. Так, при прошивании пазов размерами (ширина × длина × глубина) 1,7 × 80 × 40 мм под ребра жесткости в задней стенке телевизора «Витязь» на прошивочном станке Робоформ (фирмы «Charmilles Technologies») адаптивная система самопроизвольно выводит ЭИ из зоны обработки при достижении глубины обработки около 38 мм. Причем повторное перемещение ЭИ в направлении подачи не дает желаемых результатов. Для сравнения – предельная глубина прошиваемых пазов для станков СТ и AGIE шириной 1 мм составляет около 40 мм, на станках Sodick удается прошивать пазы шириной 1 мм глубиной до 70 мм. Следует заметить, что прошивочная обработка узких пазов и щелей до сих пор остается узким местом даже для электроэрозионного способа обработки материалов.

Повысить производительность электроэрозионной обработки можно, подобрав оптимальное сочетание факторов, которые позволяют увеличить долю полезной энергии импульса, мощность и частоту следования рабочих импульсов.

На производительность обработки оказывают влияние газоразрядные процессы в межэлектродном промежутке. При малой площади обработки часть поверхности перекрывается газовыми пузырями от предшествующих разрядов, что приводит к уменьшению числа рабочих импульсов, производящих эрозию материала заготовки. Время существования газового пузыря намного больше длительности импульсного разряда. Рабочий импульс протекает только в диэлектрической жидкости, а через воздух возникают неконтролируемые разряды, увечающие обрабатываемую поверхность. Импульсные разряды через газовые пузыри возможны только при повышенном напряжении, поэтому от части импульсов эрозии материала не наблюдается, что снижает производительность обработки.

При увеличении площади обработки скорость съема материала будет возрастать, однако в дальнейшем уменьшится в связи с ухудшением условий удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка. Для повышения производительности электродам может сообщаться вибрация. В зависимости от электрического режима обработки, площади и формы обрабатываемой поверхности, глубины обработки максимальной производительности соответствует опти-

мальная амплитуда колебаний ЭИ. Приведенное обстоятельство широко используется производителями электроэрозионного оборудования для расширения его технических возможностей. При обработке некоторых поверхностей электроду-инструменту не всегда можно задавать орбитальное движение. В этих случаях продольно колеблющиеся (в направлении подачи) с определенной амплитудой и частотой ЭИ создают так называемый поршневой эффект в узких пазах, щелях и других частях обрабатываемой детали. Благодаря этому улучшаются условия удаления продуктов эрозии и подача рабочей жидкости в МЭП.

Для определения производительности обработки используют технологические диаграммы к станкам, выполненные в графической форме, в которых приводятся зависимости скорости съема материала от параметров шероховатости поверхности заготовки после обработки. По этим диаграммам выбирают положение указателя на станке, которому соответствует определенная сила тока в импульсе и при котором определенная мощность импульса обеспечит максимальную производительность, а в процессе обработки адаптивная система станка обеспечит контроль выбранных режимов обработки для поддержания требуемой производительности. Причем в соответствии с технологической инструкцией может быть составлена такая последовательность режимов обработки, при выполнении которой будет достигнута заданная шероховатость поверхностей и их геометрическая точность. Однако в некоторых случаях обработку проводят не в режиме максимальной производительности, а так, чтобы износ электрода-инструмента был минимален. Это связано с возможностью сокращения затрат на изготовление дополнительных электродов-инструментов, используемых при выполнении чистовой и особенно доводочной обработки. Такие режимы обработки называют малоизносными.

При разрезании заготовок и вырезании контуров непрофилированным ЭИ влияние площади обработки учитывают через произведение толщины заготовки на ширину паза, которая зависит от диаметра ЭИ. При диаметре проволоки менее 0,15 мм затруднено удаление продуктов обработки, поэтому производительность мала. Производительность обработки уменьшается также по мере увеличения толщины заготовки. Современные электроэрозионные установки снабжают системами ЧПУ либо программным обеспечением, входящим в ЧПУ, которые обеспечивают при изменении условий электрической эрозии стабильную и высокопроизводительную обработку при выполнении различных видов работ. Например, система вырезания с угловым упреждением повышает качество реза при обработке углов за

счет автоматического уменьшения скорости перемещения ЭИ и заготовки, снижения скорости прокачки диэлектрической жидкости и параметров импульсных разрядов. Системы ЧПУ позволяют существенно повысить производительность вырезания и уменьшить параметры шероховатости поверхностей. Например, вырезание контура в заготовке толщиной 500 мм производится на современных проволочно-вырезных станках со скоростью до 540 мм²/мин (при вырезании проволокой диаметром 0,36 мм – на станках Sodick и до 500 мм²/мин – на станках Mitsubishi) при чистоте обработки 0,17 мкм (Ra) за 3 прохода (4 - 5 проходов при обработке проволокой диаметром 0,36 мм на станках Mitsubishi). Однако высокая производительность обработки в ряде случаев становится причиной возникновения геометрических погрешностей обработанных поверхностей (отклонения образующих от прямолинейности или так называемого «корсета» и т.п.), на устранение которых потребуется значительное количество времени на чистовых и особенно доводочных режимах. Исправить погрешности можно лишь за счет выполнения дополнительных проходов, что существенно повышает стоимость деталей и принципиально неприемлемо. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо индивидуально решать вопрос о выборе производительности при обработке той или иной поверхности.

При вырезной обработке заготовок толщиной более 30 мм диаметр проволоки должен быть не менее 0,2 мм. Такой электрод-инструмент обладает достаточной прочностью и обеспечивает стабильные условия электрической эрозии.

На производительность обработки существенное влияние оказывает рабочая среда. Диэлектрическая жидкость влияет на величину падения напряжения между электродами, которая в свою очередь определяет энергию, выделяющуюся в зоне обработки. Энергия разрядных импульсов определяет съем металла и условия удаления продуктов обработки. Для вырезной обработки в качестве рабочей жидкости применяется вода. Ее использование обеспечивает высокую скорость вырезания. Однако вода является источником электролитической эрозии и особенно коррозии, не обеспечивает малых межэлектродных зазоров при обработке мелких элементов заготовок, поэтому необходимо использовать ионообменные смолы для увеличения ее удельного сопротивления, вводить специальные добавки, уменьшающие коррозионное воздействие на обработанную и другие поверхности детали. Для прошивочной обработки наиболее целесообразно использовать углеводородные диэлектрические среды – масла различных марок либо специальные углеводородные жидкости. Такие диэлектрики обеспечивают при обработке минимальные межэлектродные зазоры, что повышает точность обработки, позволяет подавать в

МЭП импульсы весьма малой энергии и соответственно повышать качество обработанных поверхностей.

На скорость съема оказывает влияние вязкость рабочей жидкости. При увеличении вязкости ухудшаются условия удаления продуктов эрозии, что приводит к падению производительности обработки. Величина предельной вязкости уменьшается при снижении энергии импульсных разрядов. Однако в жидкости, вязкость которой равна нулю, скорость съема также стремится к нулю из-за отсутствия захвата эрозированных частиц жидкостью.

Для использования положительных качеств воды и углеводородных сред некоторые производители оборудования оснащают электроэрозионные установки двойными диэлектрическими системами, что обеспечивает сочетание высокопроизводительной черновой обработки в воде с качеством обработанных в углеводородных средах поверхностей.

В процессе работы характеристики рабочих жидкостей изменяются вследствие загрязнения продуктами эрозии: вязкость повышается, увеличивается зольность диэлектрических сред. По допустимой вязкости определяется срок замены диэлектрической жидкости.

На производительность обработки оказывает влияние загрязненность рабочей жидкости. Предельно допустимая массовая концентрация шлама (K, %) при электроэрозионной обработке приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2

f, кГц	I _{ср.} , А	K, %
0,4	55	0,49
8	32	0,38
22	15	0,29
44	9	0,19

Для уменьшения влияния загрязненности на процесс обработки системы подачи рабочей жидкости снабжают фильтрами грубой и тонкой очистки.

На производительность обработки оказывает влияние материал электрода-инструмента и напряжение на электродах.

Материал ЭИ влияет на падение напряжения в МЭП при разряде и, соответственно, на энергию разряда, а свойства материала электрода-инструмента влияют на распределение тепловых потоков в зоне обработки и восстановление прочности диэлектрической среды в МЭП.

Для определенного материала электрода-инструмента существует предельная мощность, которая может быть введена в межэлектродный промежуток при заданном напряжении. Последнее обстоятельство обеспечивает возбуждение

импульсных разрядов. Теплообмен зависит от теплопроводности материала ЭИ и заготовки, шероховатости поверхностей, однородности и ряда других свойств.

Чем выше теплопроводность и больше шероховатость эрозированной поверхности, тем большая мощность может быть подведена в МЭП, так как увеличение теплопроводности улучшает отвод тепла, а увеличение шероховатости увеличивает объем рабочего пространства между электродами. Наибольшие мощности могут быть использованы при изготовлении ЭИ из меди, а наименьшие – при изготовлении электродов из графитированных материалов.

При выборе напряжения стремятся ограничиваться его минимальными величинами, достаточными для возникновения импульсных разрядов. Увеличение напряжения обычно приводит к дополнительным непроизводительным энергетическим затратам.

Основными способами повышения производительности может стать многоэлектродная, а также многоконтурная электроэрозионная обработка. Первая применяется в случае, когда имеется один источник питания. Во втором случае необходимо иметь несколько источников питания, либо для каждого ЭИ используется собственный источник питания. В современных серийных электроэрозионных станках такие способы обычно не применяют.

2.2.2. ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

Под точностью детали понимают степень соответствия ее формы и размеров чертежу.

Отклонения формы и размеров детали от заданных значений называют погрешностями. Погрешности бывают систематическими и случайными.

При электроэрозионной обработке на точность детали оказывают влияние следующие факторы:

- точность изготовления электродов-инструментов;
- износ электрода-инструмента вследствие эрозии в процессе обработки заготовки;
- состояние технологической системы;
- погрешности установки, базирования и закрепления ЭИ и заготовки;
- нагрев заготовки и электрода-инструмента при обработке.

Отклонение обработанной поверхности от заданной в общем случае можно представить в следующем виде:

$$\Delta_{\text{СУМ}} = \Delta_{\text{СТ}} + \Delta_{\text{T}} + \Delta_{\text{НАСТР}} + \Delta_{\text{ПР}}, \quad (2.2)$$

где $\Delta_{СТ}$, Δ_T – отклонения, вызванные неточностью изготовления станка и нагревом ЭИ, заготовки и рабочей жидкости;

$\Delta_{НАСТР}$, $\Delta_{ПР}$ – отклонения, обусловленные неточностью расположения ЭИ и заготовки, и отклонение, связанное с процессом эрозии.

Нагрев ЭИ на некоторых режимах электроэрозионной обработки может достигать 400°C . Детали нагреваются до более высоких температур. Для устранения температурного влияния на точность размеров обеспечивают циркуляцию рабочей жидкости в МЭП, а также ее дополнительно охлаждают в специальных холодильных агрегатах. Благодаря этому удается поддерживать температуру диэлектрика во время обработки в заданных пределах (например, не более $+2^{\circ}\text{C}$ к температуре помещения), что снижает величину тепловых погрешностей практически до нуля.

В случае, когда электроэрозионная установка не оснащена устройством для термостабилизации рабочей жидкости, *величина температурных погрешностей в направлении, перпендикулярном подаче, может быть определена* следующим образом:

$$\Delta_T = L(\alpha_{Э} - \alpha_{Д})(t_2 - t_1), \quad (2.3)$$

где Δ_T – тепловые погрешности в процессе работы станка (мм);

L – размер обрабатываемой поверхности, изменяющийся в результате деформаций;

$\alpha_{Э}$ – коэффициент линейного расширения материала ЭИ ($\text{мм}/^{\circ}\text{C}$);

$\alpha_{Д}$ – коэффициент линейного расширения обрабатываемого материала ($\text{мм}/^{\circ}\text{C}$);

t_1 – температура рабочей жидкости в конце электроэрозионной обработки ($^{\circ}\text{C}$);

t_2 – температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$).

Из применяемых материалов *наибольшие температурные погрешности имеют место при обработке заготовок электродами-инструментами из алюминия, его сплавов и углеродистых сталей.*

Погрешности, являющиеся следствием неточности изготовления станка, оцениваются по нормам геометрической точности. Современные электроэрозионные установки в зависимости от назначения, типоразмера, используемых приводов, датчиков перемещений (оптических с дискретностью $0,1$ мкм и лазерных с дискретностью $0,01$ мкм) обеспечивают геометрическую точность изготовления деталей в пределах $\pm 0,5 - \pm 5$ мкм по отклонению от круглости и прямолинейности.

Искажение профиля обрабатываемой детали, вызванное весом ЭИ, определяется жесткостью конструкции станка и его несущих элементов. Большинство конструкций электроэрозионных установок изготавливают после проведения соответствующих расчетов на жесткость и прочность. Благодаря этому получают равнопрочные и жесткие конструкции независимо от перемещения подвижных элементов. Поэтому искажения профиля на детали составляют величины, которые практически не влияют на общую погрешность обработки.

Погрешности, вызванные неточностью установки, базирования и закрепления электрода-инструмента и заготовки, в настоящее время сводят к минимуму за счет использования приспособлений, обеспечивающих надежную установку и фиксацию ЭИ и заготовки. Шпиндельные узлы современных электроэрозионных установок для объемного копирования снабжают пневмо- или электромагнитными патронами, установочные поверхности которых обеспечивают соосность расположения шпинделя и хвостовой части электрода-инструмента. Электроды-инструменты изготавливают заодно с хвостовиками, причем поверхности последних используются в качестве установочных баз при обработке ЭИ на различном оборудовании, например, токарных станках, обрабатывающих центрах, электроэрозионных станках и т.д. После установки ЭИ в шпиндель станка осуществляется выверка его положения относительно детали с помощью специальных программ, заложенных в программное обеспечение ЧПУ. Данные о размерах заготовки, ЭИ и его положении относительно заготовки автоматически заносятся в память ЧПУ. Поэтому погрешности установки, базирования и закрепления ЭИ и заготовки незначительны и не влияют на точность получения профиля на детали.

На точность обработки существенное влияние оказывает износ электрода-инструмента, который зависит от параметров импульсов, размеров обрабатываемой поверхности, материала ЭИ и обрабатываемой заготовки, точности регуляторов подачи (приводов ЭИ и заготовки), условий прокачки рабочей жидкости и ряда других факторов.

Относительный объемный износ, определяющий точность получения на обрабатываемой детали профиля ЭИ, составляет

$$v = \frac{Q}{M} 100\%, \quad (2.4)$$

где Q, M – скорость съема материала соответственно с электрода-инструмента и заготовки.

Наиболее существенное влияние на износ ЭИ оказывают параметры импульсных разрядов, поскольку при образовании канала разряда имеет место термическое разрушение ЭИ. Однако при обработке в углеводородных средах при возбуждении в МЭП импульсных разрядов на поверхности электрода-инструмента образуются углеродные пленки, углерод которых выделяется из диэлектрической среды. Температура на поверхности ЭИ и скорость образования таких пленок связаны с длительностью и скважностью импульсов. Увеличение длительности импульсов и снижение скважности приводит к интенсивному образованию углеродных защитных пленок, защищающих поверхность ЭИ от эрозионного разрушения.

На износ ЭИ в значительной степени оказывает влияние изменение длительности импульсов. Применение соответствующих схем генераторов импульсов в настоящее время обеспечивает малый износ ЭИ как на низких, так и на высоких частотах следования импульсных разрядов.

Для некоторых схем генераторов импульсов при одинаковой вводимой в зону обработки мощности изменением напряжения холостого хода и токоограничивающего сопротивления можно изменять скважность и длительность импульсов. В этом случае скорость съема существенно не изменится, а износ ЭИ может быть значительно снижен.

Объемный износ электрода-инструмента зависит от площади обрабатываемой поверхности. Причем имеется оптимальная величина площади обработки, как ниже, так и выше которой износ ЭИ будет возрастать. Работа при оптимальной площади обработки соответствует оптимальным соотношениям скорости съема материала заготовки и износа электрода-инструмента.

При использовании углеводородных сред принудительная подача рабочей жидкости в МЭП оказывает влияние на процесс осаждения углерода на электроде-инструменте. При некоторых величинах давления прокачки наблюдается отрыв углеродной пленки, что приводит к увеличению износа ЭИ.

Точность поддержания межэлектродного зазора оказывает влияние на характер образования импульсных разрядов. Чем точнее поддерживается межэлектродный зазор, тем оптимальнее условия для следования разрядов с дозированной энергией и длительностью. В противном случае на одном и том же режиме получают различные показатели по износу, которые могут достигать 40% и более.

Для устойчивой работы в широком диапазоне электрических режимов наиболее целесообразно применять электроды-инструменты из меди. Величина износа зависит от режимов электроэрозионной обработки (величины тока) и матери-

ала электрода-инструмента и составляет следующие значения. При прошивочной обработке сталей электродами-инструментами из меди на черновых режимах износ равен 20%, при чистовой обработке – 30-40%, при доводке – 35-40%.

Для обработки заготовок могут использоваться ЭИ из чугуна. Износ ЭИ для чугуна при увеличении тока также возрастает. Причем при токах более 80 – 100А износ ЭИ из чугуна существенно превышает износ ЭИ из меди. При увеличении износа имеет место неустойчивая обработка.

ЭИ из алюминия и его сплавов наиболее целесообразно применять при низкочастотной обработке с длительностью импульсов свыше 500 мкс. Износ таких ЭИ при малых токах и длительности импульсов 800 – 1000 мкс может достигать 50 – 60%. При увеличении тока износ снижается и при токах 35 – 100А на низкой частоте их следования составляет 5 – 20%. Износ ЭИ из алюминия и сплавов зависит от их формы. В местах перехода от малых сечений к большим сечениям, а также на острых кромках износ ЭИ резко возрастает.

Наиболее приемлемые результаты по износу дают ЭИ из графита. Эти материалы стабильно работают при низких и высоких частотах следования импульсов.

Электроды-инструменты из медно-вольфрамовых композиций занимают промежуточное положение между электродами из графита и меди.

При доводке деталей из твердых сплавов электродами-инструментами из латуни износ последней может достигать 250-300%. Благодаря хорошей прирабатываемости электроды-инструменты из латуни обеспечивают высокое качество обработки и, несмотря на высокий износ, широко используются при выполнении электроэрозионной доводки.

Изменение скорости съема с обрабатываемой поверхности непосредственно сказывается на относительном износе ЭИ. Установлено, что *износ электрода-инструмента противоположен обрабатываемости материала заготовки.*

Наибольший износ электрода-инструмента имеет место при обработке твердых сплавов, молибдена, других тугоплавких металлов. Однако при специальном подборе параметров импульсов можно добиться резкого снижения износа медных и алюминиевых ЭИ при работе в области как низких, так и высоких частот следования импульсных разрядов.

Точность электроэрозионной обработки зависит от формы обрабатываемых поверхностей. Суммарная погрешность фасонных поверхностей зависит от

температурных погрешностей, отклонений реального межэлектродного зазора от расчетного значения, погрешностей установки ЭИ.

Отклонение профиля детали при прошивании от исходного $\Delta_{ДР}$, вызванное особенностями электрической эрозии, обусловлено тем, что между ЭИ и заготовкой периодически повторяются импульсные разряды, в результате которых разрушается часть поверхности заготовки и изнашивается электрод-инструмент. Процесс обработки происходит при наличии зазора между ЭИ и заготовкой. Различают боковой и торцовый межэлектродные зазоры. Боковой зазор возникает вследствие проникновения ЭИ вглубь заготовки, в результате чего между боковой поверхностью ЭИ и заготовки также возникают импульсные разряды. Размеры лунок на боковой поверхности прошиваемой полости и соответственно размеры бокового зазора зависят от энергии импульсов. Величина бокового зазора может быть определена по следующей зависимости:

$$\delta_B = C_B W_{И}^q, \quad (2.5)$$

где δ_B – боковой межэлектродный зазор (мкм);

C_B – зависящий от обрабатываемого материала коэффициент, (мкм/Дж);

$W_{И}$ – энергия импульсов (Дж);

q – показатель степени, который зависит от обрабатываемого материала (для сталей $q = 0,36$).

Электрический режим задается обычно величиной среднего тока. Если погрешность определения среднего тока велика, то величина отклонения зазора от расчетного значения может быть определена так:

$$\Delta\delta_B = C_B W_{И}^q \left[(1+k)^q - 1 \right], \quad (2.6)$$

где k – относительная погрешность определения среднего тока.

Величина погрешности, которая вызвана отклонением реального зазора на чистовых режимах от расчетных значений, обычно невелика и может не учитываться.

Величина фактического торцового зазора δ_T зависит от напряжения, подаваемого на ЭИ и заготовку, от состава и состояния диэлектрической жидкости, а также от режима электроэрозионной обработки. Межэлектродный зазор, определяющий точность отображения профиля электрода-инструмента на заготовке, к концу обработки должен соответствовать величине пробивного промежутка. Наиболее высокая точность будет достигнута в том случае, когда подача будет отключена до момента достижения требуемого заглубления электрода-инструмента в заготовку. В

этом случае после самостоятельного прекращения разрядов электрод-инструмент обеспечит получение требуемого профиля на заготовке. В некоторых случаях система управления станком прекращает подачу после достижения требуемого заглубления в заготовку, а доработка профиля до заданного производится за счет орбитального движения ЭИ. Суммарная погрешность торцового зазора современных электроэрозионных установок в зависимости от их типоразмера составляет 0,001 – 0,007 мм.

При обработке профилей на вырезных станках постоянный во времени износ ЭИ практически не влияет на точность, однако вследствие эрозии уменьшается прочность проволоки, ее натяжение и способность сохранять прямолинейность при обработке. Кроме этого стенки вырезаемого контура вследствие износа проволоки будут иметь некоторый уклон.

Величина приведенных выше составляющих погрешностей электроэрозионной обработки зависит от большого количества факторов, сочетания которых носят случайный характер. Совпадение наибольших и наименьших значений погрешностей носит маловероятный характер. Поэтому можно считать, что распределение составляющих погрешностей соответствует закону нормального распределения. Следовательно, общая погрешность электроэрозионной обработки может быть определена из выражения

$$\Delta_{\text{СУМ}} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_N^2}, \quad (2.7)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$ – составляющие суммарной погрешности.

Точность обработки может быть повышена благодаря использованию некоторых технологических приемов. Например, при прошивочной обработке круглых отверстий электроды-инструменты дополнительно вращают с различной частотой, что уменьшает влияние погрешности изготовления инструмента на точность обработки. Для улучшения условий обработки и повышения ее точности применяют орбитальные движения электродов-инструментов.

В настоящее время может после электроэрозионной обработки быть достигнута следующая точность:

- при обработке заготовок на электроимпульсных режимах – 8-11 квалитет;
- при прошивочных чистовых и доводочных работах на электроискровых режимах – 5-7 квалитет;
- при обработке заготовок непрофилированным ЭИ – 5-7 квалитет (на чистовых проходах);

- при электроэрозионном шлифовании в жидкости – 7-8 квалитет;
- при выполнении высокоточных работ на электроискровых режимах и применении специальных диэлектрических сред – 4-6 квалитет.

2.2.3. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

Качество поверхности детали после обработки определяется макро- и микрогеометрией поверхности, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями. Поверхностный слой после воздействия импульсных разрядов приобретает неровности и претерпевает температурные превращения. С увеличением энергии и длительности импульса увеличивается объем лунки, а также отношение ее диаметра к глубине. При той же энергии, но меньшей длительности импульсов лунки получаются более глубокими, но менее расплывчатой формы. Наибольший эффект эрозии имеет место при определенном соотношении энергии и длительности импульсов. При одной и той же энергии, чем короче импульс во времени, тем выше плотность энергии в объеме разрядного канала, температура плавления и испарения металла. Однако передача тепла вглубь металла благодаря теплопроводности требует некоторого времени. Поэтому с увеличением длительности импульса при сохранении одной и той же энергии эрозия возрастает до определенного предела и достигает максимума, после чего количество удаляемого металла уменьшается. Выбор оптимального соотношения энергии и длительности импульсов должен обеспечить такую обработку металла, при которой отсутствуют трещины на поверхностях деталей.

На обработанной поверхности образуются неровности. Высота неровностей зависит от степени перекрытия лунок, образовавшихся после электрической эрозии материала заготовки. При увеличении частоты следования импульсов высота неровностей уменьшается. Высота микронеровностей зависит от вида обработки, электрического режима, материала электродов, их размеров, вида и состояния рабочей жидкости. Первостепенное значение имеет электрический режим, диапазон регулирования которого весьма широк.

При изменении электрического режима основным фактором, определяющим параметры шероховатости обработанной поверхности, является энергия импульсов. При некоторых допущениях (равномерном распределении лунок и примерно равных их размерах) высоту микронеровностей по десяти точкам Rz можно выразить через энергию импульса W_u :

$$Rz = \kappa_H w_u^p, \quad (2.8)$$

где k_H – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, мкм/ Дж;
 p – показатель степени.

Значения k_H и показателя степени p для некоторых групп обрабатываемых материалов приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Обрабатываемый материал	k_H , мкм/ Дж	p
Углеродистые стали	190	0,33 – 0,37
Жаропрочные сплавы на основе никеля	205	0,37 – 0,4
Твердые сплавы	67	0,36 – 0,4

В случае перехода от одного режима обработки (чернового) к другому режиму обработки (чистовому или доводочному) высоту неровностей, которые будут получены после обработки на последующем режиме, можно выразить через энергию импульса чернового режима.

На параметры шероховатости обработанной поверхности, как и на съем металла, оказывает влияние площадь обработки. Параметры шероховатости зависят от вида рабочей среды и материала электрода-инструмента и заготовки.

При чистовой обработке сталей электродами-инструментами из меди и графита зависимость достижимой шероховатости поверхности от площади приведена в таблице 2.4 (Charmilles Technologies – СТ).

Таблица 2.4

ЭИ – медь, заготовка - сталь		ЭИ – графит (мелкодисперсный), заготовка – сталь	
Площадь обработки S , см ²	Конечная шероховатость, СН	Площадь обработки S , см ²	Конечная шероховатость, СН
$S \leq 12$	0	$S \leq 5$	12
$12 < S \leq 40$	8	$5 < S \leq 10$	18
$40 < S \leq 75$	14	$10 < S \leq 20$	20
$75 < S \leq 100$	18	$20 < S \leq 30$	22
$100 < S \leq 300$	22	$30 < S \leq 50$	24
$300 < S \leq 500$	24	$50 < S \leq 100$	26
$500 < S \leq 1000$	26	ЭИ – графит (крупный)	
$S > 1000$	30	$100 < S \leq 300$	28
		$300 < S \leq 500$	30
		$500 < S \leq 1000$	32
		$S > 1000$	34

Соотношение классов шероховатости СТ, Ra и других параметров шероховатости приведено в таблице 2.5, причем $CHNo = 20 \log 10Ra$.

Таблица 2.5

Класс шероховатости поверхности		Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax (Ry), мкм	СН, Класс
ГОСТ (отменен)	ISO 1302	ГОСТ 2789-73		ISO 4287-1997	~5 _x Ra	~8 _x Ra	
1		80	320				
	№12	50		50	250	400	
2		40	160				
	№11	25		25	125	200	49
3		20	80				46
	№10	12,5		12,6	63	100	42
4		10	40	10	50	80	40
	№9	6,3		6,3	32	50	36
5		5	20	5	25	25	32
	№8	3,2		3,2	16	25	30
6		2,5	10	2,5	12,5	20	28
	№7			1,8	9	14,4	25
7		1,25	6,3	1,26	6,3	10	22
	№6	0,8		0,8	4	6,4	18
8		0,63	3,2	0,63	3,2	5	16
	№5			0,35	1,75	2,8	11
9		0,32	1,6	0,32	1,6	2,56	10
	№4			0,18	0,9	1,4	5
10		0,16	0,8	0,16	0,8	1,28	4
11	№3	0,08	0,4	0,1	0,5	8	0
12	№2	0,04	0,2	0,05	0,25	4	
13	№1	0,02	0,1	0,025	0,1	0,2	
14		0,01	0,05				

На рис. 2.1 приведены зависимости параметров шероховатости поверхностей от их площади при выхаживании поверхностей в обычной и специальной рабочей жидкости. В качестве обычной рабочей жидкости применяют масло (30 Neutral). Вид и характер воздействия специальной рабочей жидкости на процесс доводки будет приведен несколько ниже. Из приведенной таблицы и рисунка следует, что при увеличении площади обработки параметры шероховатости обработанных поверхностей, как на чистовых режимах, так и при выхаживании увеличиваются. Такое увеличение объясняется ухудшением условий удаления продуктов обработки, с одной стороны, и увеличением влияния электростатического электричества, накапливаемого по мере увеличения площади обработки, на электроразрядные процессы в межэлектродном промежутке, с другой стороны. На шероховатость обработанной поверхности оказывают влияние частота импульсов, средний ток и энергия импульсов. С увеличением величины среднего тока при постоянной частоте следования импульсов высота микронеровностей значительно возрастает. В этом случае достигается высокая производительность обработки.

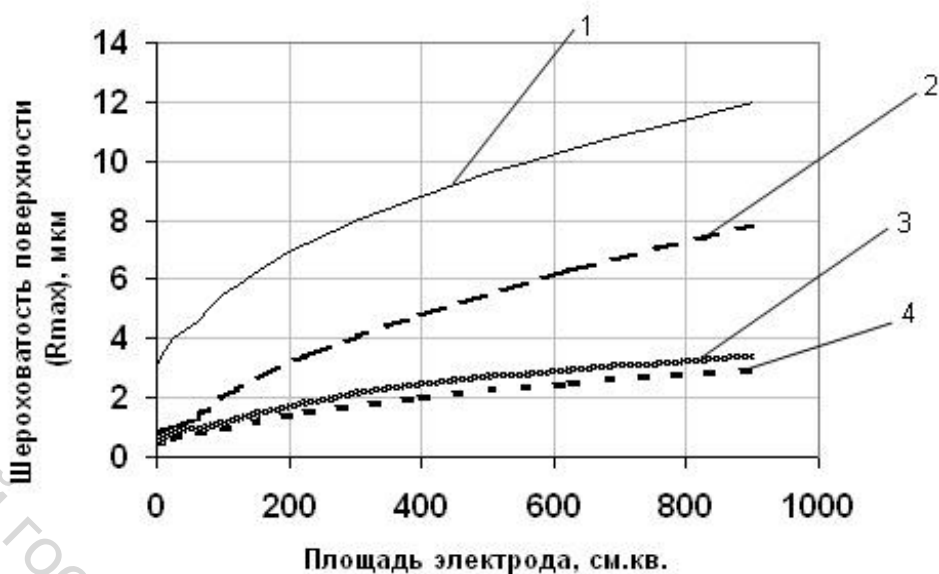


Рис. 2.1. Зависимости шероховатости поверхности от площади электрода-инструмента при чистовом выхаживании (Sodick): 1 – в стандартном диэлектрике (ЭИ – графит), 2 – в стандартном диэлектрике (ЭИ – медь), 3 – в специальном диэлектрике с использованием специальных режимов работы генератора импульсов (ЭИ – графит), 4 – то же, что и в 3 (ЭИ – медь), материал заготовки – сталь SKD-61 (аналог – 4X5MФС).

Для получения оптимального сочетания производительности обработки и шероховатости обработанной поверхности на чистовых режимах следует повысить частоту импульсов и выбрать параметры импульсов, при которых энергоёмкость обработки будет минимальной. Скорость съема металла на чистовых режимах по сравнению с черновой обработкой значительно сокращается. Это связано с уменьшением энергии импульсных разрядов. Максимальная высота неровностей в этом случае уменьшается в 10 – 20 раз по сравнению с черновой обработкой. Трудоемкость доводки поверхностей до весьма малых значений параметров шероховатости значительно увеличивается. Так, для получения шероховатости обработанной поверхности в пределах 0,17 – 0,2 мкм (Ra) на современных электроэрозионных установках необходимо выполнить 2 – 3 перехода, в то время как для полирования обработанной поверхности до 0,04 – 0,08 мкм (Ra) необходимо провести 8 – 12 переходов и в большинстве случаев применять специальные рабочие жидкости и режимы работы генераторов импульсов.

Для получения достоверной информации о шероховатости поверхности обычно используют профилометры и профилографы, работающие по методу ощупывания поверхности. Параметры микронеровностей для различных режимов электроэрозионной обработки составляют:

- электроискровой режим при обработке твердых сплавов – Ra 0,2 – 0,3 мкм;
- электроискровой режим при обработке сталей – Ra 0,3 – 0,6 мкм;
- электроискровой режим при доводке сталей – Ra 0,04 – 0,08 мкм (при использовании специальных диэлектрических жидкостей и режимов обработки);
- электроимпульсный режим – Ra 10 – 20 мкм (и более);
- электроэрозионное шлифование в жидкости – Ra 0,5 – 0,8 мкм.

Поверхностный слой после электроэрозионной обработки состоит из остатка расплавленного металла на поверхности лунки и слоя, подвергшегося структурным изменениям вследствие воздействия высоких температур.

Толщину измененного слоя в зависимости от энергии импульсов можно приближенно найти по зависимости, которая аналогична зависимости высоты микронеровностей от энергии импульсов. Показатель степени при расчете энергии импульсов по соответствующей формуле в этом случае составляет 0,4 – 0,42.

При черновой обработке, когда ток и энергия импульса, подводимого к поверхности, велики, а время действия минимально, на поверхности из-за температурных перепадов по глубине заготовки возможно трещинообразование. Наиболее склонны к нему твердые сплавы.

Предельно допустимые значения энергии импульса и его длительности для различных материалов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Материал	Энергия импульса, $A_{и}, Дж$	Длительность импульса, $\tau_{и}, мкс$
Стали и сплавы на основе железа	От долей до десятков	От дес. до неск. тысяч
Сплавы на основе никеля и титана	Не более 3-4	Не более 100-200
Металлокерамические твердые сплавы на основе вольфрама и титана	Не более 0,5	Не более 10
Монокристаллические материалы на основе тугоплавких металлов и сплавов	Не более $10^{-3} - 10^{-1}$	2 – 3
Цветные металлы и сплавы на основе меди	$10^{-4} - 5$	1 – 300

Толщина измененного слоя для стальных заготовок при следующих видах обработки составляет (в мм):

- при черновой обработке (на электроимпульсном режиме) – 0,1 – 0,4;
- при чистовой обработке (на электроискровом режиме) – 0,001 – 0,01;
- при шлифовании в жидкости – 0,005 – 0,08;
- при разрезании заготовок в жидкости – 0,5 – 0,1;
- при электроконтактной обработке на воздухе – ≤ 5 .

Величина измененного слоя при обработке твердых сплавов не должна превышать 0,1 мм, т.к. при большей величине на поверхности детали образуются трещины.

При обработке обычно выбирают такую последовательность режимов, чтобы толщина измененного слоя после окончательных операций была минимальной. Состояние поверхностного слоя определяет износостойкость, прочность детали и другие ее свойства в механизме, машине, узле и т.п.

Толщина измененного слоя для сталей при следовании разрядов различной энергии достигает значений, приведенных в таблице 2.7. При этом не только толщина измененного слоя, но и параметры шероховатости обработанной поверхности имеют оптимальные значения, а трудоемкость их доводки на последующих операциях минимальная.

Таблица 2.7

Режим обработки	Энергия импульсов, Дж	Максимальная глубина лунок, мкм	Толщина измененного слоя, мкм	Параметры шероховатости поверхности (Ra/Rz), мкм
Грубый	Более 1	Свыше 150	60 – 100	Rz 80 и более
Средний	1 – 0,05	150 – 10	60 – 3	Rz 20 – Ra 1,6
Тонкий	Менее 0,05	10 – 3	–	Ra 0,8 и менее (до 0,04 мкм – при полировании)

Толщина, состав, микротвердость измененного слоя в значительной степени зависят от обрабатываемого материала. Для сталей при черновых режимах измененная зона приповерхностного материала состоит из так называемого «белого слоя», слоя вторичной закалки и слоя отпуска. Для жаропрочных материалов измененный слой состоит только из «белого слоя», под которым располагается материал с исходной структурой. С повышением частоты импульсов глубина измененного слоя уменьшается. На чистовых режимах обычно измененный слой практически отсутствует либо не превышает 1 мкм.

Большое количество деталей особенно литейной оснастки проходят операции доводки и полирования. Процесс доводки весьма трудоемкий и занимает значительное время в процессе изготовления деталей.

В настоящее время на заключительных операциях широко используются специальные диэлектрические жидкости. Применение таких рабочих жидкостей ускоряет полирование поверхностей до зеркального блеска и обеспечивает получение на обработанных деталях модифицированного поверхностного слоя толщиной 5 – 12 мкм с твердостью от 600 до 1000 HV и более, что в большинстве случаев в 1,2 – 1,5 раза выше твердости основного материала (рис. 2.2).

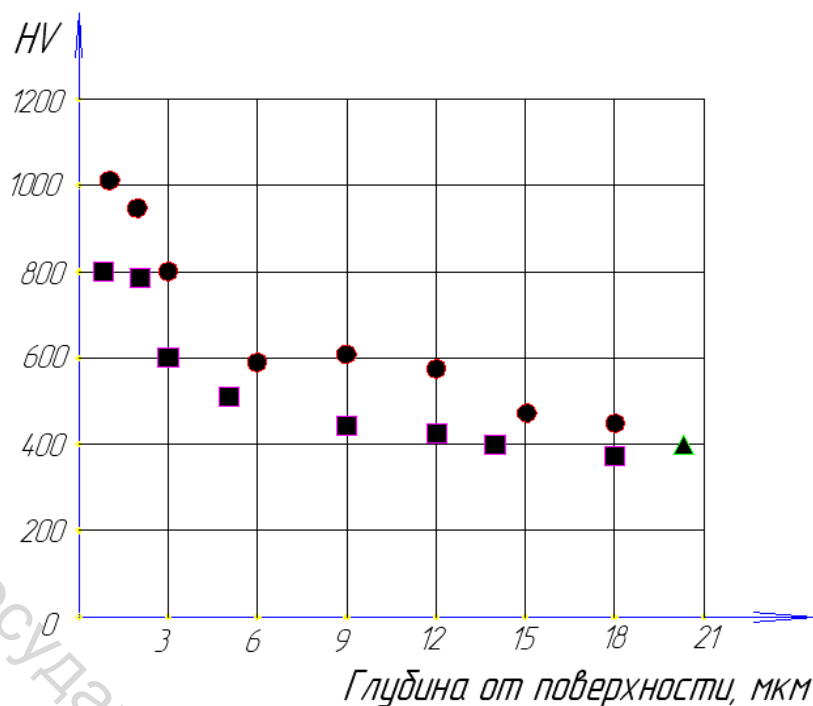


Рис. 2.2. Сравнение твёрдости поверхности:
 ○ - после обработки с PIKAGEN;
 □ - после обработки в обычном масле;
 ▲ - твёрдость металла основы

Специальные жидкости представляют собой насыщенные углеводородные диэлектрические среды (например, VITOL-10, Япония) с достаточно высокой температурой вспышки (110⁰С и более). Такие жидкости обычно нерастворимы в воде, не имеют цвета и запаха, безопасны для обслуживающего персонала. К диэлектрической жидкости добавляют специальный концентрат (например, Pikaqen White), представляющий собой парафинистый углеводород (59,5%) с металлическими порошковыми добавками (40% алюминия, кремния и графита) и ксилолом (0,5%). Ряд производителей использует для проведения доводочных операций другие виды рабочих жидкостей.

При осуществлении доводочных работ применяют мягкие режимы работы генераторов импульсов. В этих случаях токи и энергия импульсных разрядов имеют минимальные значения, что в совокупности с рабочей средой обеспечивает получение поверхностей с минимальными параметрами шероховатости. Причем доводка на электроэрозионном оборудовании оказывается намного эффективней других способов, особенно при обработке сложных поверхностей. Механизм действия специальной диэлектрической среды показан на рис. 2.3.

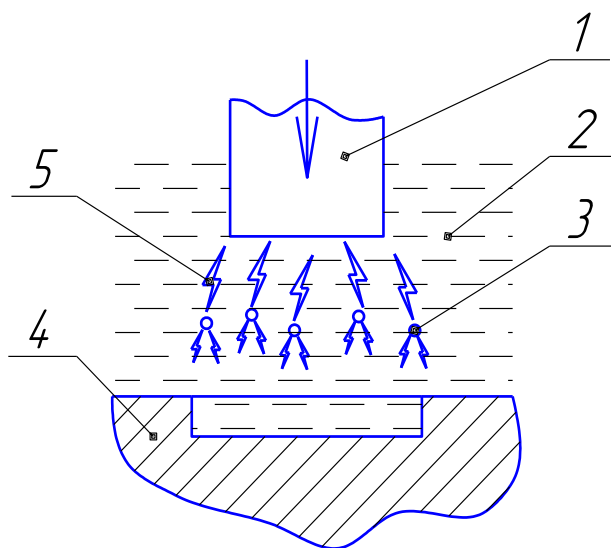


Рис. 2.3. Схема, поясняющая механизм дробления импульсных разрядов в специальном диэлектрике: 1 – ЭИ, 2 – рабочая жидкость, 3 – мелкодисперсные порошковые частицы, 4 – заготовка, 5 – импульсные разряды

При доводке электрод-инструмент 1 движется с рабочей подачей навстречу к заготовке 4. При определенных условиях в диэлектрической жидкости 2 между ними возникают импульсные разряды 5. Мелкодисперсные частицы порошка 3, входящие в состав рабочей жидкости, попадают в канал разряда и обеспечивают дробление импульсных разрядов доводочных режимов на разряды с еще меньшей энергией. Благодаря наличию в рабочей жидкости мелкодисперсных металлических частиц на поверхности заготовки формируется электропроводный слой, создающий условия для равномерного распределения по заготовке импульсных разрядов малой энергии. Кроме этого, при попадании мелкодисперсной частицы в канал разряда происходит ее расплавление, и металл частицы осаждается на поверхности заготовки, что способствует выглаживанию впадин и острых краев лунок. Параллельно идет процесс диффузии атомов металла порошка в поверхность заготовки. Поверхностный слой при этом образует единое целое с металлической основой, обладает высокой твердостью и износостойкостью, не отслаивается, а также полностью защищает поверхность от коррозии. На рис. 2.4 показана фотография микрошлифа заготовки, обработанной в специальном диэлектрике.

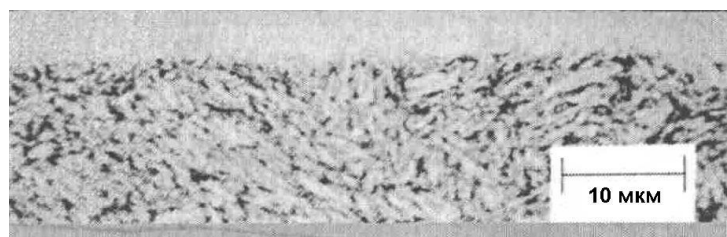


Рис.2.4. Фотография микрошлифа поверхности детали после обработки в специальном диэлектрике

Эксперименты в солевой ванне подтверждают высокую сопротивляемость модифицированных поверхностных слоев коррозии. Кроме этого, ресурс пресс-форм по износостойкости возрастает в 2 – 3 раза. В таблице 2.8 представлены данные по химическому составу поверхностного слоя и основного материала (стали).

Таблица 2.8

Вид обработки	Углерод, С, вес. %
До электроэрозионной обработки	0,44
Электроэрозионная обработка в обычном диэлектрике	1,47
Электроэрозионная обработка в специальном диэлектрике	1,84

Увеличение в поверхностном слое детали количества углерода, переходящего из рабочей жидкости, и легирующих элементов способствует тому, что модифицированный слой имеет более высокие механические свойства, чем материал основы.

Некоторые производители электроэрозионного оборудования рекомендуют выполнять доводочные переходы чистовых операций обработки деталей на мягких режимах работы генераторов импульсов и изменении полярности включения ЭИ и заготовки. При этом используются те же рабочие жидкости, которые применялись на предыдущих операциях.

Импульсные разряды приводят к повышению температуры поверхности заготовки. При обработке твердых сплавов высокие температуры в поверхностном слое являются причиной возникновения сколов и трещин. Вероятность появления приведенных дефектов при выполнении черновой обработки на электроискровых режимах выше, чем при обработке на электроимпульсных режимах, проводимой при низкой частоте следования импульсов. Это связано с меньшим перепадом температур по глубине при импульсном режиме, т.к. температура в канале разряда в этом случае ниже, чем при электроискровом режиме. Поэтому целесообразно использовать низкочастотную электроимпульсную обработку при предварительной обработке деталей из твердых сплавов. При чистовой обработке таких материалов с малыми энергиями импульсов (около 0,002 – 0,003 Дж) изменений в поверхностных слоях практически не обнаруживается.

2.3. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Формообразование поверхностей при электроэрозионной обработке протекает в результате возникновения между электродом-инструментом и заготовкой импульсных разрядов. *В зависимости от вида обработки при вырезании используют непрофилированный электрод-инструмент – проволоку, при изготовлении отверстий – электроды-инструменты постоянного сечения, при прошивании полостей – чаще всего инструменты сложной формы. Электроэрозионное вырезание обеспечивается за счет поступательного относительного движения электрода-инструмента и заготовки, в результате которого осуществляется направленный съем металла и вырезание заданного контура.* Причем перемещение проволочного электрода-инструмента через зону резания позволяет использовать его постоянный во времени износ для получения прорезаемого паза одинаковой ширины по длине всего контура. *При обработке полостей сложной формы и отверстий постоянного сечения направление движения электрода-инструмента перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. В ряде случаев обработка полостей производится с орбитальным движением электрода-инструмента. При формообразовании некоторых поверхностей могут использоваться электроды-инструменты простой формы, перемещаемые по определенной траектории.* Таким способом за счет последовательных проходов электрода обеспечивается формообразование фасонных поверхностей.

Рассмотрим процесс получения отверстия постоянного сечения. Электрод-инструмент перемещается поступательно в направлении обработки и каждая его точка, наиболее близкая к поверхности заготовки, обеспечивает возбуждение импульсных разрядов, разрушающих элементарные участки поверхности. Вслед за ними в обработку вовлекаются другие участки электрода-инструмента и заготовки, в результате чего обеспечивается съем элементарного слоя материала со всей обрабатываемой поверхности. При дальнейшем углублении электрода-инструмента в заготовку и при условии удаления эродированного материала из межэлектродного зазора создаются условия для возникновения новых импульсных разрядов, разрушающих следующий слой и так далее, до тех пор, пока в заготовке не образуется отверстие. Однако импульс-

ные разряды возникают не только между торцевой поверхностью ЭИ и заготовки, но и при заглублении электрода между его боковой поверхностью и стенкой отверстия. В результате образуется боковой межэлектродный зазор, размеры которого определяются энергией импульсов. Electrode-инструменты для прошивания отверстий выполняют в виде стержня, поверхности которого отстоят от стенок отверстия на расстоянии, учитывающем величину межэлектродного зазора, толщину дефектного слоя и погрешности обработки. Величина межэлектродного зазора определяется режимом обработки. Торцевые участки, прилегающие к боковой поверхности электрода-инструмента, изнашиваются быстрее, чем другие участки. Это приводит к тому, что при обработке отверстия заданной формы длина рабочей части электрода-инструмента должна быть определена с учетом величины его износа в процессе обработки. При необходимости получения отверстий с вертикальными стенками электрод-инструмент выполняют ступенчатым. Длину ступенчатой части выбирают с учетом глубины прошиваемого отверстия и износа электрода-инструмента и выполняют несколько большей, чтобы обеспечивалось калибрование отверстия после выхода электрода-инструмента из заготовки. Боковые поверхности электрода-инструмента после профилированной его части занижают на величину, превышающую значение бокового межэлектродного зазора для чернового режима обработки. Причем величина зазора между частью ЭИ с занижением и стенкой отверстия должна быть такой, чтобы продукты эрозии, удаляемые через зазор, не вызывали импульсных разрядов между электродом и боковой стенкой отверстия заготовки. В противном случае возникающие импульсные разряды способствуют появлению погрешностей формы на боковой поверхности прошиваемого отверстия или полости. Условия формообразования отверстий постоянного сечения в большой степени зависят от протяженности образующей обрабатываемой поверхности. Чем больше величина образующей, тем больше различаются условия образования поверхности в различных ее частях, а также точность воспроизведения образующей. При этом большое значение на характер обработки поверхности оказывает степень загрязненности рабочей жидкости продуктами обработки. Для уменьшения погрешностей, появление которых вызвано увеличением съема материала в местах скопления продуктов обработки, целесообразно в электродах-инструментах выполнять отверстия для принудительной подачи

рабочей жидкости в МЭП. В целях уменьшения искажения прямолинейности боковой поверхности обрабатываемых отверстий в ряде случаев можно ограничить возможность возникновения боковых разрядов. Для этих целей на боковые поверхности электродов наносят защитные пленки из различных материалов.

При прошивании отверстий малых размеров по мере углубления электрода-инструмента в заготовку существенно ухудшаются условия удаления продуктов эрозии, что приводит к нарушению стабильности электрической эрозии. В этом случае целесообразно использовать релаксацию электрода-инструмента для промывки полости и улучшения условий обработки.

Формообразование круглых отверстий небольшого диаметра (до 8 мм) выполняют чаще всего с помощью электродов-инструментов в виде латунных трубок, через отверстие которых обеспечивается подача рабочей жидкости в зону обработки, что улучшает условия промывки межэлектродного промежутка.

Формообразование фасонной полости протекает по сценарию, ход которого аналогичен прошиванию полости постоянного сечения. При поступательном движении электрода-инструмента каждая его точка обеспечивает съем материала с элементарного участка на поверхности заготовки. Однако чем сложнее профиль ЭИ, тем большее влияние на процесс формообразования начинает оказывать износ электрода-инструмента, величина которого определяется не только режимами обработки, но и зависит от площади и глубины обработки, формы прошиваемой полости, условий эвакуации продуктов эрозии, наличия газов в зоне обработки и т.п. При изготовлении фасонной полости вначале в обработку может вступить участок электрода-инструмента малой площади, а по мере углубления в деталь площадь обработки увеличивается, постепенно к концу обработки достигая максимума. Поэтому с изменением площади обработки постепенно следует изменять величину рабочего тока. При обработке полостей небольшого поперечного сечения прокачка рабочей жидкости, как правило, затруднена, а в ряде случаев организовать ее невозможно. Для интенсификации процесса обработки чаще всего электроду-инструменту сообщается вибрация определенной частоты и амплитуды. Параметры вибраций оказывают влияние на скорость съема и устойчивость процесса обработки, поскольку при оптимальных их значениях со-

здаются условия для формирования рабочих импульсных разрядов. Кроме этого вибрации электрода-инструмента обеспечивают очистку межэлектродного промежутка за счет поршневого действия.

При обработке полостей, в которых имеются участки, сильно различающиеся по форме и сечению, следует учитывать различную величину износа каждого участка. Так, при прошивании может возникнуть задача обработки полости с остроугольными элементами, узкими пазами, отверстиями малого диаметра и др. элементами. При выполнении обработки части электрода-инструмента, служащие для прошивания таких участков полости, будут изнашиваться на черновых режимах более быстро, чем массивные части электрода, и до вступления в зону обработки основной части электрода-инструмента их форма может существенно отличаться от той, воспроизвести которую предстоит в заготовке. Чтобы сохранить приведенные элементы электрода-инструмента, следует использовать энергетически менее затратные режимы обработки, что существенно уменьшает производительность электроэрозионной обработки. Устранить износ электрода-инструмента полностью практически не удастся. Однако учесть его влияние на характер формообразования возможно. Рассмотрим возможность обработки в заготовке полостей различной формы. Например, затруднительно прошивать полости с остроугольными элементами. На черновых режимах наблюдается неодинаковый износ электрода-инструмента по мере его углубления в заготовку. Вследствие этого обработанный профиль может не иметь остроугольных переходов, а поверхности сопрягаются по радиусу различной величины. При необходимости переноса остроугольных элементов на обрабатываемую поверхность следует провести эксперимент, в результате которого оценивается характер износа элемента профиля от глубины обработки. Такого рода исследование позволит установить связь между высотой обрабатываемой полости и высотой элемента электрода-инструмента, который будет использоваться для выполнения обработки. Результаты эксперимента используют при определении формы ЭИ. Такой же метод применим и для коррекции формы электрода-инструмента, используемого для обработки узких полостей малых сечений, отверстий малого диаметра и т.п.

При формообразовании полостей различной конфигурации может использоваться орбитальное движение электрода-инструмента как сложной,

так и простой формы. Появляется возможность придавать поверхностям заготовки разнообразные формы, большинство из которых получить традиционными способами не представляется возможным. Для этих целей следует использовать широкие технологические возможности современных систем ЧПУ, обеспечивающих задание орбитального движения ЭИ по форме обрабатываемой полости. При этом *электрод-инструмент может совершать орбитальные движения без перемещения вглубь заготовки, так и при вертикальном перемещении в направлении обработки.* В первом из приведенных случаев производится доработка профиля полости до заданных размеров и формы на чистовых режимах обработки. Во втором случае орбитальное движение осуществляется при одновременном заглаблении электрода-инструмента в заготовку и улучшает условия протекания обработки. Точность формы образуемой поверхности определяется амплитудой круговых осцилляций ЭИ. *При небольшой амплитуде образуемая поверхность эквидистантна образующей поверхности электрода-инструмента.*

В процессе подачи ЭИ существует возможность за счет изменения амплитуды ОДЭИ получать на заготовке различные по форме поверхности. *Периодическое изменение величины бокового зазора улучшает условия удаления продуктов обработки и повышает эффективность электрической эрозии. Экономия времени на прошивание полостей с ОДЭИ по различным данным может достигать 200 – 500% по сравнению с традиционным копированием.* Кроме этого, появляется возможность использовать один и тот же электрод-инструмент для обработки полости, как на черновом, так и последующих режимах. Однако *при выполнении обработки с орбитальным движением электрода-инструмента имеет место неравномерный съем материала на различных участках заготовки,* причем на скорость съема оказывает влияние форма обрабатываемой полости, т.е. наличие горизонтальных, вертикальных, криволинейных и наклонных участков, величина припуска на обработку и другие факторы. *Вследствие неравномерного съема материала поверхность заготовки отличается от формы электрода-инструмента.* Кроме этого при использовании некоторых электродных материалов наблюдается деформирование электродов-инструментов, а в ряде случаев – даже их разрушение, особенно если в качестве электродного материала выбран графит.

При получении полостей и использовании для этой цели ОДЭИ площадь обработки может изменяться. При обработке участка малой площади припуск с нее удаляется практически полностью, в то время как при обходе большей площади часть припуска может остаться, т.к. интенсивность съема материала различных участков различна. В этом случае получаемая полость по форме и размерам будет отличаться от заданной. Для устранения возникающих погрешностей особенно при обработке полости, продольные и поперечные сечения которой существенно отличаются друг от друга, следует согласовывать амплитуду и частоту орбитальных осцилляций с размерами обрабатываемой площади. Уменьшить возникающие погрешности можно за счет устройств, которые обеспечивают высокую точность регулирования параметров ОДЭИ.

В некоторых случаях для повышения точности обработки полостей можно использовать дополнительные технологические приемы. Например, точность прошивания полости, форма которой образована вращением образующей, может быть повышена за счет вращения электрода-инструмента, который в это же время совершает орбитальные осцилляции. В некоторых случаях, наоборот, следует отказаться от ОДЭИ, а использовать только вращение электрода-инструмента вокруг своей оси для повышения точности прошивания.

2.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК

Детали изготавливаются, последовательно проходя операции механической и электроэрозионной обработки. После их выполнения изменяется форма, размеры исходной заготовки, свойства поверхностей.

В настоящее время большая часть заготовок обрабатывается в основном путем снятия слоя металла на традиционном металлорежущем оборудовании. Это связано с технологическими традициями, сложившимися в машиностроении и металлообработке, а также со значительными капитальными затратами, которые нужны для приобретения электроэрозионного оборудования.

Электроэрозионную обработку применяют обычно на заключительных операциях технологического процесса изготовления детали, чаще всего после термической обработки.

Операции делятся на черновые и чистовые. Каждая операция состоит из нескольких переходов. Количество переходов черновой обработки заготовки зависит от требований, предъявляемых к размерной точности и параметрам шероховатости обработанных поверхностей на чистовых режимах. Их количество выбирается с таким расчетом, чтобы обработка производилась в режиме максимальной производительности, но с минимально возможным износом ЭИ, а на последнем черновом переходе была получена шероховатость, которая при чистовой обработке должна быть уменьшена до величин, установленных в рабочем чертеже детали. При этом для получения оптимальной себестоимости электроэрозионной обработки количество переходов на черновых режимах не должно превышать 6 – 8. По окончании черновой обработки выполняют смену ЭИ и выполняют чистовую обработку. Для выполнения электроэрозионной обработки целесообразно использовать два электрода-инструмента, один из которых применяют для обработки на черновых режимах, а второй – на чистовых и доводочных.

Чистовая обработка также выполняется за несколько переходов. Определяющим фактором в этом случае является шероховатость поверхности. Количество переходов при чистовой обработке ограничивают до 6 – 12, если нет особых требований к точности размеров детали или параметрам шероховатости. Чистовая обработка производится на мягких режимах последовательным переходом через ряд ступеней режимов в высокочастотный диапазон следования импульсных разрядов.

В большинстве случаев детали проходят операции электроэрозионного полирования и выхаживания. Количество переходов при доводке поверхностей в этом случае определить практически невозможно. Ориентируются главным образом на достижение необходимого результата после обработки, в основном, по шероховатости поверхности. Время обработки при доводке определяется технологическими возможностями применяемого оборудования и составляет в зависимости от сложности работ десятки часов. Операции электроэрозионной доводки позволяют изготавливать детали штампов, литьевых форм практически любой сложности, причем без переустановки со станка на станок.

Черновые и чистовые операции электроэрозионной обработки выполняют, последовательно переходя от одного режима обработки к другому. На каждом последующем режиме обработки силу тока в импульсе и его длитель-

ность снижают. Производительность обработки снижается, однако качество обработанной поверхности улучшается.

2.5. СОЧЕТАНИЯ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ И РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ

Правильный выбор материала ЭИ оказывает существенное влияние на стабильность процесса электроэрозионной обработки. При выборе материала электрода-инструмента следует учитывать его стоимость, дефицитность, устойчивость эрозии, обрабатываемость и некоторые другие факторы. С учетом электроэрозионной обрабатываемости и полярного эффекта электрической эрозии выбирают такие пары материалов электрода-инструмента и заготовки, которые обеспечивают максимальную эрозию материала заготовки при минимальном износе ЭИ и соответственно максимальную производительность обработки.

При прошивочной обработке различных материалов, по данным Char-milles Technologies, Sodick и других изготовителей электроэрозионного оборудования *широко используются следующие сочетания материалов электрода-инструмента и заготовки: ЭИ – медь, заготовка – сталь; медь – медные сплавы; медь – жаропрочные сплавы на никелевой основе; углеродистая или низколегированная сталь – сталь; графит – жаропрочные или коррозионно-стойкие стали; алюминий – стали и жаропрочные сплавы на никелевой основе; мелкодисперсный графит – титан; мелкодисперсный графит – сталь; медь-вольфрамовые композиции – твердые сплавы и тугоплавкие материалы; чугун – твердый сплав.* Рассмотрение приведенных выше сочетаний объясняется тем, что в настоящее время доля импортного оборудования в станочном парке предприятий республики постоянно увеличивается.

Наиболее удобной с точки зрения обеспечения стабильности эрозии материала заготовки, возможности подвода большой мощности к обрабатываемой поверхности для различных групп обрабатываемых материалов является чистая медь. Основными видами заготовок из меди, которые используют затем для изготовления электродов-инструментов, являются прутки и трубы различного профиля, а также листовые заготовки. *ЭИ из меди применяют в основном для обработки сквозных отверстий и полостей сложной формы в заготовках*

из стали при параметрах шероховатости обработанных поверхностей 1,6 – 20 мкм (Ra). Величина тока при обработке изменяется в пределах от 4 до 96А. Износ медных электродов-инструментов зависит от режимов обработки. При выполнении обработки в режиме максимальной производительности (при использовании так называемых скоростных режимов) износ ЭИ в зависимости от параметров режима изменяется от 0,2 до 14%, для грубых режимов – 18 – 34%. Для получения шероховатости поверхности около 10 – 16 мкм (Ra) применяют режимы обработки, при использовании которых износ электрода-инструмента 0,2 - 2%. Для получения поверхностей, параметры шероховатости которых составляют 3,2 – 4 мкм (Ra), применяют режимы обработки, при которых износ ЭИ достигает 10 – 14%. Могут применяться так называемые малоизносные режимы обработки. Скорость съема материала в этом случае уменьшается примерно в 2 раза, а износ электродов-инструментов составляет всего 0,2 – 5%. В некоторых случаях обработку выполняют на промежуточных (компромиссных) режимах. При использовании таких режимов производительность обработки уменьшается на 15-30% по сравнению с режимами, обеспечивающими максимальную скорость съема материала, а износ электродов-инструментов в большинстве случаев не превышает 2,5 – 7,5%. Параметры шероховатости обработанных поверхностей выше – 1,8 – 7 мкм (Ra). Использование малоизносных и компромиссных режимов обработки позволяет уменьшить затраты на изготовление ЭИ, особенно сложной формы, которые при обработке полостей на энергетически затратных режимах быстро изнашиваются. При доводке стальных деталей ЭИ из меди износ электродов в зависимости от режима обработки изменяется в пределах 30 – 45%.

В некоторых случаях ЭИ из чистой меди можно использовать для обработки медных сплавов. Однако диапазон режимов обработки невелик. Параметры шероховатости поверхностей заготовок после обработки составляют 3 – 8 мкм (Ra) при токах 16 – 48А. Износ ЭИ составляет: на режимах, обеспечивающих скорость съема 20 – 120 мм³/мин и гарантирующих получение поверхностей с шероховатостью 2,5 – 4,5 мкм (Ra) – 6 – 10%, при использовании более производительных режимов (до 160 мм³/мин) и шероховатости обработанных поверхностей 4 – 8 мкм (Ra) – 1,5 – 5,5%, при скорости съема материала 50 – 140 мм³/мин и шероховатости обработанных поверхностей 5 – 6,5 мкм (Ra) – 0,5 – 1%.

К недостаткам приведенного электродного материала *следует отнести высокую стоимость меди и плохую обрабатываемость резанием*. Кроме этого при обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов ЭИ из меди имеют высокий износ.

При электроэрозионной обработке заготовок из сталей и жаропрочных материалов на никелевой основе применяют пористую медь, электроды-инструменты из которой изготавливают методами порошковой металлургии. В качестве материала используют порошки меди ПМС, ПМА и др. марок. Использование таких ЭИ позволяет проводить обработку с производительностью в 1,2 – 1,6 раза большей, чем при использовании электродов-инструментов из чистой меди марок М1, М2, М3 и др. При этом износ ЭИ уменьшается в 1,2 – 1,4 раза.

Недорогим материалом, который может применяться при изготовлении электродов-инструментов, используемых затем для обработки заготовок из сталей, являются инструментальные углеродистые и низколегированные стали. Максимальная производительность обработки при их использовании таких электродных материалов не превышает 100 – 110 мм³/мин (при максимальной величине тока 128А), а параметры шероховатости обработанных поверхностей – 6,3 – 8 мкм (Ra). При получении более чистых поверхностей (Ra 2 – 5 мкм) производительность обработки составляет 1,5 – 3,5 мм³/мин (при токах до 12А). Обработку заготовок электродами-инструментами из сталей можно производить, используя для этого высокоскоростные, а также малоизносные и компромиссные режимы. Режимы обработки, при осуществлении которых съем материала производится с высокой скоростью, обеспечивают шероховатость поверхностей после обработки 2 – 6,3 мкм (Ra) при износе электрода-инструмента 60 – 100%. Уменьшение скорости съема позволяет уменьшить износ электродов-инструментов до 25%. Шероховатость обработанных поверхностей после обработки составляет в этом случае 3,5 – 6,3 мкм (Ra). При выполнении обработки с еще меньшими скоростями съема износ может быть уменьшен до 10%. Шероховатость поверхностей после обработки составляет 4,5 – 8 мкм (Ra). На чистовых режимах обработки износ электродов-инструментов может быть уменьшен до 1% при шероховатости поверхностей после обработки 5 – 8 мкм (Ra).

При обработке углеродистых, инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе используют, кроме электродов-

инструментов из сталей и меди, *графитовые электроды-инструменты*. Производительность черновой обработки составляет 800 – 850 мм³/ мин. Максимальная величина тока при обработке достигает в этом случае 128А. Параметры шероховатости обработанных поверхностей колеблются в пределах 11 – 20 мкм (Ra). При чистовой обработке поверхностей, параметры шероховатости которых составляют 1,6 – 2, 5 мкм (Ra), производительность минимальная и не превышает 4 – 4,5 мм³/ мин, а величина тока при обработке изменяется в пределах 4 – 6А. Как черновая, так и чистовая обработка выполняется последовательным переходом через ряд ступеней режимов. При использовании графита в качестве материала ЭИ обработка может производиться на высокоскоростных, средних (компромиссных) и малоизносных режимах.

При черновой обработке сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе при шероховатости поверхностей ≥ 20 мкм (Ra) кроме приведенных материалов могут использоваться алюминиевые сплавы. Для изготовления ЭИ применяют прутки круглого, квадратного и шестигранного сечения. Проведенные материалы по износу близки к меди, однако стабильность эрозии несколько ниже, а диапазон обрабатываемых материалов и режимов уже, чем у ЭИ из меди. Причем на износ таких материалов оказывает большое влияние форма рабочей части ЭИ. На выступающих элементах рабочего профиля электрода-инструмента износ резко возрастает. Кроме этого *на величину износа ЭИ из алюминия оказывает большое влияние плотность материала, поэтому дополнительное уплотнение материала электрода различными способами (например, методами обработки металлов давлением) повышает его эрозионную стойкость.*

Для обработки заготовок из сталей могут применяться электроды-инструменты из мелкодисперсного (так называемого тонкого) графита. Максимальная скорость съема металла при выполнении черновых проходов достигает 550 мм³/ мин при шероховатости обработанных поверхностей в пределах 12,5 – 20 мкм (Ra). Меньшие параметры шероховатости (Ra 1,6 – 2,5 мкм) могут быть получены на чистовых режимах. Производительность обработки для этих режимов составляет 4 – 18 мм³/ мин. Величина тока при обработке изменяется от 4 – 6 до 128А.

Электроды-инструменты из меди и графита могут использоваться при выполнении доводочных работ (полировании) поверхностей деталей из

сталей. Скорость съема металла в этом случае невелика и не превышает 2 мм³/ мин при получении на детали поверхности с Ra 1,26 мкм. При необходимости получения на детали поверхности, шероховатость которой не превышает 0,1 мкм, производительность съема металла составляет 0,03 мм³/ мин для ЭИ как из меди, так и графита. Различен лишь износ электродов-инструментов. Например, для одних и тех же режимов обработки он составляет: для ЭИ из меди – 20%, для графитового электрода-инструмента – 190%.

Электроды-инструменты из мелкодисперсного графита могут применяться при обработке заготовок из титана. Максимальная скорость съема материала при обработке достигает 600 мм³/ мин при величине тока 64А, а параметры шероховатости поверхностей, обработанных при использовании высокопроизводительных режимов обработки, составляют 20 – 22 мкм (Ra). Минимальная шероховатость поверхностей заготовок из титана – 2,5 – 3,2 мкм (Ra) достигается при скорости съема не более 18 – 25 мм³/ мин и импульсах тока до 8А. Износ электродов-инструментов при выполнении обработки существенно зависит от параметров шероховатости поверхностей.

При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и других компонентов широко применяют ЭИ из композиционных материалов, содержащих медно-вольфрамовые композиции, т.к. графитовые электроды не обеспечивают высокой производительности из-за низкой стабильности электрической эрозии, а медные ЭИ имеют высокий износ. Вольфрам является материалом высокой эрозионной стойкости. Однако высокая стоимость и плохая обрабатываемость позволяют использовать его только в виде проволоки или лент при выполнении вырезных работ и при прошивании отверстий в сталях и жаропрочных сплавах. В других случаях используются медно-вольфрамовые композиции. При обработке твердых сплавов производительность может достигать 95 – 100 мм³/ мин (при величине тока 64А). Параметры шероховатости при этом колеблются в пределах 3,2 – 6,3 мкм (Ra). При получении более чистых поверхностей (Ra 1 – 3,2 мкм) производительность обработки не превышает 12 мм³/ мин (ток в импульсе составляет 16А).

В некоторых случаях при прошивании деталей из твердых сплавов в весьма узком диапазоне режимов обработки и при невысокой мощности импульсных разрядов применяются электроды-инструменты из серого чугуна.

В диапазоне стабильных режимов обработки износ ЭИ из чугуна практически сравним с износом медных электродов-инструментов.

Из перечисленных электродных материалов *наиболее износостойким является электроэрозионный графит. К недостаткам графита следует отнести сложность его обработки традиционными методами и вследствие этого необходимость применения специального оборудования.* Возможна обработка графита на традиционном металлорежущем оборудовании, однако необходимо обеспечить высокие скорости резания и подачи, а для удаления мелкодисперсной пыли станки должны оснащаться пылеулавливающими устройствами, либо могут использоваться масляные или водные завесы. Для обработки графита достаточно широко применяются электроэрозионное вырезание и прошивочная обработка.

Обработка электродов-инструментов из приведенных выше материалов производится в настоящее время различными способами. К числу таких способов относят обработку резанием на различных металлорежущих станках, порошковую металлургию, волочение, прессование, различные виды электроэрозионной обработки.

Вырезная обработка осуществляется электродом-инструментом в виде проволоки различного диаметра. Проволока изготавливается из меди, вольфрама, молибдена, латуни с покрытием. Такие материалы позволяют производить электроэрозионную обработку сложных контуров и отверстий в заготовках из токопроводящих материалов. Для электроэрозионного вырезного оборудования, используемого в настоящее время в различных отраслях промышленности, применяют проволоку диаметром от 0,03 до 0,36 мм. Проволока малых диаметров (до 0,1 мм) используется для выполнения работ в микроэлектронике, часовой промышленности, при изготовлении высокоточных деталей позиционирующих устройств, измерительных машин. Для нужд инструментального производства применяют в основном проволоку диаметром от 0,15 до 0,25 мм.

2.6. ВЫБОР РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ

В большинстве случаев получить за один переход или операцию поверхность, форма и размеры которой, а также параметры шероховатости соответствовали бы требованиям чертежа, практически не удается. Поэтому со-

ставляют такую последовательность переходов, по окончании которой технические требования, предъявляемые к детали, будут выполнены. Применяемые режимы электроэрозионной обработки подразделяются на черновые, чистовые и отделочные (доводочные).

Заданная точность и чистота поверхностей детали обеспечивается на чистовых и доводочных режимах обработки. При выполнении черновой обработки ступени режимов, на которых она выполняется, выбирают так, чтобы удаление припуска осуществлялось с максимальной скоростью.

Скорость съема материала с заготовки определяется величиной тока и энергией импульса. В общем случае для определения величины тока используют предельно допустимые значения плотности тока, которые зависят от площади обработки, полярности включения электрода-инструмента, материала ЭИ и заготовки. Для некоторых электродных материалов значения допустимой плотности рабочего тока в соответствии с площадью обработки представлены в таблице 2.9. Как следует из таблицы, наибольшие плотности тока могут быть использованы, когда в качестве материала электрода-инструмента применяется электролитическая медь.

Таблица 2.9

Материал ЭИ	Площадь обработки, см ²											
	0,1	0,5	1	5	10	20	50	100	300	500	700	1000
Медь	28,09	18,78	15,79	10,58	8,88	7,47	5,95	4,99	3,81	3,36	3,07	1,82
Сталь углеродистая	9,96	6,66	5,60	3,75	3,15	2,65	2,11	1,77	1,35	1,19	1,09	1
Графит (плотностью 1,65 г/см ³) в направлении: параллельном оси прессования; перпендикулярном оси прессования	15,44	10,32	8,68	5,81	4,88	4,11	3,27	2,74	2,09	1,84	1,79	1,55
	12,05	8,06	6,78	4,54	3,81	3,21	2,55	2,14	1,63	1,44	1,32	1,21
Графит (плотностью 1,6 г/см ³) в направлении, перпендикулярном оси прессования	9,6	6,5	5,42	3,63	3,05	2,56	2,04	1,71	1,3	1,14	1,05	0,97

При обработке сталей и твердых сплавов в качестве материала для изготовления ЭИ могут использоваться также медно-вольфрамовая и медно-графитовая композиции. Плотность тока при обработке стали электродами-инструментами из медно-графитовой композиции на обратной полярности составляют: при площади обработки до 15 см² – 3 – 8 А/см², при большей площади обработки – 8 – 12 А/см². При обработке стали электродами-инструментами из той же композиции но на прямой полярности значения

плотности тока составляют следующие значения: при площади обработки более 15 см^2 – $6 - 18 \text{ А/см}^2$. При обработке твердых сплавов электродами-инструментами из медно-вольфрамовой композиции при площади обработки свыше 15 см^2 и обратной полярности включения ЭИ и заготовки плотность тока составляет $5 - 7 \text{ А/см}^2$, при обратной полярности – 15 А/см^2 .

При увеличении площади обработки плотность тока уменьшается и ограничивается величиной тока, которую может выдать генератор импульсов соответствующего станка. Для генераторов импульсов современных станков в настоящее время величина тока не превышает $40 - 128 \text{ А}$ (по данным Charmilles Technologies, Sodick и др. фирм). Достаточно редко эрозионные станки названных фирм комплектуются бустерами, рассчитанными на $160, 200, 240 \text{ А}$. Большие токи используют при обработке заготовок на крупногабаритных электроэрозионных установках.

Величину тока на черновых режимах обработки выбирают по величине площади обработки. Кроме этого могут использоваться и номограммы. Для определения величины тока для выполнения первого чернового прохода поступают следующим образом (применительно к станкам, например, Charmilles Technologies). В соответствии с рекомендациями, изложенными в технологических инструкциях станков, максимально допустимая плотность тока при обработке стали электродами-инструментами из меди или графита не должна превышать $8 - 10 \text{ А/см}^2$, при обработке медных сплавов ЭИ из меди, стали электродами из стали – $6 - 8 \text{ А/см}^2$ и т.п. По известной площади обработки определяют силу тока, величину которой используют для последующего ее задания в программе обработки. При прошивании полостей сложной формы определяют площадь проекции обрабатываемой поверхности на плоскость перпендикулярную направлению подачи электрода-инструмента. Зная величину силы тока по таблице технологической инструкции (табл. 2.10) определяют ступень тока (**P**), при включении которой соответствующая мощность импульса будет подведена в МЭП. Включение заданного режима работы генератора импульсов может производиться вручную на пульте генератора импульсов либо по программе от системы ЧПУ. В программу записывают соответствующие настройки генератора импульсов. Настройка режима обработки включает задание соответствующей ступени тока (мощности или энергии) импульсного разряда и определенной длительности импульса.

Таблица 2.10

P, положение указателя энергии импульса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I(A), максимальный ток в импульсе	1	1,5	2	3	4	6	8	12	16	24	32	48	64	96	128

Длительность импульсных разрядов (А, мкс) изменяется дискретно, определяется включением соответствующей ступени в режиме настройки генератора импульсов и соответствует значениям, которые заложены в технологические таблицы настройки генератора импульсов конкретного станка.

К главным параметрам, которые необходимо определить для выполнения обработки на прошивочных станках, относятся:

- *постоянные, не изменяемые после задания и при выполнении соответствующей ступени режима. К числу таких параметров относятся, кроме приведенных выше, номер настройки режима работы генератора импульсов, максимальное и среднее напряжение при обработке;*

- *вторичные, изменяемые при обработке, параметры, зависящие от условий образования и удаления продуктов обработки. К таким параметрам относятся длительность паузы между импульсами, время возврата ЭИ в зону обработки после релаксации, время обработки между двумя релаксациями, уровень защиты генератора импульсов от возникающих в процессе обработки коротких замыканий. В ряде случаев приведенные параметры в процессе обработки могут оптимизироваться адаптивной системой станка на максимальный съем материала, а в остальных случаях задаются конкретные значения перечисленных параметров и обработка производится при заданных значениях. Приведенные параметры определяют производительность обработки, качество поверхности (ее шероховатость) и износ ЭИ.*

Взаимосвязь между режимами обработки и обеспечиваемой при этом скоростью съема и шероховатостью обработанной поверхности можно проследить на диаграммах, приведенных в технологических инструкциях. Рассмотрим кривые, характеризующие изменение скорости съема при прошивании отверстий или полостей в сталях электродами-инструментами из мелкодисперсного графита и параметры шероховатости поверхностей, которые получены на различных режимах, показанные на рис. 2.5 (по обработке других материалов приведены в Приложении).

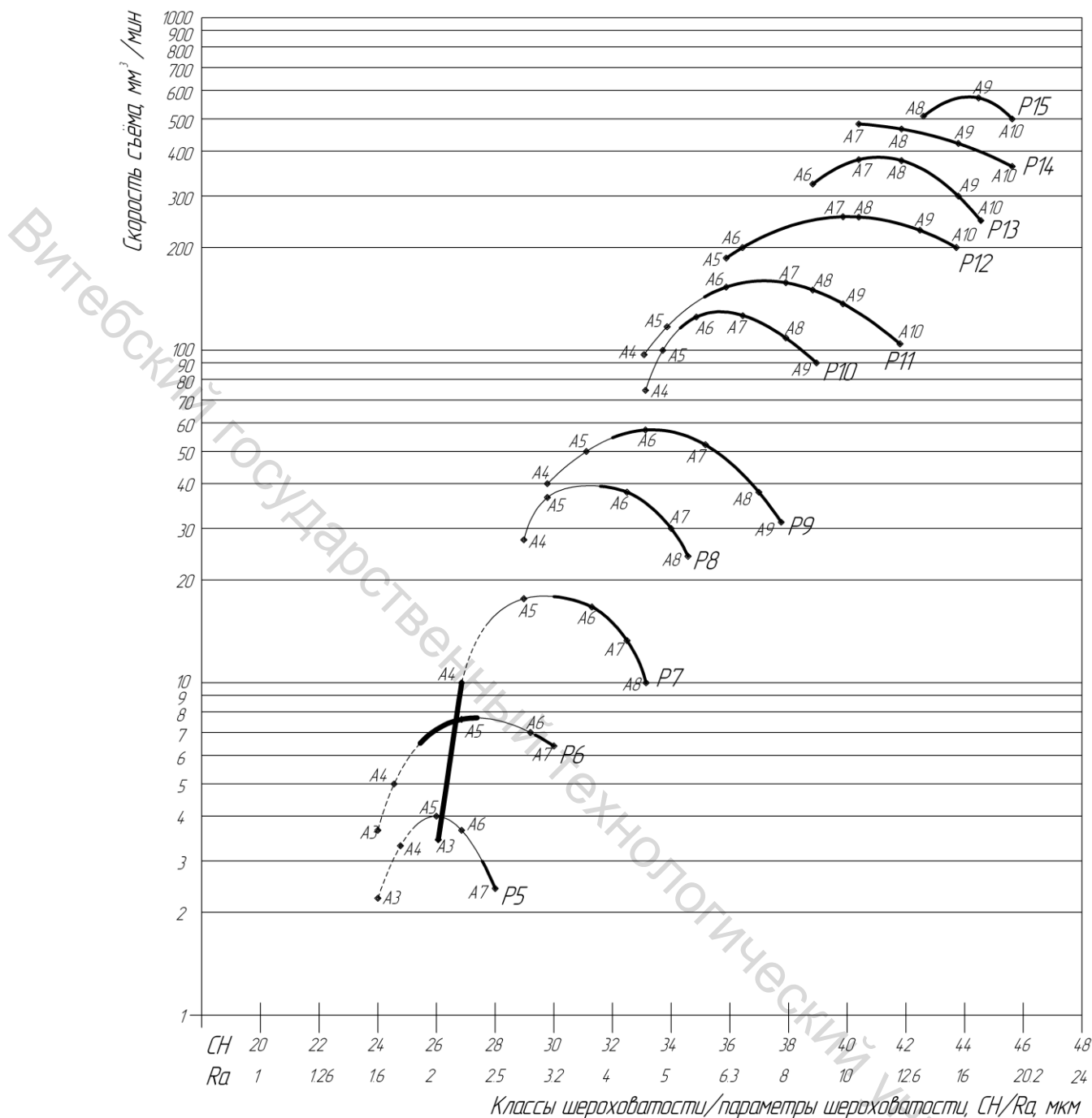


Рис. 2.5. Скорости съема и параметры шероховатости (классы шероховатости SN) при обработке сталей электродами-инструментами из мелкодисперсного графита для различных режимов обработки: P_i - степень тока, A_i - длительность импульсов

Приведенные зависимости позволяют определить производительность обработки для различных режимов при условии достижения соответствующей шероховатости поверхности. В соответствии с кривыми (рис. 2.5) при одной и той же энергии импульсов (**P** или мощности импульса), задаваемой включением соответствующего номера ступени, но различной длительности

импульса (**A**) могут быть выбраны режимы, обеспечивающие обработку с различной производительностью. Бóльшей величине тока соответствует бóльшая длительность импульса. При черновой обработке стремятся добиться максимальной производительности. Различным режимам обработки соответствует определенный износ электрода-инструмента. Так для режимов, показанных на рис. 2.5, износ электрода-инструмента составляет значения, приведенные в таблице 2.11.

Таблица 2.11

Тип линии	Величина износа
—————	2.5 %
- - - - -	10 %
—————	25 %
—————	50 %
- - - - -	100 %

В соответствии с приведенной выше таблицей и зависимостями, показанными на рис. 2.5, следует, что *при получении поверхностей с минимальной шероховатостью износ электрода-инструмента может достигать 100%*, а количество режимов, последовательный переход от одного из которых к другому обеспечивает достижение требуемой шероховатости, велико. *Для ограничения количества режимов обработки, использование которых позволяет получить деталь с заданными размерами и шероховатостью поверхностей, они сгруппированы и образуют так называемые классы настройки генератора импульсов соответствующего станка. При этом последовательность режимов обработки для каждого класса настройки составлена так, чтобы при переходе от одного режима обработки к следующему режиму шероховатость обработанной поверхности уменьшалась (на один шаг Ra или 2 класса SN и т.д.).* Для каждого режима одного класса настройки генератора импульсов указаны конкретные значения ступени тока (мощности) импульса и его длительности, а также приведены значения износа электрода-инструмента. Рассмотрим классы настройки генератора импульсов, приведенные в таблице 2.12 (Charmilles Technologies), которые могут быть использованы при определении последовательности режимов обработки сталей электродами-инструментами из мелкодисперсного графита, а также соответствующие режимам энергию и ток импульсного разряда, износ ЭИ и другие параметры.

Таблица 2.12

Класс 0	Класс 1				Класс 2				Класс 3				Класс 4				Класс 5	Класс 6	Класс 9			
	Скоростной				Компромисс- ный				Малоизнос- ный				Малоизнос- ный						Доводоч- ный			
	Е	Р	А	v, %	Е	Р	А	v, %	Е	Р	А	v, %	Е	Р	А	v, %			Е	Р	А	v, %
									463	14	10	-	464	15	10	-						
									453	15	9	0,1	454	13	10	-						
					442	15	8	0,3	443	14	9	0,1	444	12	10	-						
	431	15	8	0,3	432	15	8	0,3	433	12	9	0,1	434	13	9	-						
	421	14	8	0,2	422	14	8	0,2	423	13	8	0,2	424	11	10	-						
	411	14	6	1,5	412	14	7	0,9	413	13	7	0,9	414	12	8	0,2						
	401	12	7	0,5	402	12	7	0,5	403	11	8	0,5	404	11	9	-						
	391	13	6	0,15	392	11	8	0	393	11	8	0,5	394	10	9	-						
	381	11	7	0,15	382	11	7	0,15	383	10	8	0,2	384	9	9	-						
	371	12	6	1	372	10	7	0,7	373	9	8	0,15										
	361	12	5	1,4	362	11	6	0,7	363	8	8	0,15										
	351	12	4	5	352	11	5	5	353	9	7	0,2										
	341	11	4	8	342	10	6	1,5	343	8	7	0,2										
	331	10	5	5,4	332	9	6	0,38	333	7	8	-										
	321	10	4	8,8	322	8	6	0,55	323	7	7	0,4										
	311	10	3	12	312	9	5	2,6	313	7	6	1,7										
	301	9	4	10	302	8	5	3,3	303	6	7	1,15										
	291	8	4	10	292	7	5	6,2	293	6	6	3										
	281	9	3	16	282	7	4	15	283	5	7	0,5										
	271	8	3	10	272	6	5	7,5	273	5	6	3										
	261	7	3	26	262	6	4	12	263	5	5	9										
					252	6	4	12	253	5	4	17										
					242	6	3	23	243	5	3	25										
									223	C6	M4	120										
									203	C5	M4	120							169	C6	M6	100
									183	C4	M4	150							129	C5	M6	100
									143	C3	M4	190							009	C3	M6	100

В зависимости от скорости удаления припуска на обработку классы настройки генератора импульсов разделены на скоростные, малоизносные и компромиссные. При использовании последних производительность обработки и износ электрода-инструмента имеет средние между скоростными и малоизносными режимами значения.

В таблице указаны: **E** – режим работы генератора импульсов; **P** – ступень тока, определяющая величину тока при обработке (например, **P15** – указанной ступени соответствует максимальный ток при обработке 128А); **A** – указывает номер ступени, задающей длительность импульса; **v** – относительный объемный износ электрода-инструмента в %; **C** – указывает номер ступени, ко-

торая определяет при доводочной обработке включение требуемого количества одновременно работающих в зарядной цепи конденсаторов, в результате чего в МЭП будет подаваться заданный ток (мощность импульсов); *M* – указывает номер ступени, при задании которой режим обработки определяется формой переднего фронта импульса (задается при выполнении черновой, чистовой и доводочной обработки).

Обозначение режимов работы включает три цифры (например, **E401**), первые две из которых указывают на шероховатость поверхности после обработки на выбранном режиме в соответствии с классами шероховатости, принятыми, например, Charmilles Technologies (их можно перевести в Ra, R_{max}), а третья цифра соответствует классу настройки генератора импульсов. Сочетания величины тока импульсного разряда и его длительности выбраны в каждом классе настройки генератора импульсов так, чтобы при обработке с максимальной производительностью достигались заданные параметры шероховатости поверхности при минимальном для данных условий обработки износе электрода-инструмента. Такие данные получают обычно при тестировании оборудования после сборки. Для сравнения скорости съема и износа ЭИ при использовании для обработки различных классов настройки генератора импульсов используют диаграммы, одна из которых показана на рис. 2.6.

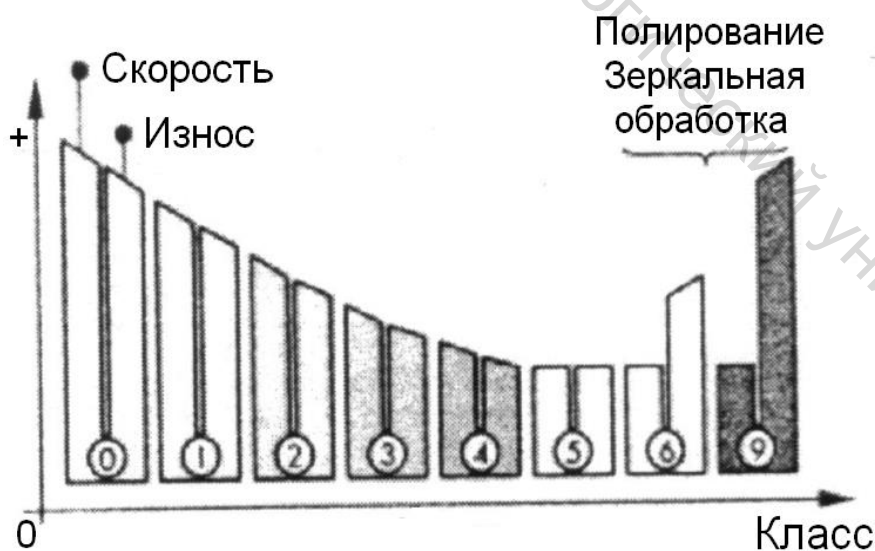


Рис.2.6. Зависимость скорости съема и износа ЭИ от класса настройки режимов работы генератора импульсов

Как следует из приведенного выше рисунка, *скорость и относительный износ ЭИ определяются классом настройки режимов генератора*. Поскольку режимы работы генератора импульсов нулевого класса при обработке сталей электродами-инструментами из мелкодисперсного графита не используются, режимы обработки, выбранные из первого класса, обеспечивает самую высокую скорость удаления припуска с заготовки, однако суммарный износ электрода-инструмента при выполнении всех переходов обработки через соответствующие ступени режимов в этом случае также высок. Режимы обработки, выбранные из второго класса настройки генератора импульсов, при некотором снижении производительности обработки позволяют уменьшить износ ЭИ. Следующие классы настройки режимов позволяют уменьшить износ электродов-инструментов, однако производительность обработки в этом случае существенно уменьшается по сравнению с другими классами настройки. Например, пусть поверхности детали после обработки должны иметь шероховатость не более 6,3 мкм (Ra). Указанной шероховатости соответствует 36 класс шероховатости Charmilles Technologies. В соответствии с рис. 2.5 и таблицей 2.12 для достижения заданных параметров шероховатости могут быть использованы режимы обработки из 1, 2 и 3 классов настройки генератора импульсов. Использование скоростных режимов удаления припуска обеспечивает производительность обработки около 180 мм³/мин при относительном износе электрода-инструмента 1,4%. Применение компромиссных режимов работы генератора импульсов позволяет при некотором уменьшении производительности обработки (до 160 мм³/мин) уменьшить износ ЭИ до 0,7%. При обработке заготовки на малоизносных режимах износ ЭИ может быть уменьшен до 0,15%, однако производительность обработки падает весьма значительно и составляет около 25 мм³/мин.

При выборе последовательности режимов необходимо учитывать зависимость параметров шероховатости обработанных поверхностей от площади обработки (см. табл. 2.4 и рис. 2.1), а также иметь данные о шероховатости поверхности после выполнения операции, предшествующей электроэрозионной обработке. Чем грубее поверхность перед выполнением электроэрозионной обработки, тем большее количество ступеней режимов необходимо использовать для выполнения не только черновой, но и чистовой и особенно доводочной электроэрозионной обработки. Последовательность

режимов обработки следует разделить так, чтобы количество переходов черновой и чистовой обработки при переходе от одной ступени режимов к другой было примерно одинаково. При переходе к чистовым режимам следует произвести замену ЭИ. *Проведение черновой обработки рекомендуется выполнять на режимах, обеспечивающих удаление припуска с максимальной скоростью съема. Первый черновой и чистовой переходы выполняют при вертикальном перемещении электрода-инструмента вглубь заготовки (методом прямого копирования). Все последующие переходы черновой и чистовой обработки полости производят, задавая электроду-инструменту орбитальное движение с определенной амплитудой.* При переходе к чистовым режимам обработку поверхности выполняют на ряде последовательных режимов для достижения параметров шероховатости, заданных в чертеже готовой детали. Для выполнения черновой и чистовой обработки рассчитывают и изготавливают электроды-инструменты. *При расчете размеров электродов-инструментов необходимо знать межэлектродные зазоры.*

*Данные о межэлектродных зазорах приведены в соответствующих технологических таблицах. В таблицах 2.13 – 2.14 приведены величины межэлектродных зазоров для различных значений тока и длительности импульсных разрядов при обработке полостей разной глубины. В таблицах **P** и **A** обозначают соответственно ступени тока и длительности импульсов, при которых будет выполняться обработка, а цифры на пересечении определенного столбца и строки указывают: верхняя – величину межэлектродного зазора, нижняя – соответствующий зазору режим обработки.* В таблицах 2.13 – 2.14 указаны максимальные величины межэлектродного зазора, используя которые учитывают высоту микронеровностей после обработки, величину дефектного слоя, необходимость возможной доводки размеров и формы полости на последующих переходах за счет ОДЭИ, амплитуда которого может быть определена после получения данных о соответствии размеров полости заданным рабочим чертежом. В целях сокращения затрат времени на выполнение последующих переходов обработка может производиться на режимах, приведенных в таблицах 2.15, однако величины межэлектродных зазоров будут меньшими.

Таблица 2.13

Максимальный межэлектродный зазор при глубине обработки ≤ 10 мм (при объемном копировании) для соответствующего режима обработки, мкм								
P/A	3	4	5	6	7	8	9	10
15						360 431	480 452	600 464
14				250 401	300 411	340 421	420 442	560 463
13				230 391	295 412	340 422	390 432	520 453
12		145 351	170 361	195 371	265 402	325 423	380 433	460 443
11		130 341	150 352	180 362	225 381	260 392	300 403	350 424
10	105 311	130 321	165 331	180 342	220 372	245 382	270 393	
9	80 281	105 301	120 312	145 332	190 363	225 373	250 383	
8	75 271	95 291	110 302	135 322	165 343	200 364		
7	75 261	90 282	100 292	120 313	130 323	150 333		
6	70 242	75 262	85 272	100 293	110 303			
5	65 243	70 253	80 263	85 273	95 283			

Таблица 2.14

Максимальный межэлектродный зазор при глубине обработки ≤ 30 мм (при объемном копировании) для соответствующего режима обработки, мкм								
P/A	3	4	5	6	7	8	9	10
15						460 431	560 452	700 464
14				320 401	380 411	430 421	540 442	680 463
13				300 391	370 412	430 422	470 432	630 453
12		180 351	210 361	250 371	340 402	420 423	470 433	560 443
11		160 341	180 352	220 362	280 381	320 392	360 403	420 424
10	130 311	160 321	190 331	220 342	260 372	290 382	325 393	
9	100 281	130 301	145 312	175 332	225 363	270 373	300 383	
8	90 271	115 291	135 302	165 322	195 343	240 364		
7	90 261	105 282	120 292	135 313	160 323	180 333		
6	80 242	90 262	105 272	115 293	130 303			
5	75 243	80 253	95 263	105 273	110 283			

В таблице 2.15 указаны средние для соответствующих режимов обработки значения межэлектродных зазоров, учитывающие собственно межэлектродный зазор и некоторый запас, равный 10Ra. Такой запас может использоваться для удаления дефектного слоя и последующей доводки за счет ОДЭИ, амплитуда которого может быть найдена без измерения размеров полости в детали.

Таблица 2.15

Средний межэлектродный зазор (с запасом 10Ra) при глубине обработки ≤ 30 мм (при объемном копировании) для соответствующего режима обработки, мкм								
P/A	3	4	5	6	7	8	9	10
15						285 431	370 452	470 464
14				200 401	240 411	270 421	335 442	450 463
13				185 391	235 412	270 422	310 432	415 453
12		115 351	135 361	155 371	210 402	260 423	305 433	370 443
11		105 341	120 352	145 362	180 381	210 392	240 403	280 424
10	85 311	105 321	130 331	145 342	175 372	195 382	215 393	250
9	65 281	85 301	95 312	115 332	150 363	180 373	200 383	220
8	60 271	75 291	90 302	110 322	130 343	160 364		
7	60 261	70 282	80 292	90 313	105 323	120 333		
6	55 242	60 262	70 272	75 293	85 303			
5	50 243	55 253	65 263	70 273	75 283			

Таблица 2.16

Средний межэлектродный зазор (измеренный) при глубине обработки ≤ 30 мм (при объемном копировании) для соответствующего режима обработки, мкм								
P/A	3	4	5	6	7	8	9	10
15						145 431	190 452	265 464
14				100 401	125 411	140 421	175 442	245 463
13				95 391	120 412	140 422	170 432	235 453
12		55 351	70 361	85 371	110 402	130 423	165 433	210 443
11		55 341	65 352	80 362	100 381	120 392	140 403	155 424
10	50 311	65 321	85 331	95 342	105 372	115 382	125 393	
9	40 281	50 301	60 312	70 332	85 363	110 373	120 383	
8	35 271	45 291	55 302	70 322	80 343	95 364		

7	40 261	45 282	50 292	55 313	65 323	75 333		
6	38 242	40 262	45 272	48 293	55 303			
5	35 243	38 253	42 263	45 273	50 283			

Величины реальных межэлектродных зазоров, измеренные в лабораторных условиях, для соответствующего станка при задании определенных режимов обработки стали электродами-инструментами из мелкодисперсного графита приведены в таблице 2.16.

При выборе класса настройки генератора импульсов для выполнения орбитальной обработки следует учитывать площадь обработки.

В соответствии с рекомендациями производителей при обработке поверхностей площадью менее 20 см² наиболее целесообразно использовать компромиссные (из 2 класса) или малоизносные (из 3 класса) режимы настройки генератора импульсов. Для случая, когда площадь обработки больше 20 см², но не превышает 60 см², обработку рекомендуется выполнять на компромиссных (2 класса) режимах. При площади обработки более 60 см² могут использоваться скоростные (1 класса) или компромиссные (2 класса) режимы удаления припуска.

Использование приведенных выше данных по выбору режимов обработки заготовок из сталей электродами-инструментами из мелкодисперсного графита гарантирует наилучшие результаты по точности обработанных полостей и отверстий.

Выбранные параметры могут обеспечить обработку с заданной скоростью съема и гарантировать параметры шероховатости поверхностей при условии применения рабочей жидкости с определенной вязкостью и температурой вспышки.

Поскольку обработка полости кроме первого черногового и чистового переходов выполняется с орбитальным движением ЭИ, следует учитывать износ последнего в направлении, совпадающем с направлением орбитальных осцилляций. Величина такой компенсации износа электрода-инструмента зависит от параметров шероховатости обработанной поверхности и составляет величины, приведенные в таблице 2.17. Из таблицы следует, чем меньше шероховатость (и соответственно выше качество) обработанной по-

верхности, тем бóльшую величину компенсации следует учитывать при задании амплитуды орбитального движения.

*Второстепенные параметры режимов обработки, а именно, длительность паузы между импульсами (**ТВ**) и среднее напряжение при обработке (**SV**) рекомендуют выбирать в соответствии с графиками, приведенными в технологической инструкции. Рекомендуется, чтобы *длительность паузы между двумя импульсными разрядами была меньше длительности самого импульса не менее чем на одну ступень*, т.е. $ТВ = ТА - 1$, где **ТА** – ступень длительности импульсного разряда (изменяется от 0 до 13). Причем *после стабилизации процесса обработки длительность паузы между импульсами может быть на три ступени меньше длительности самого импульсного разряда. На начальном этапе обработки длительность паузы между импульсами, наоборот, должна быть на две-три ступени больше длительности импульса тока.**

Таблица 2.17

Качество поверхности, класс СН ($Ra \leq$, мкм)	Величина износа ЭИ в плоскости ОДЭИ, в мкм
СН ≥ 26 (≤ 2)	3
СН ≥ 25 ($\leq 1,8$)	4
СН ≥ 24 ($\leq 1,6$)	4
СН ≥ 22 ($\leq 1,26$)	4
СН ≥ 20 (≤ 1)	5
СН ≥ 18 ($\leq 0,8$)	6

Таким образом, используя исходные данные об обрабатываемой заготовке и в соответствии с приведенными выше таблицами и графиками, определяют последовательность режимов обработки и находят значения параметров для черновых, чистовых и доводочных режимов. Полученную последовательность режимов обработки называют стратегией обработки полости, отверстия и т.п.

2.7. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ДОВОДКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На электроэрозионных станках одни и те же заготовки могут быть обработаны электродами-инструментами из различных материалов. Выше рассмотрен пример выбора режимов обработки сталей ЭИ из мелкодисперсного графита. *В качестве материала, используемого при изготовлении ЭИ для обработки заготовок из сталей, широко применяют медь. При обработке заготовок из сталей электродами-инструментами из меди производительность примерно такая же, как и при обработке ЭИ из мелкодисперсного графита (данные по производительности могут быть найдены по графикам, приведенным в Приложении). Причем одинаковая производительность достигается за счет подвода в МЭП импульсных разрядов с меньшей величиной тока при большей их длительности. Зависимости скорости съема и параметров шероховатости поверхностей от режима работы генератора импульсов имеют примерно такой же вид, как и приведенные выше на рис. 2.5. Износ электродов-инструментов на оптимальных режимах обработки изменяется в следующих пределах: для режимов 0 класса настройки генератора импульсов – 18 – 34%, 1 класса – 0,2 – 14%, 2 класса – 0,2 – 7,5%, 3 класса 0,2 – 5%. Шероховатость поверхностей, обработанных на различных режимах, составляет: при обработке на режимах нулевого класса настройки генератора импульсов – 4,5 – 6,3 мкм; при выполнении обработки на скоростных режимах удаления припуска (1 класса) – 2,2 – 14 мкм; при обработке на компромиссных и малоизносных режимах (2 и 3 класса) – 1,8 – 20 мкм (при разной величине износа ЭИ на каждом режиме обработки и в пределах определенного класса). При обработке поверхностей большинства деталей литейной оснастки шероховатость, полученная на обработанных поверхностях при использовании приведенных выше режимов, больше, чем заданная в рабочем чертеже некоторых деталей. Матрицы и пуансоны литейных форм, используемые при изготовлении корпусов и крышек телевизионных и радиоприемников, мониторов компьютеров, корпусов системных блоков, аудиопроигрывателей, принтеров, деталей холодильников и т.п., должны иметь поверхности, шероховатость которых не превышает 0,1 – 0,4 мкм (Ra). Для получения поверхностей с меньшими параметрами*

шероховатости при обработке заготовок из сталей электродами-инструментами из меди (или мелкодисперсного графита) используют специальные (доводочные) режимы работы генераторов импульсов. В межэлектродный промежуток импульсные разряды подают от цепи, в состав которой включены не управляемые тиристоры, создающие импульсные разряды, а определенное количество конденсаторов. Их количеством определяется энергия импульса, вводимая в МЭП. Доводочные режимы обработки также образуют соответствующие классы настройки генератора импульсов. Режимы обработки из третьего класса обеспечивают чистовую обработку сталей ЭИ из меди, а шероховатость поверхностей после обработки составляет 0,45 – 1,26 мкм. Износ электрода-инструмента для каждого режима обработки из указанного класса равен 20%. Для получения более чистых поверхностей могут применяться доводочные (из 6 класса настройки генератора импульсов) режимы обработки, используя которые можно получить шероховатость поверхностей на деталях до 0,16 – 0,8 мкм. Износ на каждом из режимов колеблется в пределах 30 – 40%. Еще меньшую шероховатость обработанных поверхностей получают при использовании режимов работы генератора импульсов, последовательность которых подобрана исключительно для выполнения тонкой доводки (полирования). При ее проведении (9 класс настройки генератора импульсов) за счет последовательного постепенного перехода к менее энергоемким режимам обработки получают поверхности, шероховатость которых не превышает 0,1 – 0,25 мкм (Ra). Износ электродов-инструментов из меди при выполнении доводки на каждом режиме составляет 35 – 45%. Обработка выполняется при среднем напряжении между ЭИ и заготовкой около 70В. Такой же класс настройки режимов обработки (доводочный 9 класса) используют при выполнении доводки сталей ЭИ из мелкодисперсного и крупнодисперсного графита (см. табл. 2.12 и рис. 2.6). Шероховатость может быть уменьшена с 0,63 до 0,1 мкм всего за три ступени приведенного класса настройки генератора импульсов. Однако износ электрода на каждой ступени режимов составляет 100% и более. Производительность доводочной обработки мала. Она определяется величиной тока и длительностью импульсных разрядов. При большей величине тока в импульсе производительность чистовых режимов обработки обычно составляет 1 – 2 мм³/мин, минимальная – не превышает 0,3 мм³/мин. При использовании

доводочных режимов производительность колеблется в пределах 0,15 – 0,9 мм³/мин, а при полировании деталей – 0,03 – 0,2 мм³/мин. Следует учитывать также, что на предыдущих операциях электроэрозионной обработки могут быть получены поверхности, которые полированием не обрабатываются. К таким поверхностям относятся узкие пазы и щели на детали и некоторые другие элементы. Для получения поверхностей с меньшей шероховатостью (0,04 – 0,08 мкм) производители электроэрозионного оборудования (например, Sodick и др.) предлагают использовать не только специально подобранные режимы работы генераторов импульсов, но и специальные рабочие жидкости, содержащие порошковые добавки.

Для получения поверхностей с минимальными параметрами шероховатости следует учитывать химический состав обрабатываемого материала. Так для сталей в зависимости от их состава минимально достижимая шероховатость поверхности детали составляет значения, приведенные в таблице 2.18.

Таблица 2.18

Состав стали, (хим. элем.), %	Минимальная шероховатость поверхности, мкм (Ra)
C 2; Cr 11,5	0,4
C 1,6; Cr 11,5; Mo 0,6; V 0,2; W 0,5	0,3
C 0,52; Cr 1; Mo 0,2; Ni 3	0,22
C 0,07; Cr 18; Ni 9	0,16
C 0,33; Si 0,6; Mn 0,8; Cr 1,6; Mo 0,4	0,12
C 0,36; Si 1,1 Cr 5; Mo 1,1; V 0,4	0,22
C 0,4; Cr 13	0,25
C 0,92; Si 1,2; Mn 0,7; Cr 1,2	0,25
C 0,5; Cr 1; Mo 0,2; Ni 30	0,22
C 0,95; Mn 1,1; Cr 0,5; V 0,1; W 0,5	0,1
C 0,9; Mn 2; Cr 0,3 V 0,1	0,1

Обработка полостей в заготовках из стали электродами-инструментами из меди на первом черновом режиме производится также, как и в приведенных выше случаях, т.е. копированием профиля ЭИ на поверхности заготовки. Последующие режимы обработки выполняют,

сообщая электроду-инструменту орбитальное движение. При выполнении копирования среднее напряжение составляет 20 – 25В (до 30В), а при переходе к обработке с ОДЭИ – 50 – 70В.

Величина компенсации износа электродов-инструментов из меди, которую следует учитывать при задании орбитального движения, больше по сравнению с ЭИ из графита и составляет 5 – 10 мкм при получении поверхностей, шероховатость которых меньше 0,63 мкм (Ra). Кроме этого, вследствие нагрева электрода-инструмента увеличивается его длина, что необходимо учесть при прошивочной обработке полостей. Величина удлинения ЭИ из меди приведена в таблице 2.19. Температурное удлинение ЭИ определяется длиной самого электрода и зависит от шероховатости, которую необходимо получить на обрабатываемой поверхности.

Таблица 2.19

Длина ЭИ при нормальной температуре, мм	Температурное удлинение ЭИ, мм	
	Шероховатость поверхности детали после обработки, Ra 12,6 - 20 (мкм)	Шероховатость поверхности детали после обработки, Ra 5 – 10 (мкм)
10	0,01	0,005
20	0,02	0,01
30	0,03	0,02
40	0,04	0,025
50	0,05	0,03
60	0,06	0,04
70	0,07	0,045
80	0,08	0,05
90	0,09	0,055
100	0,1	0,06
120	0,12	0,07
150	0,14	0,09
180	0,17	0,1

Заготовки из сталей могут быть обработаны электродами-инструментами из крупнодисперсного графита. В этом случае в МЭП могут подаваться импульсы длительностью 3,2 – 400 мкс и максимальных токах 100 – 128А (и более), которые выдает генератор импульсов. Производительность обработки достигает 850 мм³/мин при длительности импульсных разрядов около 100 мкс. При подаче в МЭП импульсных разрядов максимальной мощности с увеличением их длительности с 50 – 100 до 400 мкс производительность обработки снижается на 150 – 200 мм³/мин. Для режимов

обработки, проводимых при меньших значениях тока в импульсах, с увеличением длительности разрядов производительность обработки вначале увеличивается, а затем, достигнув максимума, начинает снижаться, как и в случае обработки сталей ЭИ из мелкодисперсного графита и меди. Использование определенных классов настройки режима работы генератора импульсов обеспечивает следующие результаты обработки. При высокой скорости удаления припуска (на скоростных режимах 1 класса) получают поверхности, шероховатость которых изменяется в пределах 2 – 16 мкм (Ra или 26 – 44 класс СТ). Износ ЭИ для каждого режима обработки составляет 0,5 – 34%, а суммарный износ при выполнении обработки до минимальной шероховатости обработанной поверхности может достигать 100 и более процентов. На компромиссных режимах (2 класса) производительность может несколько падать, однако суммарный износ по переходам и параметры шероховатости после обработки меньше, чем на скоростных режимах обработки. Шероховатость поверхностей может быть уменьшена до 1,6 мкм (Ra) при суммарном износе ЭИ при обработке около 100% и меньше. При обработке заготовок на малоизносных режимах (3 класса настройки генератора импульсов) и последовательном переходе к импульсам с меньшими величинами тока в разряде и их длительностью можно получить поверхности, шероховатость которых уменьшается с 20 до 1,6 мкм. Меньшую шероховатость на поверхностях детали получают при полировании, которое проводят на специальных режимах работы генератора импульсов (9 класса настройки генератора). При обработке в МЭП подается энергия в зависимости от количества одновременно включенных конденсаторов, причем форму импульсного разряда можно изменять. Минимальная шероховатость полированных поверхностей составляет 0,1 – 0,12 мкм (Ra) при износе электрода-инструмента на каждом режиме равном 100%.

Для обработки сталей в качестве электродов-инструментов могут использоваться конструкционные и углеродистые стали. Однако производительность обработки сталей электродами-инструментами из таких материалов существенно меньше, чем производительность обработки электродами-инструментами из графита или меди. Максимальная скорость удаления припуска составляет 80 – 100 мм³/мин, причем при тех же значениях тока в импульсных разрядах, что и при обработке

сталей электродами-инструментами из других материалов, а длительность импульсов составляет 3,2 – 50 мкс. При выборе режимов обработки можно использовать следующие классы настройки генератора импульсов (аналогичные по форме приведенным на рис. 2.5 и 2.6 по производительности, шероховатости поверхностей, соотношению между скоростью съема и износом). В пределах каждого класса составлена такая последовательность режимов, при обработке на которых шероховатость поверхностей постоянно уменьшается. Режимы обработки нулевого класса настройки генератора импульсов (наиболее производительного) обеспечивают получение на заготовках поверхностей, шероховатость которых составляет 5,6 – 2 мкм. Износ ЭИ на каждой ступени режимов составляет 60 – 100%. Использование режимов 1 класса обеспечивает уменьшение шероховатости поверхностей с 6,3 до 3,5 мкм и износ ЭИ на каждой ступени режимов обработки составляет 25%. Последовательность режимов обработки из 2 класса настройки генератора импульсов позволяет получить на заготовках поверхности, шероховатость которых изменяется в пределах 8 – 4,5 мкм при износе на каждой ступени режима равном 10%. Примерно такие же параметры шероховатости могут быть получены при использовании 4 класса настройки генератора импульсов. Однако скорость съема припуска в этом случае значительно ниже в сравнении с другими классами настройки генератора. Износ электродов-инструментов для каждой ступени режима 4 класса настройки не превышает 1%.

При обработке сталей используют импульсные разряды, длительность которых изменяется в пределах 6,4 – 50 мкс. В общем случае на износ электродов-инструментов оказывает влияние марка стали и степень ее легирования, а также вид термической обработки, проведенной перед электроэрозионной обработкой.

Приведенные режимы обработки и сочетание материала ЭИ и заготовки (сталь по стали) могут быть рекомендованы при изготовлении поверхностей литьевых форм и вытяжных матриц штампов. Плотность тока при обработке составляет 6 – 8 А/см². Одним и тем же ЭИ шероховатость поверхности может быть уменьшена на 0,7 – 1,7 мкм (Ra или 4 – 6 классов СТ). Промывка независимо от вида обработки (прошиванием или ОДЭИ), затруднена, т.к. зазор между электродами мал по сравнению с обработкой сталей ЭИ из других материалов. При обработке рабочих поверхностей

разделительных штампов *применение промывки необязательно. Удаление продуктов эрозии может осуществляться релаксацией электрода-инструмента*, причем релаксация выполняется на электроэрозионных станках в автоматическом режиме. Кроме ступени тока, длительности импульса, среднего и максимального напряжения при обработке, максимального значения скорости подачи при сервоуправлении, режима настройки генератора импульсов, которые относят к первичным параметрам, при настройке генератора импульсов и станочных приводов на определенный режим работы вводят так называемые вторичные параметры импульсных разрядов. К таким параметрам относят, например, длительность паузы между двумя импульсными разрядами. Ее значение может быть введено оператором либо задано в программе обработки. Величина паузы между импульсными разрядами изменяется дискретно в определенных пределах. Ее значение выбирают в зависимости от обрабатываемого материала и шероховатости поверхности, которую необходимо получить на заготовке. Однако оптимальными будут считаться такие значения паузы, которые эта величина принимает при автоматической оптимизации в зависимости от устойчивости электроэрозионной обработки. Длительность паузы между импульсами должна быть больше длительности импульса тока при разряде. Следует учитывать также, что *стабильность процесса определяется длительностью импульса тока и с увеличением длительности ухудшается. При максимальной длительности импульса тока наблюдается нестабильная обработка, а с уменьшением длительности разряда стабильность процесса возрастает, что связано с уменьшением количества эрозированных продуктов в межэлектродном зазоре и улучшением условий их удаления*. К вторичным параметрам относят также уровень защиты процесса обработки от возникающих коротких замыканий, а также другие параметры, перечисленные ранее в разделе 2.6.

Относительный объемный износ электрода-инструмента для всех значений тока при обработке сталей ЭИ из стали определяется длительностью импульса и составляет при использовании импульсов большой длительности (25 – 50 мкс) – 1 – 10%, средней длительности (6,4 – 12,8 мкс) – 25 – 50%, минимальной длительности (3,2 мкс) – до 100%.

Для обработки заготовок из медных сплавов могут применяться электроды-инструменты из меди. При одинаковой величине тока в разряде с увеличением длительности импульсов с 12,8 до 50 мкс производительность обработки увеличивается со 130 до 170 мм³/мин. При той же длительности, но меньших значениях тока в импульсных разрядах скорость съема снижается до 18 – 50 мм³/мин. Шероховатость поверхностей при выполнении обработки на энергоемких режимах составляет 5 – 7 мкм. При уменьшении длительности импульса и величины тока в нем шероховатость может быть уменьшена до 2,5 – 3,2 мкм. Величина износа электрода-инструмента зависит от скорости удаления припуска. При использовании скоростных режимов обработки (1 класса настройки генератора импульсов) износ ЭИ на каждом режиме достигает 6 – 11%. Параметры шероховатости, получаемые на скоростных режимах, изменяются в пределах 2,5 – 4,5 мкм. Последовательность режимов обработки 2 класса позволяет уменьшить шероховатость поверхностей обработанных деталей с 7 до 3,2 мкм. Износ ЭИ в этом случае для каждой ступени режима не превышает 1,5 – 5,5%. Имеется возможность уменьшить шероховатость обработанной поверхности с 6,3 до 5 мкм при износе электрода-инструмента 0,5 – 1%, причем производительность обработки в этом случае составляет 50 – 150 мм³/мин. Плотность тока при обработке на приведенных выше режимах составляет 6 – 8 А/см², среднее напряжение при обработке – около 50В, причем для устойчивой работы длительность паузы между импульсами должна быть больше длительности импульсного разряда. Для поддержания стабильности процесса необходимо обеспечить хорошую промывку межэлектродного промежутка созданием избыточного давления в нем либо боковой прокачкой рабочей жидкости. Сопла боковой прокачки рабочей жидкости располагают под углом 180° по отношению друг к другу.

В некоторых случаях детали различного назначения изготавливают из твердых сплавов, которые обладают высокой твердостью (HRA 89 – 92) и плохо поддаются обработке традиционными методами. Электроэрозионная обработка заготовок из твердых сплавов производится электродами-инструментами из медно-вольфрамовых композиций. Износ электродов-инструментов независимо от режима работы генератора импульсов изменяется в пределах 20 – 25%. Производительность обработки зависит от величины тока в импульсе и длительности разряда. При одной и той же величине тока в

импульсе с увеличением его длительности с 3,2 до 25 мкс производительность обработки возрастает с 60 до 95 мм³/мин. Дальнейшее увеличение длительности импульсов до 100 мкс приводит к некоторому падению скорости съема до 90 мм³/мин. Уменьшение значений тока в импульсных разрядах при одной и той же их длительности способствует получению поверхностей с малой шероховатостью, однако, производительность обработки существенно снижается и не превышает 5 – 15 мм³/мин. Параметры шероховатости обработанных поверхностей зависят от выбранного класса настройки генератора импульсов и изменяются в следующих пределах. Для последовательности режимов, обеспечивающих максимальную скорость удаления припуска, шероховатость обработанной поверхности может быть уменьшена с 5 до 0,25 мкм. Последние из выполняемых режимов являются доводочными и производятся при переключении генератора импульсов для работы на резистивной схеме резания с включением в разрядную цепь определенного количества конденсаторов. Зависимости скорости удаления припуска и износа для каждого класса настройки генератора импульсов имеют вид, аналогичный приведенному на рис. 2.6. Другие классы настройки генератора импульсов (2,3 и 4) включают более узкие последовательности режимов обработки и при том же износе ЭИ могут быть получены поверхности со следующими значениями шероховатости: 1,2 – 4,5 мкм. При выполнении обработки для поддержания устойчивости электрической эрозии необходимо обеспечить хорошую промывку межэлектродного промежутка с целью удаления шлама. При использовании боковой прокачки длительность паузы между импульсами не должна быть меньше длительности разряда, а среднее напряжение на электродах должно составлять 30 – 50В. Максимальный съем материала достигается при длительности импульсов 12,8 – 25 мкс. *Выполнение доводочных работ следует производить при больших величинах тока в импульсе и коротком времени его следования. Обрабатываемость твердых сплавов улучшается с увеличением содержания кобальта.*

При обработке заготовок из титана могут применяться электроды-инструменты из мелкодисперсного графита, а также меди и композиций на ее основе. Причем, при использовании ЭИ из графита разработаны такие последовательности режимов, использование которых позволяет производить обработку без особых проблем. С увеличением тока в импульсных разрядах и

их длительности скорость съема материала заготовки увеличивается. Например, при максимальной величине тока 64А и при увеличении длительности с 6,4 до 100 мкс скорость съема возрастает со 150 до 600 мм³/мин. При меньших значениях тока 8 – 12А и несколько меньшей длительности (6,4 – 50 мкс) производительность изменяется от 20 до 40 мм³/мин. Износ электродов-инструментов определяется классом настройки генератора импульсов (аналогично показанному на рис. 2.6) и изменяется в пределах: для нулевого класса – 22 – 35%, для 1 класса 16 – 20%, 2 класса – 16 – 17%, 3 и 4 класса – 10 – 12%. Шероховатость обработанных поверхностей можно уменьшить с 20 до 3,2 мкм последовательным переходом к менее энергоемким режимам обработки. *Выполнение работ осуществляется на обратной полярности, при которой электрод-инструмент следует подключить к положительному зажиму генератора импульсов, а заготовку – к отрицательному. При изменении полярности (с обратной на прямую) съем материала практически прекращается.* При использовании в качестве электродного материала меди на поверхности ЭИ может образовываться пленка, содержащая материал обрабатываемой заготовки, которая снижает эффект эрозионного разрушения электрода-инструмента. Имеются случаи повышения локального износа на электроде-инструменте, что связано с поверхностными дефектами (вмятинами, царапинами и т.д.) и недостаточной скоростью эвакуации продуктов эрозии из МЭП.

Таким образом, скоростные, малоизносные и промежуточные режимы обеспечивают обработку сталей ЭИ из меди и графита примерно с одинаковой скоростью съема. Применение ЭИ и крупнодисперсного графита позволяет увеличить производительность обработки на черновых режимах в 1,3 – 1,5 раза. Однако приведенные электродные материалы дороги, поэтому для обработки сталей могут использоваться ЭИ из недорогих инструментальных сталей. Режимы обработки обеспечивают производительность в 6 – 10 раз меньшую по сравнению с режимами, при выполнении которых применяют ЭИ из графита и меди. Твердые сплавы обрабатывают электродами-инструментами из медно-вольфрамовых композиций и производительность обработки изменяется от 5 – 15 до 200 мм³/мин. Заготовки из титана обрабатывают ЭИ из графита, меди и ее композиций на режимах, обеспечивающих примерно

одинаковую производительность с режимами обработки сталей ЭИ и тех же электродных материалов.

Использование изложенных выше рекомендаций позволяет производить электроэрозионную обработку различных материалов на оптимальных режимах, при использовании которых электрическая эрозия протекает стабильно, достигается максимальная скорость съема при условии последовательного уменьшения шероховатости обработанных поверхностей. Зависимости и графики, приведенные для различных сочетаний материалов электрода-инструмента и заготовки, (см. Приложение) позволяют определить режимы обработки заготовок из соответствующих материалов. Эти данные справедливы для оборудования различных производителей (Charmilles Technologies, AGIE, Sodick, Mitsubishi и т.д.). Незначительные различия имеются по величине тока в импульсе, длительности импульсных разрядов и применяемым рабочим жидкостям. Остальные параметры и факторы, определяющие условия обработки, соответствуют приведенным выше.

2.8. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРОШИВОЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Большая часть обрабатывающего оборудования, в частности электроэрозионного, выпускается в настоящее время с компьютерным оснащением. *Микропроцессоры программного управления* оказывают помощь в решении многих практических задач, в том числе, *управляют приводами станков и генераторами импульсов, и благодаря быстройдействию систем ЧПУ обеспечивается высокопроизводительная обработка полостей, отверстий, вырезание контуров.* Кроме этого, с помощью ЧПУ осуществляется *программирование обработки непосредственно на станке, редактирование программ, их холостой прогон (симуляция), ввод управляющих программ с внешних носителей (кассет внешней памяти, дисков и т.п.), выполняются измерительные циклы* и т.д. В некоторых случаях управление станками осуществляется через сеть, в состав которой входит несколько обрабатывающих станков, соединенных с одним или несколькими компьютерами.

Компьютер предназначен для разработки управляющих программ и их передачи на станки. Использование центрального компьютера позволяет уменьшить затраты времени на ввод программ с панели стойки ЧПУ станка и снизить время его простоя. В программное обеспечение компьютеров входят базы данных с настройками режимов работы генераторов импульсов, параметрами, определяющими стабильность эрозии (скорость подачи ЭИ, прокачка рабочей жидкости, давление, релаксация ЭИ и др.), а также программы, позволяющие программисту по запросу системы вводить необходимые данные, получать последовательность режимов обработки заданной поверхности и на их основе составлять программы обработки заготовок. Исходные данные и режимы обработки представляются в виде таблицы.

Рассмотрим выбор режимов обработки на следующем примере (применительно к станкам Charmilles Technologies, AGIE и др.). Пусть в заготовке из стали необходимо обработать прямоугольную полость глубиной 20 мм, площадь которой составляет 50 см^2 , а шероховатость после обработки не должна превышать 2 мкм (Ra). В качестве материала ЭИ выбрана медь. Для подбора режимов обработки требуется задать значение начальной шероховатости поверхности либо система ЧПУ сама выдает рекомендуемое значение в начале рассчитанной последовательности режимов. *При выборе режимов обработки учитывается зависимость*

окончательной шероховатости от начальной, полученной перед электроэрозионной обработкой, и от площади обрабатываемой поверхности. Для рассматриваемого примера вводилась шероховатость перед обработкой, соответствующая 20 мкм Ra (46 класс CH). С увеличением площади обработки количество переходов, необходимое для достижения требуемых параметров шероховатости, будет увеличиваться. Для случая обработки поверхностей с весьма малой шероховатостью (0,08 мкм и менее) количество ступеней режимов также существенно возрастает, причем требуются специальные рабочие жидкости и режимы работы генераторов импульсов. После ввода необходимых данных система программирования рассчитывает и выдает объем удаленного материала с заготовки (*Volume*), способ обработки полости (*DOWN*), значения межэлектродных зазоров для первого чернового (*Elec1: Usreel1*) и чистового (*Elec2: Usreel2*) перехода, условия подачи рабочей жидкости в МЭП, настройки генератора импульсов для черновой (*Roughing*) и чистовой (*Finishing*) обработки полости двумя электродами-инструментами (рис. 2.7). Обработка полости начинается объемным копированием формы электрода-инструмента на заготовке.

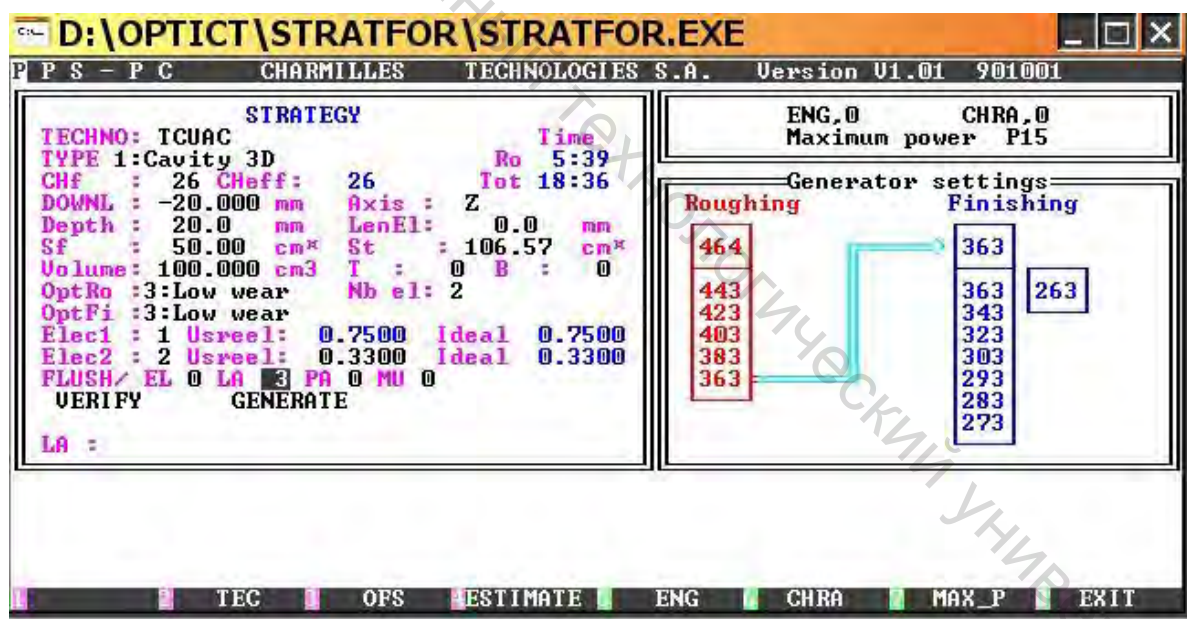


Рис. 2.7. Пример технологической таблицы, используемой для автоматизированного выбора режимов обработки

В приведенной таблице указывается тип обработки – получение полости (*Cavity 3D*), – и способ создания полости – прямое копирование опусканием ЭИ вниз (*DOWN*) на первом черновом и первом чистовом переходе обработки (после смены ЭИ), приводится значение шероховатости обработки после обработки (*CHf*). Величина перемещения вдоль направления *Z* (глубина полости) составляет 20 мм (*DOWNL*). Знак «-» указывает направление движения электрода-

инструмента – не совпадает с приведенным выше координатным направлением. Причем указанное значение учитывает собственно перемещение ЭИ вглубь заготовки и межэлектродный зазор, при котором общее заглупление ЭИ составит необходимую величину. Основной осью, вдоль которой выполняется обработка, является координатная ось **Z**. Глубина полости после обработки равна 20 мм. Площадь обработки указана в строке **Sf** и рядом приведено значение полной площади обработки – **St**. Параметры **T** и **B** равные нулю показывают, что вторичные параметры (все и длительность паузы между импульсами – **B**, в частности) оптимизируются в процессе обработки системой ЧПУ так, чтобы производительность была максимальной.

Оптимальным классом для настройки генератора импульсов является 3, при использовании ступеней режимов из которого износ ЭИ будет минимальным, а производительность – оптимальной. Для изготовления полости предлагается использовать 2 электрода-инструмента. После выполнения обработки опусканием ЭИ вглубь все другие переходы при обработке на последующих режимах выполняются с использованием ОДЭИ. Максимальная амплитуда орбитального движения на последующих переходах составляет соответственно для черновой и чистовой обработки 0,75 и 0,33 мм. Далее приведены данные о промывке межэлектродного промежутка (**FLUSH**): промывка через электрод (**EL**) – не используется (**0**), следует применить боковую непрерывную промывку МЭП высокого давления (**LA, 3**). В качестве единиц измерения приняты мм (метрическая система), шероховатость поверхности может быть задана в **CH** или **Ra**. Для выполнения обработки на первом черновом режиме может быть использована первая ступень режимов, для которой величина тока в импульсе будет максимальной (**P15**). Система ЧПУ предлагает последовательность режимов работы генератора импульсов для выполнения черновой и чистовой обработки. Режимы, указанные в прямоугольниках, показывают начальные настройки режимов работы генератора импульсов. Использование начальных настроек позволяет провести обработку полости в заготовке так, чтобы ее параметры по точности и качеству соответствовали заданным. Полученные последовательности черновых и чистовых режимов обработки используют затем для создания управляющей программы обработки полости.

2.9. ЭЛЕКТРОДЫ-ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПРОШИВОЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Профилированные электроды-инструменты применяются при обработке отверстий и полостей как с прямолинейным поступательным, так и с орбитальным движением. Рабочую часть электродов для прошивания сквозных отверстий выполняют в виде стержня, поверхности которого, участвующие в формообразовании, эквидистантны соответствующим поверхностям обрабатываемого отверстия. Размеры электродов-инструментов рассчитывают следующим образом. Пусть D – диаметр сквозного отверстия, которое необходимо обработать в заготовке определенной толщины. *Размеры электрода-инструмента для черновой обработки будут уменьшены (занижены) относительно размеров отверстия в детали на величину припуска на чистовую обработку (если ее выполнение необходимо) и межэлектродного зазора для первой ступени черновой обработки.* Как указывалось выше, выполнение первого перехода черновой обработки проводится опусканием ЭИ вглубь заготовки при прямолинейном его перемещении. Остальные переходы черновой обработки осуществляются за счет орбитального движения ЭИ относительно оси прошеного в заготовке отверстия, причем амплитуда ОДЭИ рассчитывается и поддерживается автоматически в заданных пределах процессором ЧПУ как разность между зазорами для первого чернового и выполняемого переходов. *Величины межэлектродных зазоров определяются из соответствующих технологических таблиц (см. табл. 2.13 – 2.16) или электронных баз данных, причем в ряде случаев величины, приведенные в указанных таблицах, даны с учетом припуска на чистовую и доводочную обработку, а также возможного появления на обработанной поверхности дефектного слоя.*

Первый переход при чистовой обработке отверстия также выполняют при поступательном перемещении ЭИ вглубь заготовки (DOWN), а остальные переходы производят за счет орбитального движения электрода-инструмента с определенной амплитудой относительно полученного отверстия. Величины межэлектродных зазоров для проведения чистовой обработки также определяют из соответствующих технологических таблиц. При этом рекомендуется, чтобы величину МЭП при расчете размеров чернового ЭИ выбирали из таблиц, в которых приведены максимальные его значения с учетом среднего или минимального безопасного расстояния. Для расчета размеров чистового ЭИ значения зазора следует выбирать из технологических таблиц, в которых приведены средние значения МЭП для

ступеней режимов чистовой обработки. Таким образом, размеры ЭИ для черновой и чистовой обработки будут равны

$$D_1 = D - \delta_i, \quad (2.9)$$

$$D_2 = D - \delta'_i, \quad (2.10)$$

где D_1 и D_2 – диаметр электрода-инструмента соответственно для черновой и чистовой обработки отверстия;

δ_i, δ'_i – межэлектродный зазор для первого чернового и первого чистового режимов i -го класса настройки генератора импульсов.

Как указывалось выше, каждый класс настройки генератора импульсов включает определенную последовательность режимов, при обработке заготовки на которых ее форму, размеры и параметры шероховатости постепенно приближают к заданным в рабочем чертеже. Причем обработка на режимах одного класса настройки обеспечивает скоростное удаление припуска при значительном износе ЭИ, а другой класс настройки генератора включает малоизносные режимы, использование которых позволяет проводить обработку практически при нулевом износе ЭИ, но производительность таких режимов мала. Могут использоваться и компромиссные режимы, обработка заготовок на которых дает меньшую производительность по сравнению с высокоскоростными режимами, однако износ ЭИ также меньше. Для каждого класса режимов настройки генератора импульсов величина МЭП различна и в общем случае зависит от величины рабочего тока, длительности импульсов, материалов ЭИ и заготовки, площади обрабатываемой поверхности, свойств рабочей жидкости.

Длина рабочей части электрода-инструмента для прошивания отверстия при выполнении черновой и чистовой обработки (l_1 и l_2) принимается в зависимости от глубины отверстия и увеличивается в соответствии с величиной относительного износа, т.е.

$$l_1 = \left(1 + \frac{v_1}{100}\right) l_0, \quad (2.11)$$

$$l_2 = \left(1 + \frac{v_2}{100}\right) l_0, \quad (2.12)$$

где l_0 – глубина отверстия;

v_1, v_2 – суммарная величина относительного износа ЭИ соответственно для всех переходов черновой и чистовой обработки, %.

При определении общей длины электрода-инструмента учитывается длина той части электрода, которая используется для его закрепления в патроне шпинделя станка, и принимается некоторый запас по длине 5 – 15 мм (зависит от размеров обрабатываемого отверстия).

Аналогичным образом рассчитываются размеры электрода-инструмента для обработки ступенчатого отверстия.

При обработке полостей с вертикальными, наклонными и криволинейными участками профиль рабочей части ЭИ представляет собой зеркальное отображение поверхностей детали. Электроды для прошивания по мере углубления их в процессе обработки в заготовку изменяют свою форму вследствие разного износа различных участков. Сильнодействующим фактором, оказывающим влияние на изменение формы ЭИ при обработке, является глубина полости. Это обстоятельство объясняется тем, что с увеличением глубины обработки условия осуществления процесса изменяются, т.к. изменяется путь удаления шлама. Последний фактор является существенным, определяющим устойчивость обработки. Для стабилизации процесса с увеличением глубины обработки используют прокачку рабочей жидкости через отверстия или щели в ЭИ либо боковую прокачку, применяют также вибрации электрода-инструмента в направлении подачи, а при неэффективности прокачки используют релаксацию электродов, которая выполняется в большинстве станков автоматически. В автоматическом режиме контролируются условия обработки и при их ухудшении, приводящем к частым коротким замыканиям, системы управления современных станков выдают сообщения о необходимости корректирования параметров режимов обработки (величины тока, длительности импульса и паузы между разрядами, промывки межэлектродного зазора и т.д.).

Изменение формы ЭИ во время обработки может быть учтено. Для этого следует скорректировать форму ЭИ на наклонных и криволинейных участках в связи с износом, а величину коррекции определить, например, с помощью интерполяционных моделей. По моделям находят величину бокового межэлектродного зазора для соответствующего участка ЭИ в зависимости от сочетания материала ЭИ и заготовки, плотности тока, средней величины тока при обработке, напряжения холостого хода, частоты, скважности импульсных разрядов, глубины и площади обработки. Для корректирования формы предлагаются также экспериментальные зависимости изменения профиля ЭИ от глубины обработки. Например, при обработке элементов полости, показанных на рис. 2.8, могут

использоваться данные, связывающие величину угла электрода-инструмента и расстояние между торцом ЭИ и дном углубления в заготовке при изменении бокового межэлектродного промежутка на 0,01 мм (по данным СТ). Экспериментальные данные приведены в таблице 2.20.

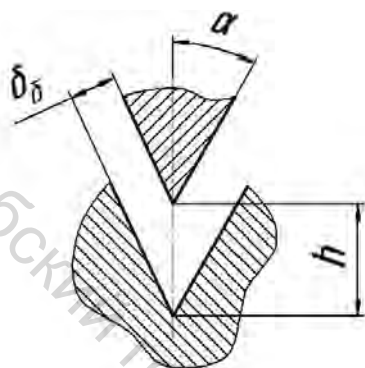


Рис. 2.8. Схема прошивки остроугольных элементов полости
мента в процессе обработки.

Существуют эмпирические зависимости, с помощью которых устанавливается связь между необходимой высотой образующего элемента электрода-инструмента и высотой изготавливаемой полости для ее формообразования без существенных искажений профиля. Имеются зависимости для определения радиуса закругления в местах перехода элементов профиля. Такие переходы образуются вследствие износа электрода-инструмента в процессе обработки.

Таблица 2.20

Величина половины угла профиля ЭИ, (град. - мин.)	Расстояние между торцом ЭИ и углублением в заготовке в мм при изменении бокового МЭЗ на 0,01 мм	Величина половины угла профиля ЭИ, град. - мин.	Расстояние между торцом ЭИ и углублением в заготовке в мм при изменении бокового МЭЗ на 0,01 мм
0°30'	1,145	9°30'	0,064
1°	0,573	10°	0,06
1°30'	0,382	11°	0,057
2°	0,286	12°	0,048
2°30'	0,229	13°	0,044
3°	0,191	14°	0,041
3°30'	0,164	15°	0,038
4°	0,143	16°	0,036
4°30'	0,127	17°	0,034
5°30'	0,115	18°	0,032
6°	0,104	19°	0,031
6°30'	0,095	20°	0,029
7°	0,085	25°	0,023
7°30'	0,082	30°	0,02
8°	0,076	35°	0,017
8°30'	0,071	40°	0,015
9°	0,067	45°	0,014

Прошивание полостей при черновой обработке может осуществляться при прямолинейном поступательном движении электрода-инструмента вглубь заготовки, а чистовая и доводочная обработка – при орбитальном движении ЭИ

относительно полученной полости. В некоторых случаях черновую и чистовую обработку фасонных полостей и углублений производят с поступательными круговыми движениями. Как в первом (при черновой обработке), так и во втором случаях размеры формообразующих поверхностей электрода-инструмента с учетом их износа в процессе обработки определяют следующим образом. В соответствии с чертежом заданной поверхности учитывается расстояние, равное величине межэлектродного зазора на чистовых режимах обработки. Затем вводится коррекция на величину амплитуды орбитальных колебаний ЭИ в горизонтальной плоскости в процессе обработки. Для этого строятся горизонтальные сечения поверхности (не менее трех – четырех), ограничивающей конечные положения профилирующей части электрода-инструмента при обработке. Затем на расстоянии, равном наибольшей высоте микронеровностей после черновой обработки, сложенной с межэлектродным зазором на черновых режимах, проводятся эквидистанты контурных линий горизонтальных сечений. Полученные эквидистанты являются линиями горизонтальных сечений электрода-инструмента.

При выполнении чистовой и доводочной обработки за счет орбитального движения электрода-инструмента частоту такого движения следует задавать с учетом площади обрабатываемой поверхности. В настоящее время существуют возможности программирования орбитальных движений по форме обрабатываемой полости.

В ряде случаев на рабочей части электродов-инструментов сложной формы предусматривают отверстия для подачи в МЭП рабочей жидкости. Если имеются выступающие участки поверхности ЭИ, отверстия располагают на этих участках. Расстояние между отверстиями для прокачки принимают равным 20 – 40 мм. Диаметр отверстий для прокачки со стороны рабочей поверхности ЭИ составляет 1,2 – 2,5 мм. Однако отверстия для прокачки оставляют после обработки на поверхностях заготовки выступы, удалить которые в ряде случаев затруднительно. Поэтому по возможности следует изготавливать отверстия щелевидной формы, которые не оставляют на обработанных поверхностях трудноудаляемых выступов.

Количество электродов-инструментов для прошивочной обработки определяется в зависимости от технических требований чертежа, эрозионной стойкости материала ЭИ, серийности обрабатываемых деталей. Анализ практики электроэрозионной обработки показывает, что производители оборудования рекомендуют изготавливать и использовать для выполнения

прошивочных работ по изготовлению детали не более двух электродов-инструментов. Для такого их количества разработаны технологические инструкции с рекомендуемыми режимами обработки для достижения требований, предъявляемых к большинству изготавливаемых деталей. При выполнении доводочных работ применяют те же электроды-инструменты, которые использовались при чистовой обработке, однако в ряде случаев необходимо дополнительно применять специальные рабочие жидкости и режимы работы генераторов импульсов.

Витбоский государственный технологический университет

2.10. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ВЫРЕЗНЫХ СТАНКАХ

Вырезание проволочным электродом-инструментом широко применяется для изготовления фасонных литевых инструментов (фильер), матриц и пуансонов вырубных и пробивных штампов, при обработке деталей сложной формы малых размеров, обработке контуров с большой длиной резания, при одновременной обработке сопрягаемых деталей, при выполнении конусного резания, разрезании заготовок из твердых сплавов и т.д. Операции выполняют на станках с ЧПУ по программе. Системы программного управления позволяют сформировать программу обработки и обеспечить ее выполнение. При обработке производится управление генератором импульсов и приводами станка так, чтобы изменение условий эрозии не сказывалось на производительности вырезания и качестве получаемых поверхностей.

При скоростях обработки ($300 - 500 \text{ мм}^2/\text{мин}$), которые обеспечивают современные вырезные станки, *черновую обработку целесообразно выполнять на вырезном оборудовании. При чистовой и доводочной обработке чаще всего оказывается, что производительность вырезания уступает прошиванию профилированным электродом-инструментом, особенно в случае обработки многопуансонных штампов, обработка матриц и пуансонов которых может проводиться одновременно.* Вырезание названных деталей производится последовательным переходом от обработки одного контура к обработке следующего и так до тех пор, пока обработка всех контуров не будет завершена.

Для вырезания контуров следует предусмотреть изготовление в заготовках отверстия для заправки проволочного электрода-инструмента через весь тракт проводки. При обработке пуансонов необходимость обработки отверстий отпадает. Однако в каждом из приведенных случаев *следует предусмотреть направление подхода и отхода инструмента к обрабатываемому контуру так, чтобы на обработанной поверхности не осталось следов подхода, появляющихся при изменении направления движения в основном из-за наличия люфтов в механизмах приводов подач ЭИ и заготовки.*

Изготовители электроэрозионных станков предлагают подробные технологические рекомендации использования станков для выполнения определенных работ. *В зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемой детали, может производиться однопроходное черновое*

вырезание, черновая и однократная чистовая обработка, черновая, чистовая и доводочная обработка и т.д.

Количество переходов выбирается так, чтобы по окончании обработки на соответствующих режимах обеспечивалась необходимая размерная точность и соответствующие параметры шероховатости обработанной поверхности. Переходы электроэрозионного вырезания в соответствии с параметрами режимов обработки, на которых они выполняются, изготовителями электроэрозионных станков разделены следующим образом. При относительно невысоком качестве поверхностей после обработки достаточно выполнить однопроходное черновое вырезание заданного контура, после которого в зависимости от сочетания материала ЭИ и заготовки и выбранного режима обработки шероховатость обработанной поверхности может составить 3,5 мкм (Ra) – при обработке сталей электродом-инструментом из быстрорежущей стали, 1,8 мкм (Ra) – при обработке сталей молибденовым проволочным инструментом и т.д. При более высоких требованиях к шероховатости поверхности рекомендуется переходить к выполнению вырезания на чистовых режимах, после которых параметры шероховатости будут уменьшены. Дальнейшее уменьшение шероховатости поверхности достигается за счет изменения режимов обработки. Параметры режимов, которые необходимо выбрать для выполнения обработки, зависят от вида выполняемых работ. Кроме параметров, приведенных выше для прошивочной обработки, необходимо учитывать: натяжение проволочного ЭИ, скорость перемотки проволоки через зону резания, вид промывки МЭП, выбранное давление и некоторые другие. Режимы обработки могут быть представлены в виде таблиц (см. табл. 2.21) либо в виде электронных баз данных.

При черновом вырезании следует оптимизировать частоту следования импульсных разрядов и скорость вырезания, которые определяют устойчивость электрической эрозии и шероховатость поверхности при максимальной скорости обработки. Причем полученная на первом переходе шероховатость оказывает существенное влияние на качество поверхности после выполнения всех переходов и на их количество.

Таблица 2.21

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ																										
Высота обработки, мм	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	175	200	Набор параметров	
Шероховатость поверхности после обработки, CH/Ra (класс/ мкм) — 31/3,5																										
F, кГц	7	13	18	24	30	36	42	47	52	53	54	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	Черновая обработка (E1,E2, E3) M C V P A F 1 6 - 3 11 4 50 WB - 1000 г Давление
S	2,6	1	0,84	0,68	0,58	0,5	0,45	0,4	0,36	0,33	0,3	0,28	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09	0,09	0,09	0,09	
WS, мм/мин	6	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10	
E1, мкм	160	162	165	167	170	172	175	177	180	182	183	184	186	188	192	195	199	203	206	209	212	216	219	221	221	
E2, мкм	184	186	189	191	195	197	200	202	205	208	211	214	217	223	228	232	236	240	244	247	250	253	260	265	265	
E3, мкм	193	195	198	201	204	207	210	213	216	219	222	225	228	235	241	247	251	255	259	263	266	268	280	285	285	
V, мм/мин	6,5	5	4,2	3,6	3,1	2,9	2,65	2,4	2,2	2	1,8	1,6	1,42	1,25	1,1	0,95	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,42	0,3	промывки: не менее 1- 1,5 бар, не более 2-2,5 бар	
1/V	0,15	0,2	0,24	0,27	0,32	0,34	0,37	0,41	0,45	0,5	0,55	0,62	0,7	0,8	0,9	1,05	1,25	1,33	1,43	1,53	1,66	1,81	2,4	3,3		
Шероховатость поверхности после обработки, CH/Ra (класс/ мкм) - 27/ 2,2																										
Aj, в % от напряжения холостого хода	35	35	35	34	33	32	32	32	31	31	30	30	29	28	27	26	26	25	25	24	24	23	21	20	1-я чистовая обработка (E4, E5) M C V P A F 7 0-3 9 2125 WB-1200 г Обработку проводить без боковой промывки	
S	5,5	5,5	4	2,3	2,1	2	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,8	0,75	0,75	0,7	0,7	0,7	0,7		
WS, мм/мин	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8		
E4, мкм	134	134	134	134	134	134	135	135	135	135	136	136	137	138	138	139	139	140	141	141	141	142	144	145		
E5, мкм	142	142	143	143	144	144	145	145	146	146	147	147	149	151	152	153	154	155	157	158	159	162	165	165		
V, мм/мин	10,5	8	7	6	5,1	4,8	4,5	4,2	3,9	3,7	3,55	3,35	3,2	2,75	2,4	1,95	1,5	1,42	1,34	1,26	1,18	1,1	0,9	0,7		
1/V	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,25	0,27	0,28	0,29	0,31	0,36	0,42	0,51	0,66	0,7	0,74	0,8	0,84	0,9	1,1	1,42		
Шероховатость поверхности после обработки, CH/Ra (класс/ мкм) - 24/1,6																										
Aj, в % от напряжения холостого хода	33	33	33	32	32	31	30	29	28	27	26	25	24	22	20	19	18	17	17	16	16	15	15	15		2-я чистовая обработка (E6) M C V P A F 7 0-3 7 1 200 WB —1200 г Обработку проводить без боковой промывки
S	33	33	33	32	32	31	30	29	28	27	26	25	24	22	20	19	18	17	17	16	16	15	15	15		
WS, мм/мин	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8		
E6, мкм	134	134	134	134	134	134	135	135	135	135	136	136	137	138	138	139	139	140	141	141	142	144	145	145		
V, мм/мин	20	20	20	17	15,3	13	11,7	11	10	9,7	9,1	8,4	7,8	7,1	6,5	5,8	5,2	5,2	4,8	4,8	4,5	4,5	4,5	4,5		
1/V	0,05	0,05	0,05	0,055	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,135	0,147	0,161	0,19	0,19	0,2	0,2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22		

Примечание: F - частота следования импульсов; S - положение задатчика скорости вырезания (изменяется дискретно в определенных пределах, например, от 0,001 до 40); WS - скорость перемотки проволоки при резании (изменяется от 0,2 до 15 м/мин - в зависимости от типа станка); отсеч E1, E2, ..., E6 - величина смещения траектории движения электрода-инструмента относительно вырезаемого контура в заготовке; V - скорость вырезания; 1/V - время, затраченное при перемещении ЭИ на 1 мм в направлении резания; Aj - рекомендуемое значение среднего напряжения для управления серводвигателем (задается в % от напряжения холостого хода, величина которого определяется типом генератора импульсов и составляет 80; 120; 160; 200В); WB - натяжение проволочного ЭИ; M, C, V, P, A — параметры режима обработки (см. прошивочную обработку).

Следует учитывать, что при вырезании траектория, по которой перемещается электрод-инструмент в процессе обработки, смещается относительно вырезаемого контура на величину, которую называют офсетом.

Офсет учитывает величину межэлектродного зазора и половину диаметра проволочного электрода-инструмента. Таким образом, траектория, по которой будет перемещаться ЭИ при обработке, эквидистантно смещается относительно вырезаемого контура на величину офсета. Величина офсета определяется режимом обработки и параметрами шероховатости поверхности. При необходимости получения поверхностей с малой шероховатостью величина офсета выбирается с учетом припуска на последующую обработку. Чем меньше

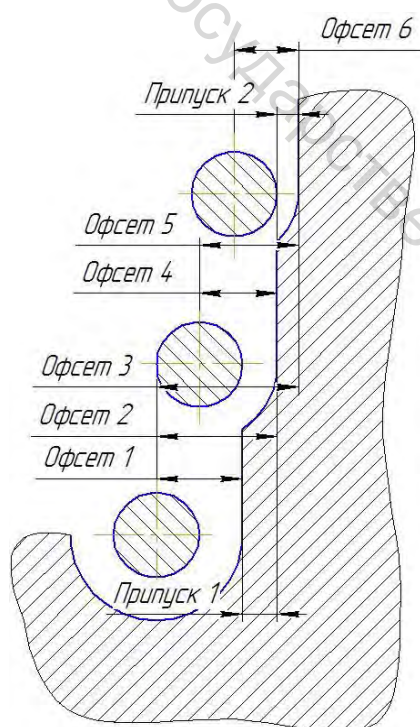


Рис. 2.9. Схема расчета припусков и офсетов

параметры шероховатости поверхности на готовой детали, тем большее количество переходов следует выполнить при обработке.

На рис. 2.9 приведена схема обработки, при использовании которой вырезаемый контур может быть получен различными способами. Первый черновой переход в зависимости от выбранных режимов, а точнее, сочетаний некоторых параметров режимов, можно проводить с различной величиной офсета. Причем при выполнении черновой обработки практически все изготовители электроэрозионных станков рекомендуют использовать неизменными основные параметры режимов по форме импульсов, величине тока и длительности разряда, среднему напряжению,

натяжению проволочного электрода-инструмента, способу промывки межэлектродного промежутка.

При черновой обработке оптимизируются 2 параметра – частота следования разрядов F (в соответствии с таблицей 2.21) и скорость вырезания S (выбранная ступень, задающая скорость обработки). Рекомендуемое значение среднего напряжения при черновой обработке задается в процентах от напряжения холостого хода и выбирается так, чтобы обеспечивалась стабильная скорость подачи заготовки относительно электрода-инструмента. При увеличении среднего напряжения скорость подачи уменьшается, что приводит к увеличению

межэлектродного промежутка. При уменьшении среднего напряжения нарушается стабильность обработки. Частота следования импульсных разрядов выбирается в зависимости от высоты обработки. Причем, чем больше частота следования импульсных разрядов, тем выше скорость движения подачи (скорость вырезания). Однако при достижении оптимальной величины частоты следования разрядов (называемой технологической частотой) дальнейшее ее повышение незначительно увеличивает скорость обработки. Дальнейшее увеличение частоты следования импульсов приводит к разрыву ЭИ.

Определенной частоте следования импульсов соответствует определенная ступень скорости вырезания (S). Этот параметр определяет скорость вырезания и пределы ее изменения. При черновой обработке существует возможность изменять величину S в пределах 20% с тем, чтобы избежать чрезмерных ускорений приводов перемещений ЭИ или заготовки при изменении направления движения. Под изменением направления движения следует понимать изменение направления перемещения ЭИ и заготовки для получения заданного контура (вырезание радиусов и др.) и замедление движения подачи вследствие ухудшения условий обработки. При определенных условиях обработки, когда ступень S выбрана так, что фактическая скорость вырезания больше, чем должна быть в соответствии с установкой ступени S , процесс вырезания протекает нестабильно, и на обработанной поверхности появляются продольные полосы, перпендикулярные направлению вырезания. Системы ЧПУ станков при возникновении таких ситуаций обычно выдают сообщения оператору о необходимости корректировки режимов обработки или некоторых параметров режимов.

В соответствии с рис. 2.9 при невысоких требованиях к шероховатости поверхности окончательный размер на заготовке при вырезании может быть получен на третьем черновом режиме ($E3$), при использовании которого величина офсета максимальная. При выполнении обработки на приведенном режиме в пределах выбранной ступени S рабочая скорость перемещения ЭИ или заготовки будет уменьшена по сравнению с заданной по технологии обработки на 20%, что и даст возможность провести обработку с большим офсетом. Если после вырезания необходимо получить поверхность, параметры шероховатости которой выше, чем в первом случае, в пределах выбранной ступени скорости вырезания рабочую скорость следует увеличить относительно выбранной по технологии на 10%, т.е. проводить обработку с офсетом $E2$ (на режиме $E2$).

При более высоких требованиях к шероховатости поверхности после обработки следует проводить вырезание на режиме **E1**, для которого офсет будет иметь минимальное значение. Каждую последующую обработку (чистовую 1, чистовую 2 и т.д.) проводят на соответствующих режимах при определенных значениях офсетов. Зная их величины, можно рассчитать припуски на выполнение каждого перехода (см. рис. 2.9). При выполнении чистовых переходов оптимизируются другие параметры.

При выполнении чистовой обработки частота следования импульсных разрядов остается неизменной, подбирают сочетания среднего напряжения (A_j) и скорости вырезания (S). Величиной среднего напряжения определяется стабильность подачи электрода-инструмента в направлении вырезания. Если среднее напряжение повышается, возрастает съём материала, скорость вырезания снижается, в заготовке появляются канавки, впадины и другие дефекты вдоль вырезаемого контура. При уменьшении среднего напряжения съём материала снижается, скорость вырезания возрастает, однако это может привести к появлению на заготовке погрешностей формы по толщине выполняемого реза. Причем величина погрешности зависит от изменения величины среднего напряжения. При изменении среднего напряжения на 10% погрешности формы на заготовке могут составить 2 – 6 мкм в зависимости от высоты вырезания. При необходимости получения более чистых поверхностей последующую обработку проводят в режиме ограничения скорости вырезания, а величину среднего напряжения оставляют неизменной. Максимальной величиной среднего напряжения определяется величина рабочего тока, длительность и частота следования разрядов для соответствующих материалов ЭИ и заготовки.

Важным параметром, обеспечивающим стабильность обработки, является проводимость воды. Для контроля в станках предусматривают датчики, связанные с индикаторами, которые загораются при отклонении проводимости рабочей жидкости от заданной. Индикаторы свидетельствуют о необходимости увеличения удельного сопротивления рабочей жидкости и добавке ионообменной смолы.

При выполнении вырезной обработки следует учитывать особенности электрической эрозии различных участков контура. Вырезание прямолинейных участков контура обычно не вызывает каких-либо затруднений, однако обработка радиусных сопряжений, вырезание углов и т.д. сложна. Обработка таких участков вызывает частые короткие замыкания при прохождении электродом-инструментом

сопряжений с малыми радиусами и углами сопряжения, меньшими 90° . Для устранения возникающих проблем минимальный радиус вырезаемого сопряжения определяется в зависимости от высоты вырезаемого контура в детали. Так, например, для станков СТ минимальный радиус сопряжения двух поверхностей для толщины вырезаемого контура 45 – 65 мм составляет 180 мм. При меньших значениях возникают частые короткие замыкания и процесс обработки останавливается. Другие производители электроэрозионных станков (например, Sodick) разработали специальные режимы обработки и программы, входящие в ЧПУ и управляющие генераторами импульсов, использование которых позволяет существенно уменьшить последствия ухудшения условий обработки и обеспечивает обработку углов с радиусами сопряжения 0,05 мм при толщине заготовок 9 – 10 мм, 2 – 5 мм при толщине заготовок 40 – 80 мм и т.д. Такие результаты достигаются благодаря автоматическому снижению электрических режимов обработки и давления прокачки рабочей жидкости через МЭП при прохождении углов. Для повышения качества обработки приведенных выше участков используют также системы, уменьшающие электролитическое и коррозионное воздействие воды на поверхность вырезаемого контура, которые особенно явно проявляются при выполнении чистовых видов работ при малых величинах МЭП, вырезании переходных участков в заготовках малых размеров и при выполнении высокоточных работ. В некоторых случаях целесообразно провести замену диэлектрической жидкости на углеводородную с тем, чтобы уменьшить величину МЭП и полностью устранить вредное воздействие воды на обработанную поверхность. Применение более вязких жидкостей способствует формированию в зоне обработки импульсных разрядов малой мощности и получению более чистых поверхностей.

2.11. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКАХ

Этап создания программ обработки заготовок, наряду с выбором режимов обработки и расчетом электродов-инструментов, является неотъемлемой частью технологического процесса. Современное электроэрозионное оборудование, как и другие виды, оснащается компьютерным ЧПУ, которое обеспечивает наиболее эффективное функционирование станков. В программе обработки учитываются и задаются: материал обрабатываемой заготовки, материал электрода-инструмента, рабочая жидкость и условия ее прокачки, траектория движения электрода-инструмента и заготовки, электрические параметры электрической эрозии, режим смены ЭИ, функции управления электроэрозионным станком и генератором импульсов и т.д.

Процесс обработки на электроэрозионном оборудовании осуществляется при относительном перемещении заготовки и инструмента.

Для перемещения электрода и детали, задания режимов обработки составляют программу обработки. Для этих целей используют различные системы программирования. В настоящее время применяются системы программирования в двоично-десятичных кодах, кодах ISO, специальных программных продуктах изготовителей электроэрозионного оборудования: Профиль+, Geomax, Proform, Optiscam – для станков СТ; EdgeCAM, Megacad, Mecanic, Easycat и др. для станков AGIE, SolidCAM – для станков Sodick, Mitsubishi и др., Гемма-3D, Техтран – русифицированные версии систем программирования обработки для различных типов фрезерных и электроэрозионных станков, штампового оборудования, оснащенного ЧПУ. В последнее время получили распространение версии программного обеспечения, при использовании которых программы обработки (APT-программы) формируются в инвариантных кодах САМ-системы на основе электронного файла поверхности детали, подлежащей обработке, а затем с помощью так называемых постпроцессоров переводятся в машинные коды соответствующей системы ЧПУ станка. Это наиболее совершенные системы, позволяющие существенно упростить процесс создания управляющих программ.

В качестве носителей программы, их хранения и передачи используются перфоленты, магнитные ленты в кассетах, CD, оптоволоконные кабели для непосредственной связи компьютера программиста с электроэрозионным станком и силовыми платами генератора импульсов. В стойках ЧПУ станков в настоящее

время устанавливаются мощные процессорные системы, которые позволяют создавать программы обработки непосредственно на станке.

Обработка детали осуществляется по управляющей программе. В процессе выполнения программы производится слежение за межэлектродным промежутком, на основе чего система ЧПУ управляет приводами станка, генератором импульсов, прокачкой рабочей жидкости. Программное обеспечение станков осуществляет автоматическую обработку, режим ручного управления, режим ввода-вывода, режим диагностики и измерений. В настоящее время производители электроэрозионных и других станков с ЧПУ используют для составления программ различные способы задания параметров обработки, траектории движения электрода-инструмента и заготовки, условия промывки МЭП и т.д.

Программирование обработки в ISO-кодах

В ISO-кодах управляющая программа представляет собой последовательность кадров, которые определяют положение ЭИ и заготовки перед обработкой и направление их взаимных перемещений в процессе обработки, вид промывки межэлектродного промежутка, основные параметры режимов и характер их изменения в течение всего процесса обработки и т.д. Каждый кадр образует одну строку в управляющей программе.

Кадр программы обычно содержит:

- номер кадра (состоит из символа N и трехзначного числа);
- код технологической функции и соответствующие параметры;
- символ «конец кадра» – *.

В программе обычно допускается записывать ограниченное число кадров. При необходимости каждая часть таких программ с помощью постпроцессоров может стыковаться с другой частью программы, и в результате этого на вырезных и прошивочных станках могут обрабатываться практически любые контуры.

*Код технологической функции включает подготовительные и вспомогательные функции. Подготовительные функции кодируются буквой **G** и числом в пределах 0 – 99 и указывают на необходимость выполнения соответствующих действий исполнительными органами станка. Например, функция **G00** обозначает ускоренное перемещение электрода-инструмента и (или) заготовки к точке, координаты которой указаны после приведенной функции; **G01** обозначает линейное перемещение с запрограммированной скоростью, которое должен выполнить электрод-инструмент и (или) заготовка, к точке с указанными в данном кадре коор-*

динатами; **G02** – указывает на необходимость перемещения ЭИ или заготовки по окружности или дуге окружности к точке, координаты которой указаны в данном кадре. Перемещение выполняется по ходу движения часовой стрелки. Функция **G03** обозначает, что перемещение к заданной в конце кадра точке будет осуществляться против хода часовой стрелки и т.д. Состав подготовительных функций представлен в приложении.

Для задания отрицательных величин перед цифровым кодом выполняемых функций ставится знак «-».

Кроме основных функций отдельными кадрами в программе задаются вспомогательные функции, состоящие из буквы M и двухзначной цифры. С помощью вспомогательных функций обеспечивается управление станком и генератором импульсов.

К числу таких вспомогательных функций относится, например, включение заданной частоты генератора импульсов (M32 – 8 кГц, ..., M36 – 200 кГц), программируемый останов обработки заготовки для выполнения дополнительных действий (M00), включение системы адаптивного управления, включение или выключение насоса наполнения ванны рабочей жидкостью, включение механизма перемотки проволоки и т.д. Состав подготовительных функций приведен в приложении.

*Для хранения текущего состояния системы, режимов работы генератора импульсов, скоростей рабочих и ускоренных ходов и ряда других параметров система ЧПУ станка располагает базой данных или областью параметров. Группы таких параметров имеют определенную нумерацию и открываются соответствующими буквами. Доступ к параметрам чаще всего осуществляется с пульта оператора в режиме ввода и редактирования параметров. При создании программы обработки заготовок могут задаваться следующие параметры: **F** – частота следования импульсных разрядов; **T** – длительность импульсов; **I** – амплитуда тока; **U** – диапазон напряжения при обработке; **W** – величина натяга проволоки; **S'** – диапазон скорости перемотки проволоки и т.д. Для компенсации погрешностей несовершенства механизмов станка при смене направления движения по соответствующим осям (координатным направлениям) используют специальные параметры. Эти же параметры помогают учитывать длину проволоки на бобине, записывать скорость перемотки проволоки, контролировать время обработки, а также выдают сообщения о возникающих ошибках и т.д. При составлении программы в ISO-кодах следует учитывать определенные правила:*

- в одном кадре должно содержаться одно слово с одним буквенным адресом;
- вспомогательные функции записываются в отдельных кадрах;
- координаты по осям, вдоль которых нет перемещений, опускаются.

ISO-коды используются для составления программ обработки заготовок на вырезном и прошивочном оборудовании. Для вырезания контура электроду-инструменту необходимо сообщить движение по траектории, которая смещена относительно вырезаемого контура на некоторую величину, учитывающую межэлектродный зазор, размер электрода-инструмента и припуск на последующую обработку. Для составления программы обработки следует знать координаты характерных точек контура, в которых электрод-инструмент изменяет направление движения. Траектория, по которой будет двигаться центр ЭИ, эквидистантна вырезаемому контуру. Для характерных точек такой траектории в каждом кадре управляющей программы следует указать необходимые действия, которые должны быть выполнены исполнительными органами станка для перемещения ЭИ и заготовки и вырезания контура. С помощью вспомогательных и программируемых функций осуществляются управляющие воздействия на генератор импульсов.

Рассмотрим пример управляющей программы, составленной для обработки контура на вырезном станке. На рис. 2.10 показана эквидистанта вырезаемого контура, по которой перемещается центр ЭИ.

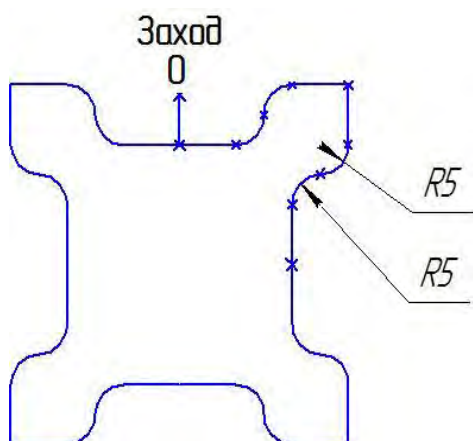


Рис. 2.10. Пример вырезаемого контура

Предлагаемый контур составлен из прямолинейных участков и закруглений постоянного радиуса кривизны. Прототипом контура на реальной детали может быть профиль пуансона вырубного штампа для холодной листовой штамповки. Заход показывает, с какой стороны будет производиться подход электрода-инструмента на эквидистанту к вырезаемому контуру. Ноль соответствует начальной точке системы координат, относительно которой будут задаваться перемещения

ЭИ. Звездочками указаны точки, в которых изменяется направление перемещения ЭИ или заготовки. При этом контур состоит из четырех участков одинаковой формы, повернутых относительно друг друга на угол 90° . Это обстоятельство будет

учтено и позволит несколько упростить программу обработки за счет включения в ее состав подпрограммы перемещения ЭИ только по части контура. Остальные участки контура получают поворотом повторяемой части контура на соответствующий угол (90° , 180° и т.д.).

Заход на эквидистанту вырезаемого контура обычно выполняется на ускоренном ходу, величина которого устанавливается для конкретной модели электроэрозионного станка. Причем заход к вырезаемой траектории под прямым углом не считается предпочтительным. Это связано с тем, что люфты в механизмах приводов подачи при изменении направления движения (заготовки или электрода-инструмента) являются причиной появления в местах подхода инструмента практически неустранимых погрешностей на обработанной поверхности. Целесообразно подводить электрод-инструмент в зону обработки по касательной к обрабатываемому контуру либо по другой траектории. При создании программы обработки приведенного выше и других контуров используются возможности программного обеспечения проводить поворот частей запрограммированной траектории относительно друг друга. Для этого участок траектории программируется один раз, а затем с помощью параметров, задающих угол поворота, запрограммированная часть контура будет повернута относительно предыдущей части на заданный угол.

Управляющая программа обработки контура, эквидистанта которого показана на рис. 2.10, приведена ниже (справа приведены пояснения к каждому кадру):

N0 G92 X0 Y0 Z0 * - установка абсолютных накопителей положения в 0
N1 G91 * - задание перемещений в приращениях
N2 G23 P0 P0 * - обнулить параметр «градус»
N3 G23 P1 P0 * - обнулить параметр «минута»
N4 G23 P2 P0 * - обнулить параметр «секунда»
N5 G23 P3 P90 * - засылка 90° в параметр P3
N6 G41 X0 Y-10000 K0 * - заход на эквидистанту по Y в «-» на 10 мм
N7 G27 P10 P3 * - повторить три раза участок контура с 10 кадра
N8 G22 * - отмена поворота траектории на угол из P0,P1,P2
N9 G12 P21 * безусловный переход на 21 кадр
ПОДПРОГРАММА ОБХОДА УЧАСТКА КОНТУРА
N10 G01 X10000 Y0 * - линейная интерполяция по координате X
N11 G03X5000 Y5000 I0 J5000 * - круговая интерполяция против хода часовой стрелки
N12 G02 X5000 Y5000 I5000 J0 * - круговая интерполяция по ходу часовой стрелки
N13 G01 X10000 Y0 * - линейная интерполяция вдоль координаты X
N14 G01 X0 Y-10000 * - линейная интерполяция по Y в «-»
N15 G02 X-5000 Y-5000 I-5000 J0* - круговая интерполяция по ходу часовой стрелки
N16 G03 X-5000 Y-5000 I0 J-5000 * - круговая интерполяция против хода часовой стрелки
N17 G01 X0 Y-10000 * - линейная интерполяция по Y в «-»
N18 G24 P3 P0 * - сложение параметра P3 с P0 для модификации угла поворота
N19 G21 * - задание обработки с поворотом на заданный угол (первый раз подпрограмма выполняется без поворота)
N20 G11 * - возврат из подпрограммы
N21 G40 X0 Y10000 * - движение с отменой коррекции инструмента
N22 M02 * - конец программы

Первый кадр программы, задающей траекторию движения ЭИ и заготовки, обнуляет координаты абсолютной системы координат станка. Это обозначает, что обработка контура будет производиться в системе координат, связанной с деталью, причем началом отсчета перемещений по соответствующим координатам будет точка, из которой ЭИ будет подходить к зоне обработки (0). Второй кадр программы указывает, что перемещения ЭИ и заготовки относительно друг друга будут задаваться в приращениях относительно предыдущего их положения. Кадры со второго по пятый задают параметры поворота запрограммированной траектории на заданный угол. Эта часть программы позволяет получить замкнутую эквидистанту вырезаемого контура. Все остальные кадры программы и подпрограммы задают точки контура, в которых происходит изменение направления перемещения ЭИ и заготовки.

Контур, заданный программой, показывает траекторию, по которой перемещается центр ЭИ, чтобы в заготовке была вырезана полость заданной формы и размеров. Траектория движения электрода-инструмента смещена относительно контура в заготовке на величину межэлектродного зазора для определенного режима обработки и половину диаметра проволоки. Параметры режима обработки определяются техническими требованиями, предъявляемыми к детали. Режимы обработки для приведенного случая задаются оператором станка на панели генератора импульсов, либо соответствующими функциями могут вводиться в программу обработки.

Недостатком приведенного способа составления программ является значительная трудоемкость программирования, т.к. необходимо последовательно вводить каждый кадр для создания эквидистанты контура, причем координаты каждой точки траектории движения ЭИ должны быть заданы с учетом оффсета. Кроме этого, при изменении режимов обработки изменяется величина межэлектродного зазора, а, следовательно, и положение эквидистанты относительно вырезаемого контура. Поэтому для каждого перехода необходимо составлять новую программу обработки, т.к. координаты точек, по которым перемещается ЭИ при обработке на новых режимах, будут отличаться от предыдущих.

Приведенное выше программное обеспечение позволяет вводить перечисленные выше группы параметров с пульта стойки ЧПУ станка, от внешних носителей, от системы подготовки управляющих программ. При автоматической отработке управляющей программы программное обеспечение производит подготовку данных в соответствии с заданной по программе траекторией, расчет необ-

ходимых коррекций, интерполяцию в соответствии с заданной функцией движения, коммутацию фаз шаговых двигателей с необходимой скоростью.

Программное обеспечение производителей электроэрозионного оборудования

Большинство изготовителей электроэрозионных станков разрабатывает собственное программное обеспечение к производимому оборудованию. *Программное обеспечение выполняет следующие функции: после введения исходных данных позволяет рассчитать или выбрать режимы обработки, с помощью графического редактора воспроизвести обрабатываемую поверхность, сформировать программу обработки заданной поверхности в соответствии с выбранными режимами.* По программе выполняется перемещение ЭИ и заготовки, производится включение заданных режимов обработки и изменение их параметров, замена электродов-инструментов, изменение давления прокачки рабочей жидкостью, заполнение рабочей ванны диэлектрической жидкостью и т.д.

При использовании программных продуктов фирм-изготовителей станков имеется возможность запрограммировать обрабатываемый контур. *Программирование вырезаемого контура выполняют с помощью функций аналогичных G-функциям системы программирования в ISO-кодах.* После создания контура при введении минимального количества данных с помощью специальных программ, заложенных в программное обеспечение, *система автоматически сдвигает траекторию движения ЭИ на заданную величину (офсет) в ту или другую сторону относительно вырезаемого контура (для обработки охватывающих или охватываемых поверхностей).* Так получают эквидистанту вырезаемого контура. *Необходимо дополнительно выбрать положение исходной (нулевой) точки, из которой электрод-инструмент должен начать подход к обрабатываемой заготовке и относительно которой производится отсчет приращений. Затем выбирают режимы обработки.* С помощью специальных программ ЧПУ управляющая программа обработки генерируется автоматически. Такие программные продукты используют при создании программ вырезной, прошивочной и контурной обработки заготовок.

Рассмотрим пример программы обработки полости, расчет режимов обработки для которой приведен в разделе 2.8. Формирование программы производится следующим образом. Выбранная последовательность режимов обработки переадресовывается в программу, находящуюся в оперативной памяти процессора

ЧПУ, которая генерирует управляющую программу обработки. Управляющая программа имеет следующий вид (применительно к станкам Charmilles Technologies):

```
COORD/ABS
COORD/METR
TECHNO/F,TCUAC
TOOL/1
AXE/Z
FLUSH/EL,0,LA,3,PA0,MU,0
;STRAT:TY,1,CH,26,L,-20.,PR,20.,SF,50.00,ST,106.57,VO,100.00,O,33,
NE,2,TF,2,LE,0.,TB,0
FROM/
AUXF/26
DOWN/L,-20.,H,-0.75,E,463;T=7:10
ORB/L,-20.,H,-0.65,E,443
ORB/L,-20.,H,-0.56,E,423
ORB/L,-20.,H,-0.46,E,403
ORB/L,-20.,H,-0.35,E,383
ORB/L,-20.,H,-0.3,E,363
ORB/L,-20.,H,-0.25,E,343
ORB/L,-20.,H,-0.195,E,323,RET;T1=10:03
TOOL/2
AUXF/26
DOWN/L,-20.,H,-0.24,E,323
ORB/L,-20.,H,-0.18,E,323
ORB/L,-20.,H,-0.15,E,303
ORB/L,-20.,H,-0.105,E,293
ORB/L,-20.,H,-0.075,E,283
ORB/L,-20.,H,-0.05,E,273
ORB/L,-20.,H,-0.035,E,263,RET;T2=12:38
;ENDSTRAT;T1+T2=22:41
```

Первые три строки программы содержат информацию о размерностях вводимых данных, а также о выполнении по данной программе прошивочной обработки. Затем следует информация о первом электроде, которым будет выполняться обработка полости на черновых режимах. Следующая строка показывает главную ось, относительно которой будет выполняться перемещение ЭИ для выполнения обработки (ось **Z**). Затем следуют параметры промывки межэлектродного промежутка рабочей жидкостью: промывка через ЭИ выключена (**EL0**), обработка будет производиться непрерывной боковой промывкой высокого давления (**LA3**), промывка через деталь (**PA**) и многоканальная промывка (**MU**) выключены. Затем приведены исходные данные: шероховатость поверхности после обработки, глубина полости, уровень защиты обработки от возникающих в результате эрозии коротких замыканий, площадь по торцевой поверхности ЭИ и общая площадь обработки (с учетом боковой поверхности ЭИ), объем удаленного материала, количество электродов для обработки, длительность паузы между импульсными разрядами. **FROM** определяет центр системы координат – она находится в той точке, где располагается ЭИ перед обработкой. Затем указывается конечная шероховатость поверхности (класс SN или параметр Ra) и следующие строки представляют собственно программу обработки заданной полости. Причем обработка на первом

черновом режиме выполняется опусканием электрода-инструмента вглубь заготовки (**DOWN**) на расстояние 20 мм за вычетом величины торцевого межэлектродного промежутка, выбранного для данного режима обработки. Знак «минус» перед величиной заглабления ЭИ в заготовку и перед значением торцевого МЭП обозначает, что направление координатной оси **Z**, вдоль которой выполняется обработка, не совпадает с направлением перемещения ЭИ. В конце строки указано ориентировочное время обработки полости на первом переходе. Реальное время определяется устойчивостью электрической эрозии и может несколько отличаться от рассчитанного значения. Остальные переходы черновой обработки выполняются последовательным переходом к менее энергоемким режимам при орбитальном движении ЭИ относительно полученной в заготовке полости. При этом амплитуда ОДЭИ определяется и поддерживается системой ЧПУ автоматически как разность между величинами МЭП для выполняемого и предыдущего режимов обработки. После выполнения черновой обработки следует возврат электрода-инструмента в исходную точку (**RETURN**), в которой производится его замена. Указано также время на выполнение черновой обработки с ОДЭИ. После смены ЭИ на чистовой электрод обработка выполняется так же, как и на черновых режимах: на первом переходе – опусканием ЭИ вглубь заготовки, а затем – при орбитальном движении ЭИ с определенной амплитудой. В конце чистовой обработки производится возврат ЭИ в исходную точку и станок по команде ЧПУ выключается.

При обработке сложных пространственных поверхностей имеется возможность задавать электроду-инструменту движение в пространстве, т.е. одновременно по нескольким координатным направлениям. Программное обеспечение станков содержит также большое количество запрограммированных траекторий движения ЭИ и заготовки.

Часто возникает необходимость проводить выверку положения ЭИ и заготовки относительно друг друга. Для этих целей могут использоваться так называемые измерительные циклы (поиск центра отверстия заготовки, поиск угла заготовки, поиск центра эталонного измерительного приспособления и т.д.).

CAD/CAM- системы

Современное программное обеспечение (SolidCAM, Gemma-3D, Uni-graphics и др.) в настоящее время *работает в среде Windows и допускает использование файлов САПР (CAD-систем) различных форматов, может применяться при программировании контуров, обработка которых выполняется на*

электроэрозионных станках различных фирм. *Основу программного обеспечения составляют ISO-коды.*

Доступ к функциям обеспечивается благодаря текстовым меню либо столбцам пиктограмм, а строка подсказок помогает избежать ошибок при работе. Ввод файлов различных форматов, содержащих контур обработки, производится непосредственно из предлагаемых меню. Программное обеспечение высокого уровня работает со всеми периферийными устройствами, поддерживаемыми Windows: принтеры, графические экраны, плоттеры. Функции, встроенные в программы, делают возможным обмен информацией с другими приложениями Windows, такими как Excel или Access.

С помощью программного обеспечения *файлы обработки* в соответствующих кодах по сравнению с приведенными выше способами создания управляющих программ *разрабатываются в более короткие сроки.* Наглядность геометрических функций позволяет быстро создать геометрию обрабатываемого контура. Комбинируя способы отображения процесса обработки на экране дисплея: 2D, 3-5D или полутонное, можно детально проанализировать движение ЭИ и заготовки.

Последовательность действий для получения программы обработки контура вырезанием или полости последовательными проходами выглядит следующим образом.

В первом случае можно использовать электронные файлы деталей, конструкции которых разработаны в любой CAD-системе (SolidWorks, Pro-Engineer, AutoCAD, Компас и др.). Затем созданный файл в определенном формате (DXF, IGES или др.) скачивается в систему подготовки управляющих программ (CAM-систему). Программист или технолог выполняет следующие действия.

1. Выбираются и отмечаются соответствующим образом с помощью графического редактора, встроенного в CAM-систему, поверхности, подлежащие обработке на определенном виде оборудования (электроэрозионном, фрезерном или любом другом). Для выбранной поверхности могут вводиться ограничения, запрещающие обработку некоторой части поверхности.
2. Программными средствами выбираются габариты заготовки, обработка которой будет осуществляться на данной операции.
3. Из баз данных выбираются режимы обработки в соответствии с требованиями, предъявляемыми к обработанной поверхности.
4. В процессе выбора режимов производится подбор инструментов.
5. При отсутствии готовых инструментов по форме поверхности, подлежащей обработке, с учетом межэлектродных зазоров автоматически строится профиль электродов-инструментов для

черновой и чистовой обработки. 5. Определяется начальная точка системы координат, от которой будет осуществляться перемещение ЭИ и заготовки. Затем выбирается программистом или технологом или предлагается самой системой программирования траектория подхода ЭИ к обрабатываемой поверхности и направление ее обхода в процессе обработки.

В результате выполнения действий получают управляющую программу (APT-программу) обработки выбранной поверхности детали в так называемых инвариантных кодах САМ-системы. Средства программного обеспечения позволяют выполнить просмотр созданной программы (симуляцию обработки) с выводом на экран монитора траектории движения ЭИ относительно заготовки. При выполнении симуляции в любом месте программа может быть прервана для выполнения ее редактирования. *Затем полученная программа с помощью постпроцессора переводится в программу, доступную ЧПУ конкретного станка и засылается в его память. Постпроцессор представляет собой программу, осуществляющую перевод функций системы автоматической подготовки программ в функции конкретной системы ЧПУ станка.* В настоящее время разработаны постпроцессоры для электроэрозионных станков Charmilles Technologies, Agie, Sodick, Fanuc, Mitsubishi и станков других типов: фрезерных, токарных, установок лазерной и гидроабразивной резки, штампового оборудования с ЧПУ и т.д.

На рис. 2.11 показан результат симуляции программы вырезания контура заготовки логотипа фирмы.

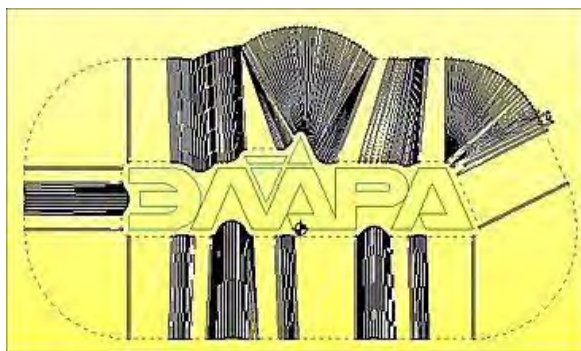


Рис. 2.11. Пример симуляции программы вырезания контура

В приведенном рисунке показывают движение проволочного ЭИ через согласованные точки на криволинейных участках верхнего и нижнего вырезаемых контуров.

Во втором случае для создания поверхностей, подлежащих обработке можно использовать возможности графических редакторов самих САМ-систем, поскольку функции таких редакторов обеспечивают построение поверхностей любой сложности. Различие состоит лишь в том, что САМ-системы работают не с

твердотельными моделями деталей или заготовок, которыми оперируют в CAD-системах, а с поверхностями или оболочками. Все остальные действия, выполняемые для получения управляющей программы по обработке построенных поверхностей, аналогичны приведенным выше.

Для обработки некоторых типов заготовок, например, шестерен, токарного инструмента, кулачков, валов и др. деталей можно использовать готовые программные продукты. В каждой из этих программ имеются меню, которые содержат все параметры, необходимые для создания программы обработки. Например, для создания управляющей программы обработки шестерен необходимо построить профиль зубчатого колеса. В этом случае следует задать модуль и число зубьев колеса для того, чтобы с помощью программного обеспечения такой профиль был построен автоматически. Затем производится переход от профиля детали к траектории, по которой должен перемещаться ЭИ при обработке. Траектория движения центра ЭИ является эквидистантой профиля зубчатого колеса. Для построения эквидистанты с помощью программного обеспечения профиль зубчатого колеса автоматически смещается в соответствии с размером ЭИ и величиной межэлектродного зазора для определенного режима обработки. Причем система программирования выдает точку начала и направление подхода ЭИ к вырезаемому профилю, а также выход электрода-инструмента после окончания обработки. Начальную точку, траекторию подхода ЭИ к зоне обработки, обхода поверхности при обработке и отхода после обработки может выбрать программист или технолог. При необходимости может быть задан как постоянный, так и переменный угол наклона электрода-инструмента относительно направления перемещения проволоки через зону обработки. Аналогичным образом создаются управляющие программы обработки поверхностей сложного профиля последовательными проходами электрода-инструмента простой формы (методом контурной обработки). Затем производится постпроцессирование созданной программы для последующего использования при обработке заготовки на выбранном типе оборудования. Управляющая программа сохраняется в виде электронного файла на определенном типе носителя (CD, в памяти компьютера программиста или технолога, на магнитном носителе, перфоленте и т.п.) и может быть многократно использована.

2.12. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Электроэрозионной обработкой в настоящее время изготавливают большое количество деталей из заготовок, полученных различными методами: литьем, штамповкой, ковкой, прокаткой, прессованием. Вырезанием, прошивочной и контурной эрозионной обработкой из таких заготовок получают детали разделительных и формообразующих штампов, литьевой оснастки (литьевых форм, кокилей, экструзионных фильер и т.п.); прокатные валки; рабочие колеса насосов и компрессоров; лопатки турбин; прошивают узкие глубокие щели, пазы, отверстия малого диаметра; производят обработку соединительных каналов в гидроаппаратуре, корпусных деталях; получают решетки, сита, сетки; производят клеймение и маркирование; осуществляют извлечение сломанного режущего инструмента, болтов, шпилек, штифтов и других крепежных деталей. Перечисленные детали, как правило, изготавливают из закаленных, коррозионно-, тепло- и жаростойких сталей, титана, твердых сплавов и других твердых и высокопрочных материалов. Традиционными методами производить обработку большинства заготовок практически невозможно. Различные способы электроэрозионной обработки обеспечивают не только изготовление деталей, но в большинстве случаев улучшают их свойства: повышается износостойкость, увеличивается поверхностная твердость, коррозионная стойкость и т.д.

2.12.1. ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ШТАМПОВ И ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ

Для изготовления деталей разделительных штампов применяют конструкционные стали (сталь 45 и др.), используемые для изготовления пуансонодержателей, съемников, плит, и углеродистые инструментальные стали (У7 – У13, У7А – У 13А) для изготовления пуансонов и матриц. Допуски на рабочие размеры пуансонов и матриц разделительных штампов составляют обычно 0,25 – 0,35 допуска на размер детали. Точность обработки деталей штампов определяется толщиной штампуемых заготовок. При толщине листового материала менее 3 мм точность деталей должна соответствовать 8 качеству, при большей толщине исходных заготовок – 10 качеству. Параметры шероховатости рабочих деталей штампов при обработке заготовок из сталей составляют 0,8 – 0,4 мкм (Ra), при толщине исходных заготовок более 3 мм – 2,5 – 1,25 мкм; при обработке цветных металлов – 0,1 – 0,2 мкм. Отверстия матриц штампов выполняют конусными. Конусность определяется толщиной исходных заготовок и колеблется в пределах $30' - 1^{\circ}30'$ – для заготовок толщиной не более 3 мм, $3 - 5^{\circ}$ – при штамповке деталей из заготовок большей толщины.

Требования к качеству поверхностей и точности размеров деталей штампов таковы, что они могут быть полностью обработаны на электроэрозионных станках за исключением отверстий под направляющие втулки, колонки и крепежные изделия, которые традиционно обрабатываются на расточных станках. Электроэрозионная обработка проводится после термической обработки заготовок и полуфабрикатов и шлифования базовых поверхностей.

Рабочий профиль отверстий в матрицах состоит из двух участков: верхняя часть отверстия имеет параллельные стенки, а стенки нижней части отверстия выполнены с уклоном. Верхний участок отверстия является рабочим и служит для отделения материала от исходной заготовки. При затуплении рабочих кромок проводят переточку матрицы по верхней поверхности, поэтому высота верхнего участка матрицы должна быть достаточной для выполнения нескольких переточек. Уклон на втором участке матрицы предназначен для свободного удаления отделенной части материала. Обработку отверстий в матрицах целесообразно производить электроэрозионным вырезанием, которое позволяет получать в заготовках контуры практически любой сложности. Вырезные станки обеспечивают выполнение конусного резания. Предварительно прошивают отверстие для заправки проволочного электрода-инструмента. Заданная точность и параметры шероховатости достигаются при переходе от черновых режимов обработки к чистовым через ряд ступеней режимов (в большинстве случаев достаточно 3 – 6 ступеней). Черновую обработку выполняют на высокопроизводительных режимах. Чистовую обработку и доводку элементов вырезанного контура выполняют на мягких режимах работы генератора импульсов, причем при высоких требованиях к чистоте поверхностей необходимо применять специальные рабочие жидкости. Доводку полученных вырезаний отверстий можно проводить с помощью инструментов простой формы (пластин, стержней), перемещаемых относительно вырезанного контура. Производительность и точность прошивочной или контурной обработки в этом случае будет выше, чем чистовая обработка проволочным ЭИ.

При серийном изготовлении многооконных штампов целесообразно использовать электроды-инструменты, формообразующие поверхности которых повторяют профиль отверстий, вырезаемых в заготовке. В качестве электродного материала целесообразно применять электроэрозионный графит, обладающий высокой эрозионной стойкостью. Однако необходимо учитывать, что для обработки графита следует применять специализированное оборудование. В ряде случаев для предварительной обработки могут применяться ЭИ из алюминия или его сплавов, а чистовая

обработка – электродами-инструментами из графита. Уменьшение припуска на окончательную обработку повышает стойкость графитированных электродов-инструментов. Алюминиевые электроды могут быть получены литьем в формы с уменьшенными по сравнению с размерами прошиваемых отверстий размерами, причем величина занижения размеров может достигать 1 – 1,5 мм.

Для обработки отверстий различного профиля могут применяться электроды-инструменты из меди. Обработку таких ЭИ производят на металлообрабатывающем оборудовании, а затем доводят их поверхности полированием.

Выбор метода обработки пуансонов вырубных и пробивных штампов зависит от способа его крепления в пуансонодержателе и габаритных размеров пуансонов. Пуансоны малых размеров так же, как и матрицы, могут быть обработаны на вырезных станках. Точность вырезания контуров на таком оборудовании в настоящее время такова, что после вырезания деталей необходимость их последующей слесарной доводки и подгонки отпадает практически полностью. Крупные пуансоны, нерабочая часть которых имеет большие размеры, чем профилированная, получают обратным копированием. Для их обработки используют электроды-инструменты из графита или меди, формообразующие поверхности обрабатывают на вырезных станках. Важно перед обработкой достаточно точно расположить детали штампа на столе станка перед обработкой. Для установки и закрепления заготовок используют прихваты, магнитные плиты и специальные приспособления. Выверку положения ЭИ относительно заготовки можно производить, используя для этого измерительные циклы, заложенные в программное обеспечение электроэрозионных станков. В ряде случаев для этих целей используют установочные шаблоны, универсальные и специальные измерительные приспособления.

Детали вытяжных и ковочных штампов для холодной листовой и горячей объемной штамповки заготовок изготавливают как из приведенных выше сталей, а также используют легированные стали (5ХМН, 5ХГМ), нержавеющей (коррозионно-стойкие) стали (40Х13, 20Х13, Х12М), жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы (20Х23Н13, 12Х17, ХН35ВТЮ, ХН77ТЮР и др.), твердые сплавы (ВК25 и т.д.).

Электроды-инструменты имеют профиль, обратный профилю обрабатываемой полости, скорректированный в соответствии с износом в процессе обработки. Размеры рабочей части ЭИ уменьшаются в направлении нормали к формообразующим поверхностям на величину, равную сумме величин межэлектродного зазора, высоты максимальных неровностей поверхности и амплитуды орбитального движения. Для станков, оснащенных программным обеспечением, рассчитывающим автоматически

величину амплитуды ОДЭИ, необходимость корректировать размер ЭИ на указанную величину отпадает. Обработку рекомендуется выполнять в низкочастотном диапазоне режимов электродами-инструментами из графита, поскольку на электроимпульсных режимах их износ снижается практически до нуля. Полости в штампах обычно обрабатываются на скоростных режимах удаления припуска, при этом параметры режимов обработки выбираются исходя из площади обрабатываемой поверхности. После прошивания полости постепенно уменьшают энергетические параметры импульсных разрядов и за несколько переходов (6 – 8) уменьшают шероховатость поверхностей. Обработку производят при боковой прокачке рабочей жидкости или через систему отверстий в электроде-инструменте. Диаметр отверстий не должен превышать 2 – 2,5 мм. Удаление выступов на обработанной поверхности в местах расположения отверстий осуществляется за счет орбитального движения ЭИ. После окончания черновой обработки изношенный электрод-инструмент заменяют новым и удаляют оставшуюся часть припуска. Чистовую обработку выполняют, последовательно переходя к чистовым режимам в высокочастотном диапазоне. Номенклатура обрабатываемой оснастки велика. Изготавливают штампы для получения заготовок коленчатых валов, шатунов, вилок, поворотных кулаков, турбинных лопаток и т.п.

Весьма удобно использовать электроэрозионную обработку для изготовления деталей литьевых форм, применяемых затем при получении изделий из пластмасс, например, деталей корпусов телевизоров, изделий интерьера автомобиля и многих других. К деталям литьевых форм предъявляются более высокие требования по точности и качеству их изготовления по сравнению с деталями штамповой оснастки. Это связано с тем, что в ковочных штампах получают преимущественно заготовки и полуфабрикаты, которые подвергают затем механической и другим видам обработки, а в литьевых формах получают готовые к употреблению изделия. В большинстве случаев приходится изготавливать сложные по форме ЭИ. Могут использоваться электроды-инструменты простой формы для выполнения контурной обработки полостей. Отклонения формы сопрягаемых деталей литьевых форм должны иметь минимальные значения. Погрешности формы могут привести к различной усадке в разных частях детали, неодинаковому заполнению формы и браку (холодные спаи, трещины и т.д.). Для обработки деталей используют профилированные электроды-инструменты. При этом расходы на изготовление инструмента несколько превышают аналогичные расходы при механической обработке. Однако удельная доля затрат на изготовление электродов-инструментов резко снижается с увеличением серийности

литьевых форм. Считается, что электроэрозионная обработка экономически целесообразна, если ежегодно выпускается не менее 5 – 6 одинаковых форм. В качестве заготовок для изготовления пуансонов и матриц применяют поковки, форма которых приближена к форме готовой детали. Обработку пуансонов и матриц литьевых форм чаще всего выполняют после фрезерования, оставляя под электроэрозионную черновую и чистовую обработку припуск 1 – 1,5 мм. В последнее время широкое применение получил высокоскоростной метод фрезерования. При отсутствии специальных станков черновую обработку выполняют на обычных обрабатывающих центрах. Использование в конструкциях форм деталей из коррозионно-стойких сталей затрудняет их обработку на металлорежущем оборудовании. Такие детали могут быть полностью обработаны на электроэрозионных станках. Фасонные электроды-инструменты для электроэрозионной обработки наиболее целесообразно изготавливать из графита. Обработку следует производить двумя электродами на черновых и чистовых режимах. Изготовление узких пазов и щелей сложной формы, отверстий малого диаметра на фасонных поверхностях целесообразно выполнять отдельно от обработки самой поверхности, что улучшит условия протекания электроэрозионной обработки.

После электроэрозионной обработки проводить доводку поверхностей другими способами практически не требуется. Электроэрозионная обработка позволяет существенно сократить трудоемкость изготовления деталей штамповой и литьевой оснастки. Например, полуформа, используемая при литье заготовки коленчатого вала, показанная на рис. 1.64, обрабатывается до шероховатости поверхностей 0,8 мкм (Ra) на прошивочном электроэрозионной станке с линейными приводами с помощью двух электродов-инструментов из графита в течение 30 часов. При фрезеровании и последующей слесарной доводке затраты времени на обработку в 5 – 7 раз больше. Основная экономия связана со снижением трудоемкости работ по обработке ручьев полуформы. При фрезеровании скорости резания снижаются, т.к. приходится обрабатывать высоколегированную сталь (материал формы сталь X12M), уменьшается стойкость режущих инструментов.

При выполнении электроэрозионной обработки могут быть использованы как стандартные, так и специальные рабочие жидкости, в результате чего поверхности форм площадью 10000 – 20000 мм² доводят до шероховатости 0,15 – 0,17 мкм, используя электроды-инструменты преимущественно из меди.

2.12.2. ОБРАБОТКА РАБОЧИХ КОЛЕС НАСОСОВ, ТУРБИН, КОМПРЕССОРОВ

Межлопаточные каналы рабочих колес могут располагаться на внешней окружности, на торце диска и ограничиваться бандажным кольцом, причем в большинстве случаев имеют различную кривизну. В качестве материала, используемого для изготовления перечисленных деталей, используются жаропрочные сплавы различных марок, специальные криогенные сплавы и другие материалы. Производить обработку резанием (в основном фрезерование) заготовок из таких материалов затруднительно, а в большинстве случаев и невозможно, что связано с большой сложностью формы межлопаточных каналов, и весьма низкой обрабатываемостью применяемых материалов на основе титана, никеля и т.п., поэтому электроэрозионная обработка остается единственно возможным способом изготовления таких деталей. Чаще всего каналы в приведенных деталях имеют переменные углы закрутки, различные радиусы сопряжений вдоль обрабатываемых поверхностей, глухие полости и т.п. Для выполнения обработки на электроэрозионных станках последние должны быть укомплектованы приспособлениями (столами), допускающими поворот заготовки относительно шпинделя станка, причем шпиндель также должен иметь возможность поворота относительно координатных направлений (станки с одновременным 6 – 8 координатным управлением). Заготовка устанавливается на поворотном столе и ее положение относительно ЭИ выверяется с помощью измерительного цикла. Затем проводится обработка одного межлопаточного канала фасонным электродом-инструментом и производится поворот заготовки для обработки очередной полости. Фасонная поверхность образуется за счет копирования формы ЭИ сложного профиля либо получается за счет сочетания движений, которые выполняют в пространстве относительно друг друга заготовка и электрод-инструмент простой формы. При использовании электроэрозионной обработки удается получить цельные колеса, которые способны выдерживать высокие скорости, развиваемые в турбинах и компрессорах. Производительность электроэрозионной обработки весьма сильно зависит от технического уровня применяемого оборудования. Эффективность современных станков для изготовления межлопаточных каналов в ряде случаев в 10 – 15 раз превосходит производительность копировально-прошивочных станков предыдущих поколений.

2.12.3. ПРОШИВОЧНАЯ ОБРАБОТКА ЩЕЛЕЙ, ПАЗОВ, ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

В некоторых деталях требуется изготавливать узкие щели, обработку которых фрезерованием или другими способами резания получить невозможно. Электроэрозионной обработкой прошиваются щели шириной 0,8 – 1 мм и длиной 100 мм и более на глубину 40 – 70 мм. Щели могут иметь переменное сечение по длине. В качестве обрабатываемого материала используют как закаленные конструкционные, так и жаропрочные сплавы, коррозионно-стойкие стали и т.п. Для формообразования щелей необходимо использовать черновые и чистовые электроды-инструменты. Причем профиль черновых электродов можно выполнить с отклонением его формы от профиля полости. Рабочая часть повторяет профиль углубления. Далее электрод-инструмент выполняют с занижением от рабочего торца к хвостовой его части, что улучшает условия удаления продуктов эрозии через боковой зазор между электродами. Если имеется возможность, в ЭИ выполняют отверстия для прокачки рабочей жидкости. При обработке круглых отверстий широкого диапазона диаметров (от 0,03 до 8 мм) используют трубчатые электроды-инструменты, через отверстие которых прокачивают рабочую жидкость. Электрод-инструмент при обработке вращают, что повышает точность прошиваемого отверстия. Из-за отсутствия усилий, действующих на ЭИ, устраняется искривление осей отверстий, что позволяет снизить брак в деталях, который при сверлении достигает 40%. При прошивании некруглых отверстий ЭИ имеет грибообразную форму. Утолщение выполняют на рабочем торце электрода-инструмента. В качестве электродного материала используется медь. При прошивании используется релаксация ЭИ или вибрации с небольшой частотой. Для прошивания глубоких отверстий используют прокачку через ЭИ и периодически выводят его из зоны обработки для промывки обрабатываемого участка. Релаксации ЭИ выполняются чаще всего автоматически.

В некоторых случаях появляется необходимость получить отверстия с криволинейной осью. Механической обработкой такие отверстия получают сверлением прямолинейных участков и их соединением технологическими отверстиями, концы которых закрывают при сборке заглушками. Конструктивно такие детали нетехнологичны, снижается их прочность, кроме этого необходимо принимать меры по герметизации заглушенных участков отверстий. При выполнении обработки на электроэрозионных станках используют электрод-инструмент с криволинейной осью и прошивают им канал из одного отверстия в другое. Электрод-инструмент при обработке должен получать угловую подачу. Необходимо, чтобы жесткость ЭИ была достаточ-

ной для предотвращения касания между его боковыми поверхностями и стенками обработанной части отверстия. В качестве материала для изготовления ЭИ следует использовать медные сплавы и медно-вольфрамовые композиции.

Электроэрозионная обработка незаменима при изготовлении тонкостенных деталей и обработке отверстий различного профиля в них. Такие детали механообработкой изготовить весьма затруднительно, т.к. они деформируются под действием сил резания. На краях механически обработанных отверстий образуются заусенцы. При электроэрозионной обработке одновременно может быть обработано большое количество отверстий, причем в нежестких деталях. Производительность обработки деталей из жаропрочных, нержавеющих и других труднообрабатываемых материалов по сравнению с механической обработкой возрастает многократно. Отверстия щелевидной и других форм обрабатываются электродами соответствующей формы из меди или графита.

В большом числе деталей приходится обрабатывать отверстия, которые соединяют отдельные полости. Такие отверстия обычно невозможно изготавливать металлорежущими инструментами вследствие недоступности места обработки, приходится выполнять детали разъемными, усложняется процесс их обработки и сборки, уменьшается прочность, жесткость и, как следствие, эксплуатационные характеристики. Электроэрозионной обработкой можно обрабатывать каналы различного сечения и располагать их в самых труднодоступных местах. В результате имеется возможность изготовить детали с такими каналами более компактными.

2.12.4. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Детали из твердых сплавов применяются достаточно широко в различных областях техники, несмотря на то, что стоимость изготовления твердосплавных штампов выше стоимости штампов из закаленных сталей. Твердосплавные штампы рентабельны, если программа выпуска мелких деталей из тонколистового материала (менее 1 мм) превышает 500 тыс. штук. В других случаях детали штампов выполняют составными, используя твердосплавные в качестве вставок.

Электроэрозионной обработкой получают матрицы и пуансоны вырубных, высадочных и вытяжных штампов, фильеры для волочения различных профилей, режущую часть инструментов и т.д.

Электроэрозионная обработка заготовок обеспечивает скорость съема материала до $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$. При обработке можно получить поверхности практически любой сложности, как на прошивочных, так и вырезных станках. Величина рабочего тока при обработке не превышает 50А, поскольку при больших значениях в поверх-

ностном слое возможно образование трещин. Режимы электроэрозионной обработки рассчитывают исходя из условия отсутствия в поверхностном слое микротрещин. Как правило, выполняют черновую обработку последовательным переходом через ряд ступеней режимов, а затем используют ряд ступеней режимов в высокочастотном диапазоне для чистовой обработки поверхностей. Для доводки используют специальные режимы работы генераторов импульсов. Такие режимы позволяют устранить выпадение кобальта как связки из твердого сплава при вырезной обработке заготовок в водном диэлектрике. Повышение точности и качества обработки поверхностей твердосплавных деталей после электроэрозионной доводки дает существенную экономическую выгоду по сравнению с деталями из закаленных сталей. Стойкость изделий из твердых сплавов выше по сравнению с изделиями из закаленных сталей в 200 и более раз.

2.12.5. КЛЕЙМЕНИЕ И ГРАВИРОВАНИЕ. ИСПРАВЛЕНИЕ БРАКА В ДЕТАЛЯХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Клеймение и гравирование используют для нанесения информации на детали различного назначения, например, на детали литевых форм, в которых отливаются изделия из пластмасс. Нанесение знаков на закаленные металлические и твердосплавные поверхности с помощью клейм невозможно. Клеймение с помощью электроэрозионной обработки позволяет получить высокое качество наносимой информации, затрачивая на ее нанесение минимальное время. Глубина наносимых знаков не превышает обычно 0,8 – 1 мм. В последнее время вместо надписи различного назначения на деталях выполняют не в виде углублений, а выпуклыми. Трудоемкость электроэрозионной обработки таких участков деталей по сравнению с механическими методами сокращается многократно. Для повышения производительности процесса электроды собирают в кассету и всю информацию наносят одновременно. При гравировании на поверхность заготовки наносят более глубокий рисунок сложного профиля, чем при маркировании. Наряду с электроэрозионной обработкой такой вид работ проводят с помощью высокоскоростных методов фрезерования. Однако фрезерование имеет ограничения и не позволяет проводить обработку в труднодоступных для режущего инструмента местах. Для электроэрозионной обработки могут применяться электроды-инструменты простой формы, перемещаемые по пространственной траектории. При обработке необходимо учитывать износ электродов-инструментов.

Возможность обработки закаленных сталей и других твердых материалов позволяют использовать метод электрической эрозии для доводки уже готовых деталей

штампов и другой оснастки, когда после получения пробных деталей штамповкой, прессованием, литьем под давлением и т.д. обнаруживаются какие-либо недостатки. Внести изменения в детали оснастки можно, не прибегая к операциям термической их обработки, например, отжигу. При этом экономится значительное время, поскольку отпадает необходимость изготовления новых деталей. Такое же практическое значение имеет исправление брака, когда в практически готовых деталях остаются сломанные части инструментов (сверл, метчиков, разверток и т.п.) и крепежных деталей (болтов, шпилек, штифтов). Для удаления обломков используют метод прямого копирования. Электрод-инструмент изготавливают из меди, латуни или алюминиевых сплавов. Форма ЭИ определяется характером выполняемых работ. При удалении обломков метчиков, разверток, сверл диаметр ЭИ должен быть больше сердцевины металлорежущего инструмента. Обработку проводят на грубых режимах, обеспечивая тем самым скоростное удаление сердцевины, а остатки инструмента затем легко удаляются вручную. При удалении остатков сломанных деталей крепления в них прошивают квадратное или шестигранное углубление. И используют его для установки ключа, с помощью которого из отверстия извлекается сломанная крепежная деталь. Так удастся закончить обработку практически готовой детали. Экономическая эффективность приведенных операций чрезвычайно велика, поскольку стоимость штамповой и литейной оснастки исчисляется миллионами рублей.

ЛИТЕРАТУРА

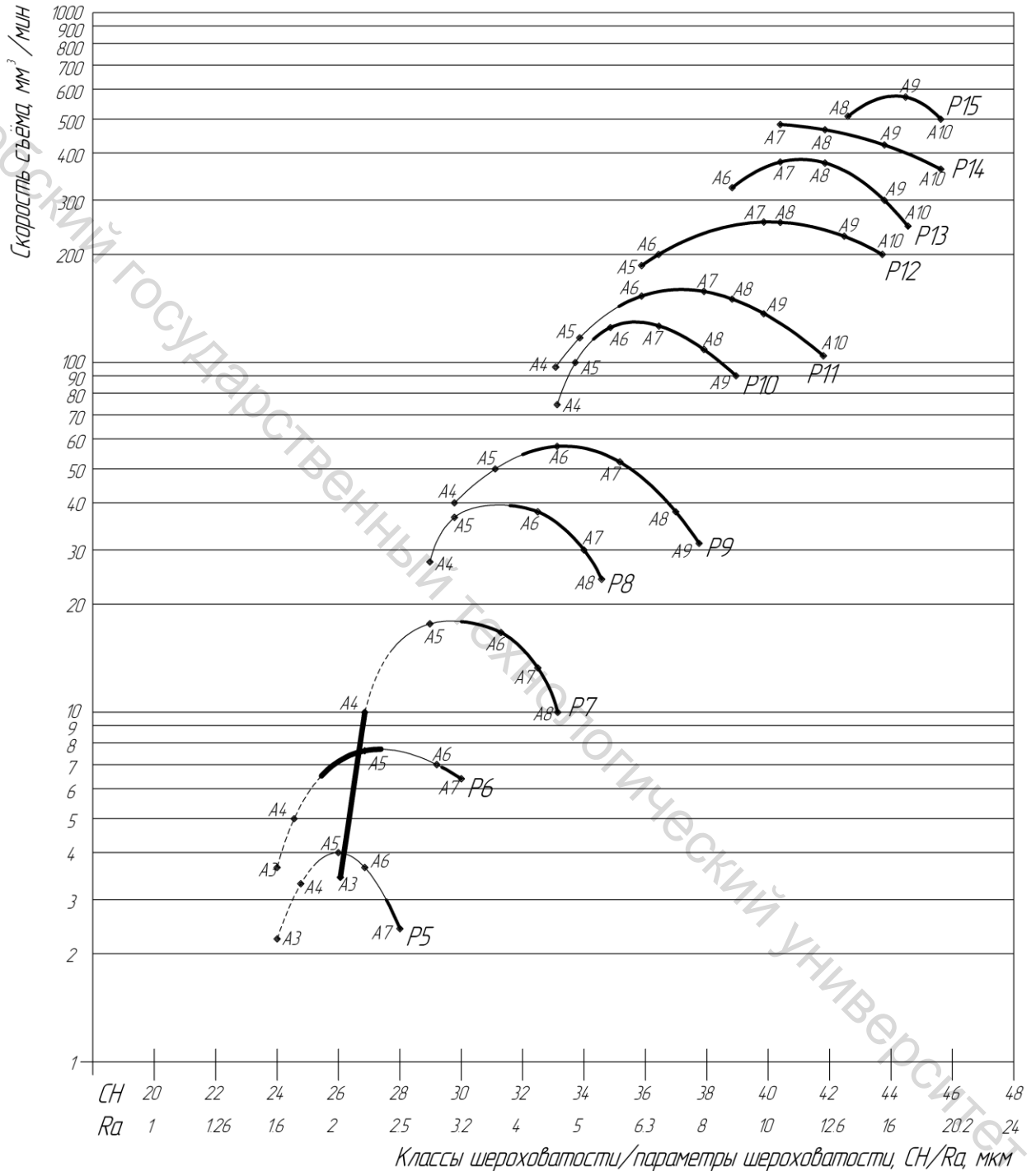
1. ГОСТ 25331 – 82. Обработка электроэрозионная. Термины и определения. – Введен 1983–01–07. – Москва : Издательство стандартов, 1982. – 11 с.
2. ГОСТ 3.1109 – 82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. (СТ СЭВ 2064-79, СТ СЭВ 2522-80, СТ СЭВ 2523-80). – Взамен ГОСТ 3.1109–73 ; введ. 1983–01–01. – Москва : Издательство стандартов, 1985. – 18 с.
3. Электроимпульсная обработка металлов / под ред. А. П. Владзиевского. – Москва : ЦИНТИМАШ, 1960.
4. Электроимпульсная обработка металлов / А. Л. Лившиц [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1967. – 295 с.
5. Эвакуация продуктов эрозии при электроэрозионной обработке / И. Л. Лившиц [и др.] ; под общей ред. А. Л. Лившица. – Москва : ЭНИМС, 1970. – 128 с.
6. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие. В 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / Б. А. Артамонов [и др.] ; под ред. В. П. Смоленцева. – Москва : Высш. шк., 1983. – 247 с.
7. Попилов, Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов : справочник / Л. Я. Попилов. – Москва : Машиностроение, 1982. – 399 с.
8. Левинсон, Е.М. Электроэрозионная обработка: справочное пособие по электротехнологии / Е. М. Левинсон, В. С. Лев. – Ленинград : Лениздат, 1972. – 326 с.
9. Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич [и др.] ; под ред. И. Г. Некрашевича. – Минск : Наука и техника, 1988. – 216 с.
10. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И. И. Сафонов [и др.] ; под ред. Н. Н. Дорошкина. – Кишинев : Stiinta, 1999. – 592 с.
11. Кохановская, Т. С. К вопросу о линейном сервоприводе / Т. С. Кохановская // ИТО. – 2000. – № 3.
12. Серебrenицкий, П. П. Общетехнический справочник / П. П. Серебrenицкий. – Санкт-Петербург : Политехника, 2004. – 445 с.: ил. – (Серия : В помощь технологумашиностроителю. Выпуск 1).
13. Серебrenицкий, П. П. Линейные двигатели нового поколения / П. П. Серебrenицкий // Двигатель. – 2000. – № 3.

14. Машиностроение : энциклопедия в сорока томах. Раздел III. Технология производства машин. Том III-3. Технология изготовления деталей машин / под ред. акад. А. Г. Сулова. – Москва : Машиностроение, 2002. – 840 с.
15. Технологическая инструкция к электроэрозионному копировально-прошивочному станку по работе с генератором ШГИ-40-440М / ТИ ШГИ-40-440-01Т // Приложение справочное. – Москва : ЭНИМС, 1985. – 69 с.
16. Воронин, А. Ю. Линейные двигатели фирмы «Siemens» / А. Ю. Воронин // ИТО – Металлообработка, 2001. – с. 2.
17. AGIE: Опыт наших клиентов/ №17, Начало XXI века. – AGIE AG. CH-6616. LOSONE. – 40 с.
18. Roboform 100-200-400. Gebrauch der Technologietabellen/ Charmilles Technologies. – LOSONE, Imprimé en Suisse, 4 913 550/ 5.90. – 4 s.
19. Roboform 100-200-400. Fein grafit/ Stahl – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
20. Roboform 100-200-400. Kupfer/ Stahl – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
21. Roboform 100-200-400. Kupfer/ Messing – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
22. Roboform 100-200-400. Stahl/ Stahl – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
23. Roboform 100-200-400. Fein grafit/ Titan – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
24. Roboform 100-200-400. Wolframkupfer/ Hartmetall – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
25. Roboform 100-200-400. Grafit/ Stahl – Technologie. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
26. Roboform 100-200-400. Grafit/ Stahl und Kupfer/ Stahl – Technologie. Microfin-Glanzbearbeitung-Hochglanzbearbeitung. – Charmilles Technologies: LOSONE, Imprimé in Suisse, 6.89. – 4 s.
27. Pocket guide/ Robofil. – Charmilles Technologies S.A.: Printed in Switzerland, 12.86.E. – 26 s.
28. Fine Sodick / Проволочно-вырезные станки с линейными сервоприводами : прайс-лист. – Москва : СодикоМ, 2004. – 2 с.
29. Fine Sodick / Электроискровые координатно-прошивочные станки с линейными сервоприводами : прайс-лист. – Москва : СодикоМ, 2004. – 2 с.

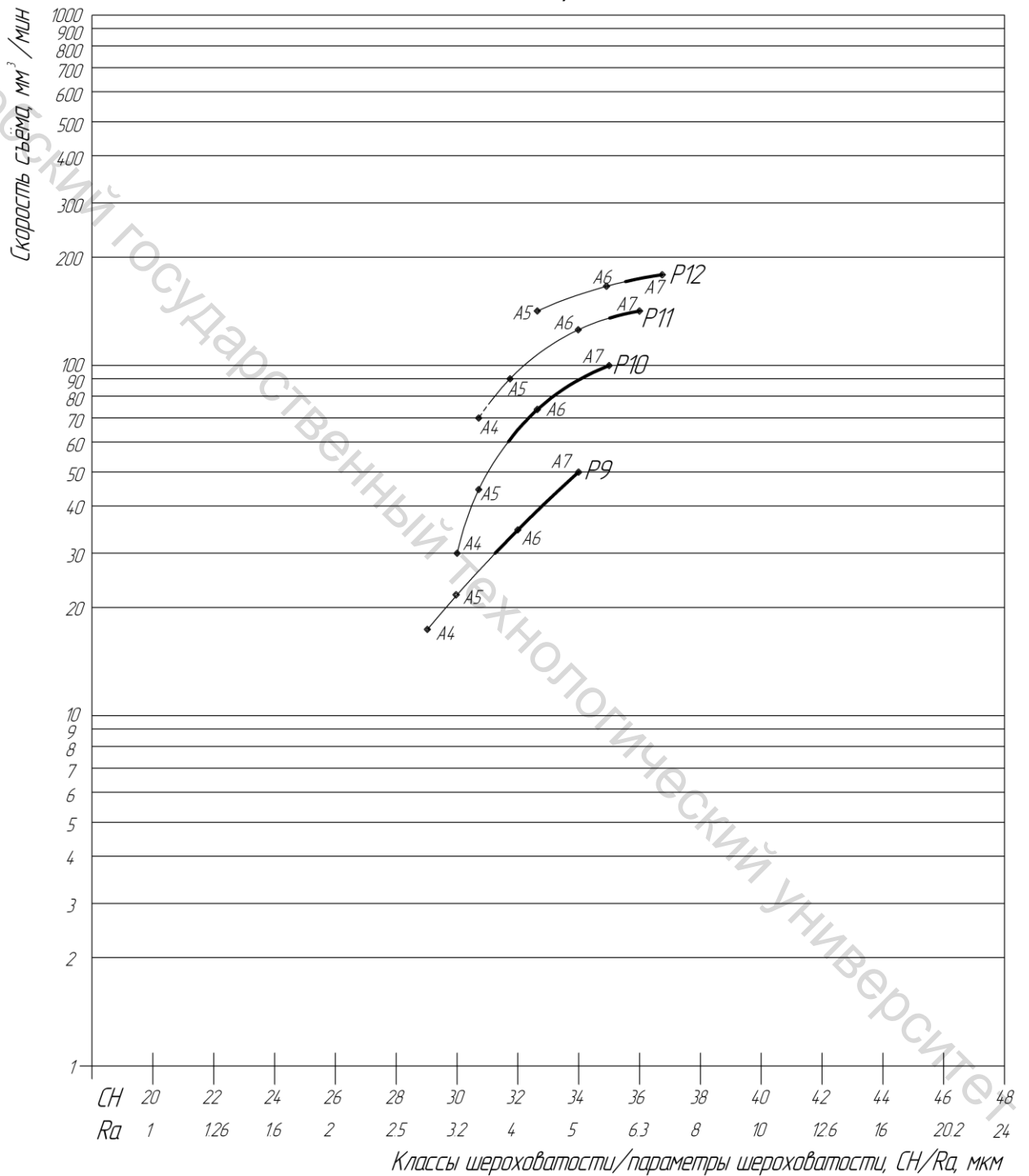
30. Электроэрозионное оборудование мирового лидера из Японии Sodick Co., LTD/ Техническая информация. – Москва : ИТС, 1995. – 8 с.
31. Электроэрозионное оборудование мирового лидера из Японии Sodick Co., LTD/ Техническая информация. – Москва : SodicoM, 2004 – 20 с.
32. Каталог Интернет фирмы Sodick Co. Ltd., Япония ; Московский центр, [Электронный ресурс] : Режим доступа : <http://www.sodick-euro.ru>.
33. System 3R International AB, Sorterartan I, S-162, 50 Vallingby. – Каталог оснастки/ Использование столов-спутников с базовыми/опорными системами. – 55 с.
34. System 3R International AB, Sorterartan I, S-162, 50 Vallingby. – Каталог оснастки/ Базовые/опорные системы для электроэрозионных вырезных станков. – 46 с.
35. System 3R International AB, Sorterartan I, S-162, 50 Vallingby. – Каталог оснастки/ Базовые/опорные системы для электроэрозионной обработки штампов. – 82 с.
36. General Catalog 2002. EROWA AG. 1065-0/ e /4000/12.02./ . – Каталог оснастки, измерительных машин и приспособлений. – 245 с.
37. Политехнический словарь : большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. Ю. Ишлинский. – Москва : Изд-во «Большая Российская энциклопедия», 2000. – 656 с.
38. Mitsubishi Carbide/ Miracle Engineering Europe LTD. – Mitsubishi Materials Kobe Tools, 2001 // Каталог инструментов для высокоскоростной обработки и режимов резания [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прог. (715 581 630 байт). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Заглавие с этикетки диска. – Текст парал. рус., англ.

ПРИЛОЖЕНИЕ

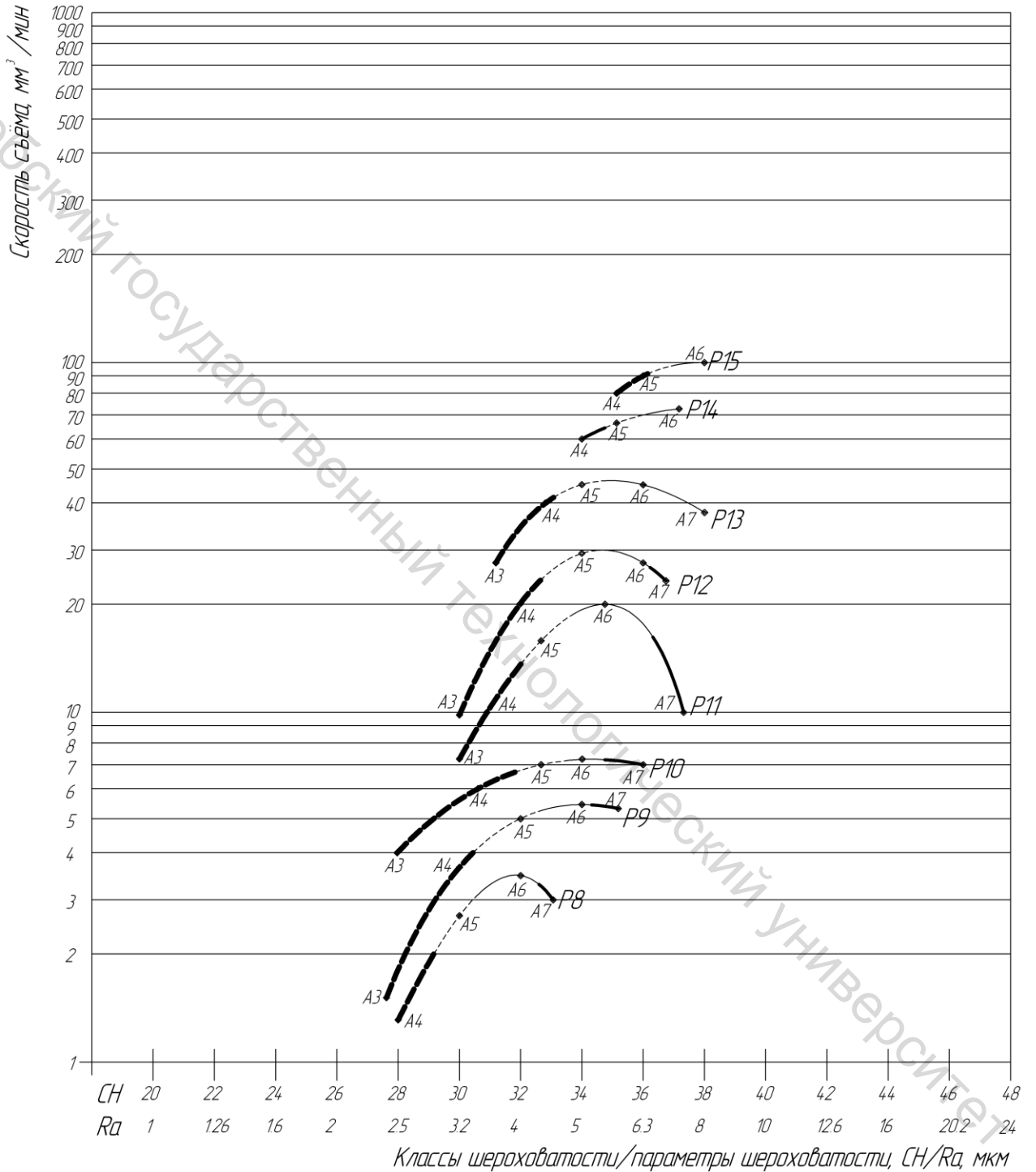
Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из сталей электродами-инструментами из графита (при токе не более 130А; P – ступень тока, A – длительность импульса)



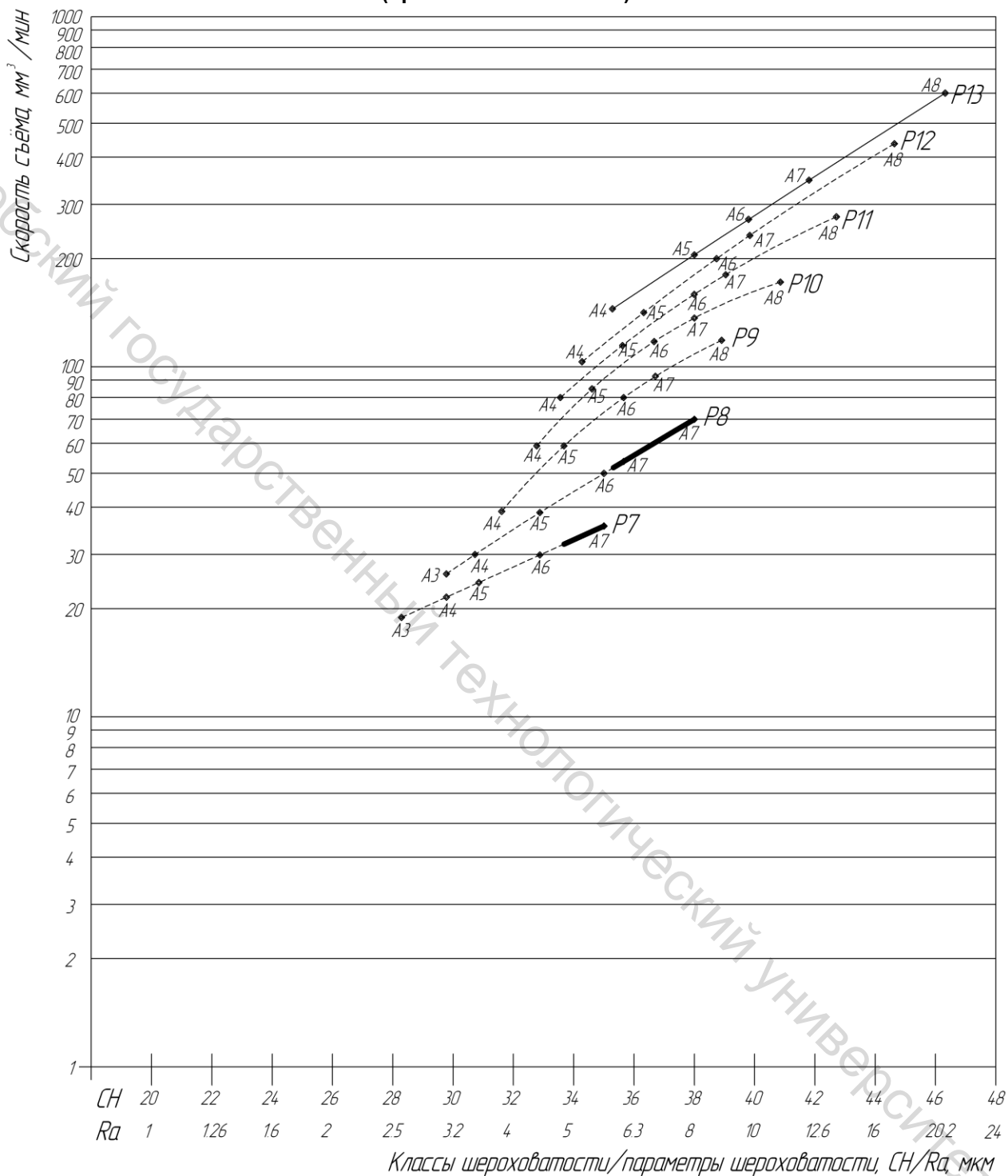
Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из медных сплавов электродами-инструментами из меди (при токе не более 50А)



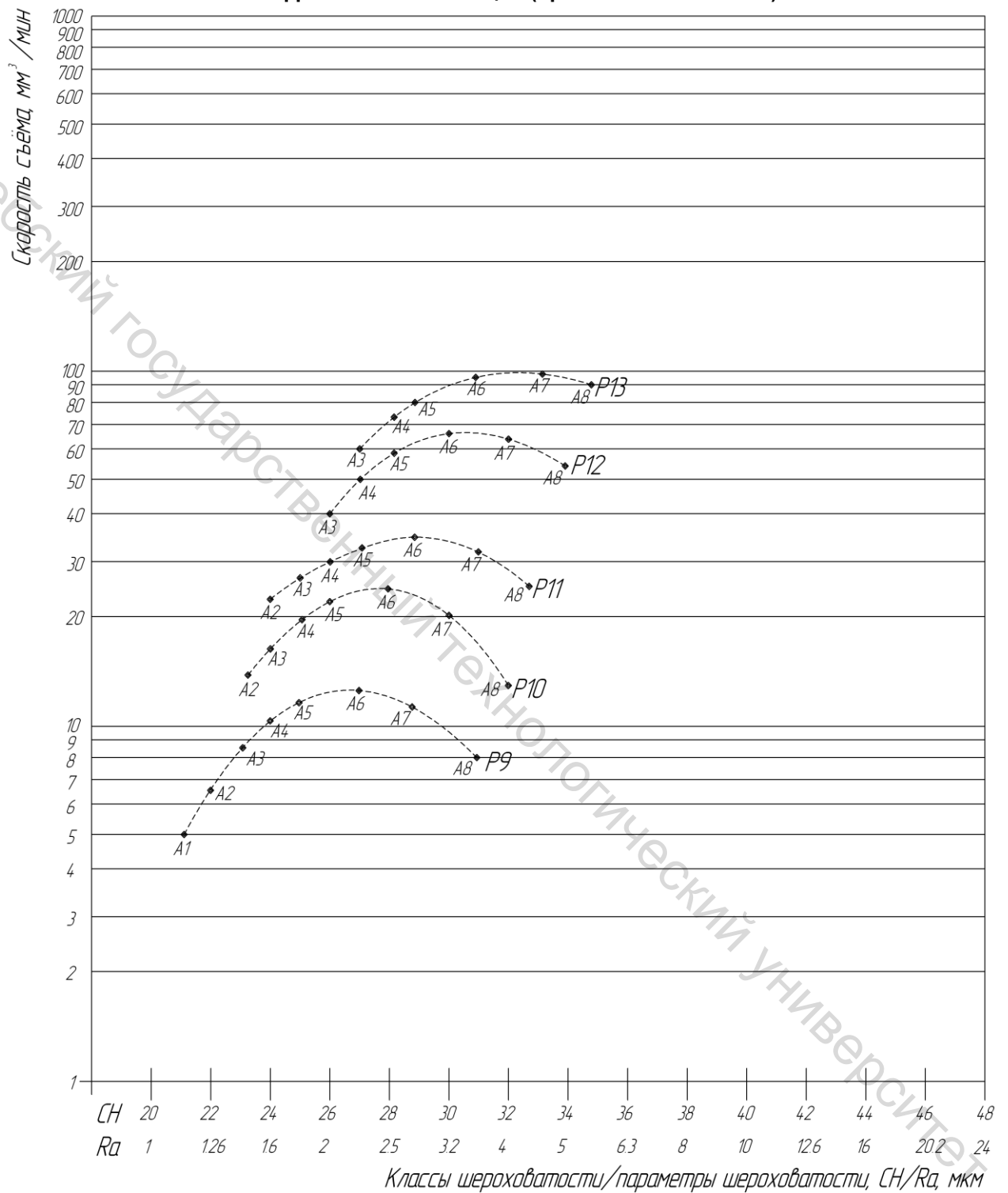
Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из стали электродами-инструментами из стали (при токе не более 130А)



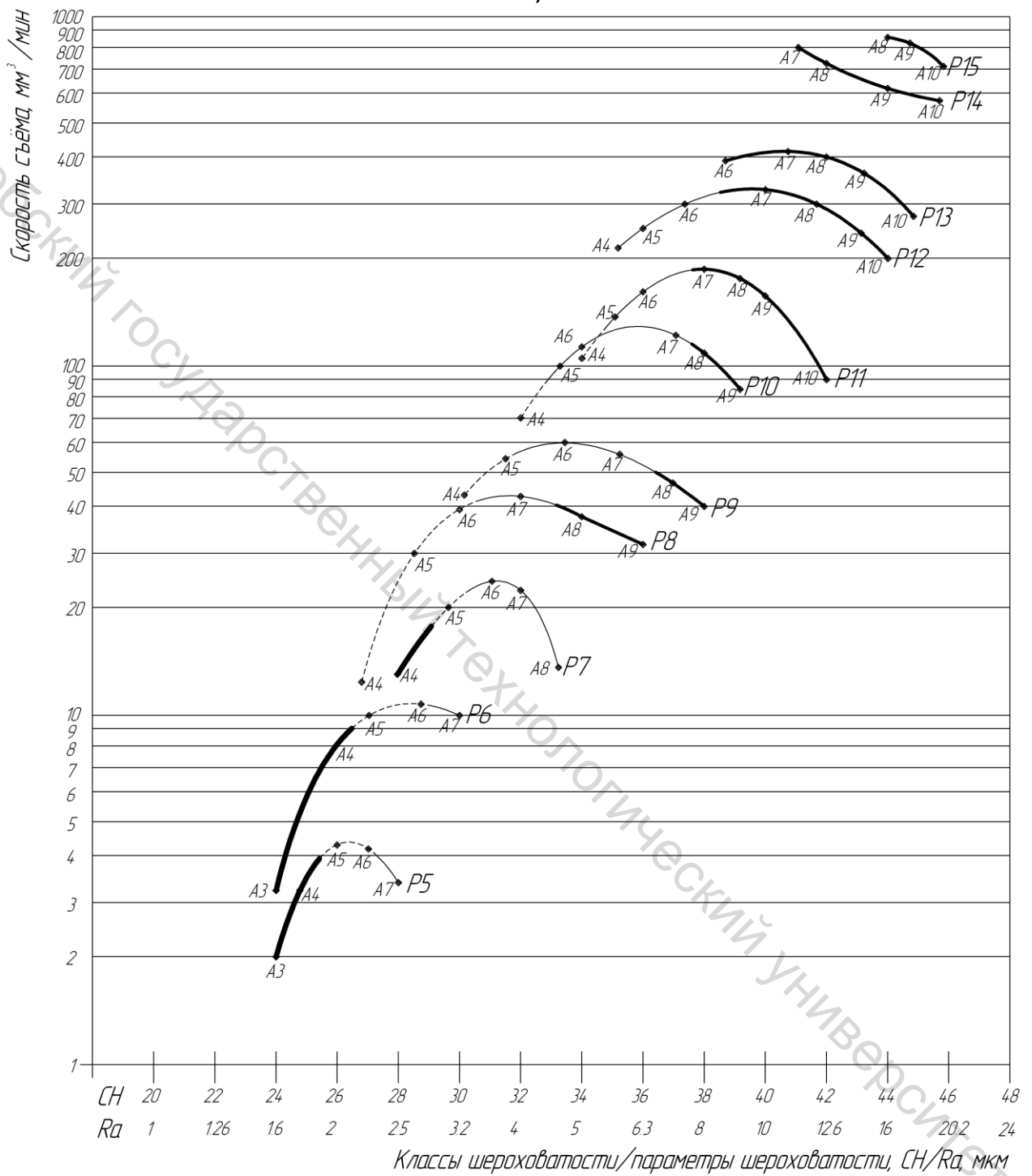
Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из титана электродами-инструментами из мелкодисперсного графита (при токе не более 65А)



Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из твердых сплавов электродами-инструментами из медно-вольфрамовых композиций (при токе не более 65А)



Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из стали электродами-инструментами из графита (при токе не более 130А)



Зависимости скорости съема от режимов и параметров шероховатости поверхности при обработке заготовок из стали электродами-инструментами из меди (при токе не более 100А)

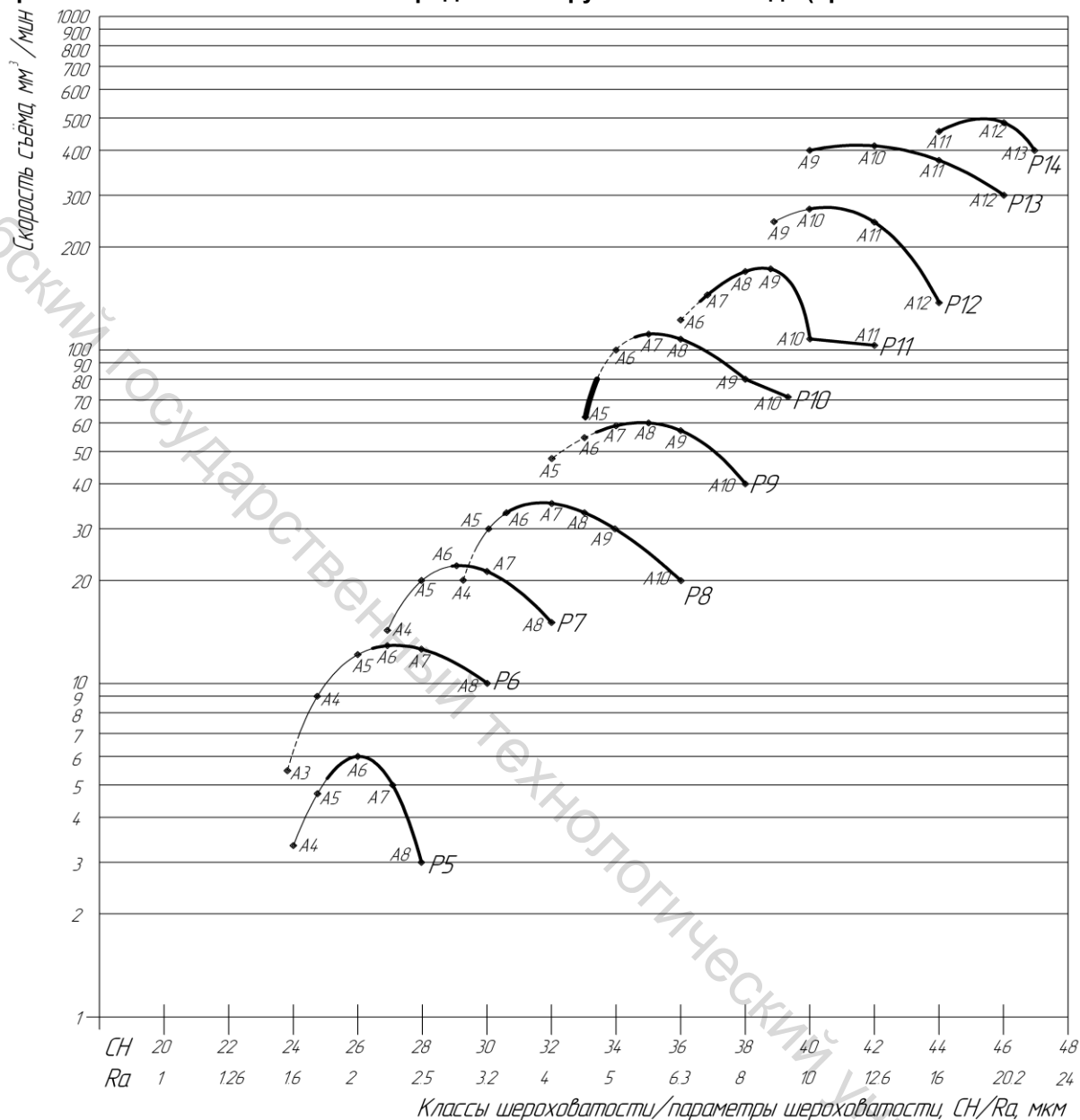


Таблица для определения по диаграммам величины износа электродов-инструментов при обработке различных материалов (для соответствующих режимов обработки)

—————	≤2,5%
_____	≤10%
-----	≤25%
—————	≤50%
—————	≤100%

Состав G-функций, определяющих основные действия системы ЧПУ

Таблица 1

№ п/п	Код	Функция	Выполняемое действие
1.	G00	Позиционирование	Перемещение на быстром ходу в точку с заданными координатами X, Y, Z
2.	G01	Линейная интерполяция	Перемещение с запрограммированной скоростью по линии к точке, заданной координатами X, Y
3.	G02	Круговая интерполяция (движение по часовой стрелке)	Перемещение по окружности, либо дуге окружности по часовой стрелке к точке с координатами X, Y. Здесь указываются также координаты i, j центра дуги относительно начальной точки
4.	G03	Круговая интерполяция (движение против часовой стрелки)	То же, что и п.3 для движения по часовой стрелке
5.	G04	Пауза	Задержка в отработке программы на заданное время: в миллисекундах (мс – K) или в секундах (сек – L)
6.	G10	Переход к подпрограмме	Осуществляется переход к подпрограмме P на номер кадра перехода. Глубина вложения до 3-х
7.	G11	Возврат из подпрограммы	При данной функции осуществляется возврат к выполнению управляющей программы
8.	G12	Безусловный переход	Происходит переход к кадру P с трехзначным номером кадра перехода
9.	G21	Отработка с углом поворота	Угол поворота задается параметрами в градусах, минутах, секундах
10.	G22	Отмена угла	Происходит отмена заданного угла поворота
11.	G23	Засылка константы в параметр (P)	В строке программы вначале указывается номер параметра и константа, засылаемая в данный параметр
12.	G24	Сложение параметров (Pi)	Происходит сложение параметров и результат записывается в последний из указанных параметров
13.	G27	Повтор в программе	Данная функция обеспечивает выполнение одного и того же участка контура в программе от номера начального кадра повтора по числу указанных повторов
14.	G31	Сложение параметров угла	Сложение параметра с постоянным параметром угла поворота P ₀ , P ₁ , P ₂ в шестидесятеричной системе. Градус, минута, секунда берутся в прилежащих по счету параметрах.
15.	G32	Вычитание параметров угла	Вычитание параметра из параметра с шестидесятеричной коррекцией. В строке указывается номер параметра, указывающего на модификатор. Градус, минута, секунда берутся в прилежащих по счету параметрах
16.	G40	Отмена коррекции инструмента	Перемещение к точке с указанными в строке координатами (X, Y)
17.	G41	Коррекция инструмента левая	Перемещение к точке с указанными координатами с учетом величины коррекции влево относительно направления движения (X, Y). При этом величина коррекции задается пометкой (k), определяемой параметром 0 – 09
18.	G42	Коррекция инструмента правая	То же, что и в п.17, но вправо относительно направления движения
19.	G71	Агрегатирование	Установка сигнала агрегатирования. При отсутствии ответа осуществляется переход на кадр, указанный в параметре P данной строки
20.	G72	Условный переход по сигналу агрегатирования	Прием сигнала агрегатирования и переход на адрес в параметре P данной строки, если нет ответа

21.	G90	Абсолютный размер	Отсчет перемещения производится от нулевой точки
22.	G91	Размер в приращениях	Отсчет перемещения производится относительно предыдущей запрограммированной точки
23.	G92	Установка абсолютных накопителей положения	Используется для измерения состояния абсолютных накопителей положения (X, Y, Z)

Состав M-функций для управления генераторами импульсов и приводами станков

Таблица 2

№ п/п	Код	Функция	Содержание
1.	M00	Программируемый останов	Останов обработки детали. Продолжение обработки осуществляется нажатием кнопки "Пуск"
2.	M32...M36	Управление генератором импульсов	Включение заданной частоты генератора импульсов (8; 22; 44; 88; 200 кГц)
3.	M42...M45	Управление генератором импульсов	Включение токов заданного режима (1...4 и т.д.)
4.	M54	Управление генератором импульсов	Подключение генератора к нагрузке
5.	M40	Управление генератором импульсов	Отключение генератора от нагрузки
6.	M52	Управление станком	Включение подъема ванны
7.	M53	Управление станком	Включение перемотки проволоки
8.	M63	Управление станком	Включение устройства адаптивного управления
9.	M64	Управление станком	Включение устройства контроля касания
10.	M65	Управление станком	Включение деионизационной системы
11.	M60	Управление станком	Отмена команды M64
12.	M66	Управление станком	Включение устройства переключения координат
13.	M50	Управление станком	Отмена команды M66
14.	M02	Управление программой	Конец программы, а также отмена команд M52; M54; M63; M65 - M66
15.	M97	Управление станком	Включение насоса наполнения ванны (промывки)
16.	M90	Управление станком	Отмена команды M97
17.	M70	Управление станком	Выдача сигнала технологический выход №1
18.	M71	Управление станком	Отмена команды M70
19.	M72	Управление станком	Технологический выход №2
20.	M73	Управление станком	Отмена команды M72
21.	M74	Управление станком	Технологический выход № 3
22.	M75	Управление станком	Отмена команды M74

Учебное издание

Савицкий Василий Васильевич

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Редактор Матвеева Н.Н.

Технический редактор Пятов В.В.

Корректор Покатович Т. К.

Компьютерная верстка Матвеева Н.Н.

Подписано в печать 08.08.06 Формат 60x84/16 Бумага офсетная №1

Усл. печ.л. 17,2 Уч.-изд.лист. 14,0 Тираж 100 экз. Заказ № 396

Уреждение образования "Витебский государственный технологический университет" Лицензия № 02330/0133005; 210035, Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе Учреждения образования "Витебский государственный технологический университет". Лицензия № 02330/0133005 от 01.04.2004 г.