

А. Л. ЛИВШИЦ, А. Т. КРАВЕЦ,
И. С. РОГАЧЕВ, А. Б. СОСЕНКО

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
Москва 1967

В книге впервые систематизирован и изложен комплекс вопросов, связанных с созданием, разработкой и внедрением технологических процессов и оборудования для электроимпульсной обработки металлов.

Приводится классификация методов размерного формообразования, дается краткая характеристика электрофизических и электрохимических методов размерной обработки.

Рассматриваются физические основы электроимпульсного способа обработки и взаимосвязь его с электроэрозионными методами; освещаются основы расчета и проектирования технологических процессов, типовые технологические процессы, характеристики и конструкции станков, генераторов импульсов, автоматических регуляторов и других средств автоматизации; описываются новый метод и оборудование для вихрекопировальной обработки фасонных электродов-инструментов; определяется место электроимпульсного способа среди других разновидностей электроэрозионной обработки и дана перспектива его развития.

В основу книги положены материалы научно-исследовательских работ, проведенных авторами и коллективами, в которых они работают, а также опыт внедрения электроимпульсного способа в промышленность.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций, технологов и конструкторов машиностроения. Табл. 39, илл. 138, библи. 62.

Рецензенты *канд. техн. наук М. А. Калинин*
и инж. М. С. Камсюк

Электроимпульсный способ размерной обработки металлов и сплавов, несмотря на то, что он был предложен и начал развиваться позже, чем другие разновидности электроэрозионного метода, получил разнообразное применение в машиностроении и металлообработке.

Электроимпульсный способ был создан на стыке различных отраслей науки и техники: физики твердого тела, физики дугового разряда, теплофизики и гидромеханики (физико-технологические основы способа); электротехники и электроники (генераторы импульсов); химии, физической химии (среда обработки, материалы электродов-инструментов); автоматического регулирования и управления (регуляторы зазора, программные и экстремальные); механики (станки и приспособления); технологии (новые технологические процессы изготовления разнообразных деталей).

Электроимпульсная обработка появилась в начале 50-х годов и развивалась на основании ряда предшествовавших работ советских ученых и изобретателей, среди которых следует назвать изобретателей электроискрового способа Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, положивших начало развитию электроэрозионных методов обработки; изобретателя анодно-механического и электрохимического способа В. Н. Гусева; автора тепловой теории эрозионного съема металла Б. Г. Гуткина; изобретателя дугоимпульсного способа М. П. Писаревского; исследователей теории процесса Н. В. Афанасьева, Д. Т. Васильева, А. С. Зингермана, Б. Н. Золотых, Б. А. Красюка, А. И. Круглова, Г. Н. Мещерякова, К. К. Намитокова, И. Г. Некрашевича, Л. С. Палатника, И. С. Стекольников и др; авторов ряда оригинальных разработок В. Ю. Веромана, А. Л. Вишницкого, А. В. Глазкова, А. С. Давыдова, Е. А. Деева, Ф. М. Карамастина, Е. М. Левинсона, В. С. Льва, Б. Н. Лямина, Д. З. Митяшкина, Л. Я. Попилова, Б. И. Ставицкого, Н. К. Фотеева, В. Н. Щепетова и многих других.

Развитие электроимпульсного способа началось с проведения в 1950—1951 гг. в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) и Особом конструкторском бюро электроэрозионного оборудования совместных работ

на созданном там независимом ионитронном генераторе импульсов. Впервые удалось получить при производстве прошивочно-копировальных работ производительность на один порядок выше, чем на любой электроэрозионной установке того периода; во столько же и более раз повысилась стойкость инструмента. С 1952 г., после определения требований к генераторам импульсов,¹ в работу включился Харьковский Политехнический институт им. В. И. Ленина (ХПИ им. Ленина), где впоследствии сосредоточились работы по теории и расчету машинных генераторов, проводившиеся в тесном контакте и на основе физико-технологических исследований ЭНИМСа. Одновременно с этим в ЭНИМСе и ОКБ разрабатывались станки и новые технологические процессы. К 1956—1957 гг. первый этап совместных работ завершился созданием промышленного комплекса «генератор—станок—технология». Завод ХЭМЗ, а затем и Харьковский завод «Электромашина» начали серийное производство машинных генераторов; Троицкий станкостроительный и Ржевский машиностроительный заводы годом позже выпустили первые партии электроимпульсных станков.

Подготовленные на первом этапе комплекс электроимпульсного оборудования на **средние частоты**, и технология были рассчитаны на применение металлических электродов (алюминий, реже — медь). В 1957—1958 гг. ЭНИМСом совместно с одним из электродных заводов был создан и передан в серийное производство специальный высокостойкий материал для инструментов — марки ЭЭГ («электроэрозионный графит»).

Дальнейшее развитие электроимпульсной обработки проходило при творческом участии, помимо упомянутых, также ряда институтов и заводов.

Наряду с внедрением на заводах новой технологии и оборудования продолжалось совершенствование электроимпульсной системы по трем основным направлениям: увеличению предельно достигаемой чистоты поверхности, дальнейшему повышению производительности, снижению износа инструмента.

Работы по первому направлению завершились в 1960—1963 гг. созданием в ЭНИМСе **высокочастотной разновидности электроимпульсной обработки**, позволившей поднять чистоту поверхности с 4-го до 6—7-го классов, разработкой и организацией серийного выпуска (на заводе «Миассэлектроаппарат») электронно-полупроводникового генератора импульсов.

Работы по второму и третьему направлениям, проводившиеся ЭНИМСом и ХПИ им. Ленина, привели к созданию в 1961—1963 гг. **низкочастотной разновидности электроимпульсной обработки** (обработка импульсами большой энергии), позволившей повысить максимальную производительность примерно в 4 раза, а износ инструмента снизить с десятых до сотых долей процента. С 1965 г. выпуск низкочастотных магнитонасыщенных генераторов освоил Мараликский завод магнитных усилителей. На основе импульсов боль-

шой энергии созданы в ЭНИМСе и ОКБ тяжелые электроимпульсные станки для обработки многотонных штампов.

В 1960—1964 гг. в ЭНИМСе был разработан новый метод механической обработки фасонных деталей из графитированных и им подобных материалов, получивший название **метода вихревого копирования**. Этот метод и созданный на его основе вихре-копировальный станок позволили повысить в десятки раз производительность при изготовлении фасонных электродов-инструментов и почти исключить ручной труд.

Таким образом, к настоящему времени выполнены работы по созданию физико-технологических основ, ряда технологических процессов и оборудования для осуществления электроимпульсной обработки в низко-, средне- и высокочастотном диапазонах с использованием во всех диапазонах графитированного материала ЭЭГ и оборудования для изготовления из этого материала фасонных электродов.

Для выполнения всех разнообразных технологических операций разработано более двух десятков моделей универсальных и специальных станков, в том числе гамма универсальных копировально-прошивочных станков пяти типоразмеров.

Из приведенных данных нельзя сделать вывод о полной завершенности работ по электроимпульсной системе. Помимо постоянных проблем повышения производительности, точности и качества поверхности, стоящих перед всеми методами размерного формообразования, имеется ряд специфических проблем, находящихся на различных стадиях разработки, исследования и внедрения. Сюда относятся создание *широкодиапазонных генераторов*, обеспечивающих близкий к нулевому износ инструмента (в том числе и металлического) во всем диапазоне частот, создание «автоматического технолога», превращающего универсальный станок в полуавтоматический, разработка новых типовых и комплексных технологических процессов, в частности, изготовления стальных вырубных штампов, специального и универсального оборудования и приспособлений и многое другое.

Становление электроимпульсного способа проходило в обстановке дискуссий, нашедших отражение на конференциях и в литературе. Предметом дискуссий являлись вопросы о возможности использования для размерной обработки дуговой формы электрического разряда, о наличии зависимости скорости съема от площади и о правомерности выделения электроимпульсного способа в самостоятельную разновидность электроэрозионного метода. Электрическая дуга в течение четырех лет после работ М. П. Писаревского не привлекала внимания специалистов, возможно, потому, что ее использование в дугоимпульсной обработке повлекло за собой одновременно со снижением износа резкое, более чем на один порядок, уменьшение производительности. Некоторые же специалисты и после получения на электроимпульсных

станках качественно совершенно иных результатов продолжали утверждать о бесперспективности использования дуги и самого способа. Отражением этой позиции, очевидно, и явились терминологические споры. Электроимпульсные станки составляют в настоящее время свыше одной трети всего парка электрофизических и электрохимических станков. В 1963 г. была продана во Францию лицензия на производство электроимпульсной системы, состоящей из станков, генераторов импульсов в диапазоне средних и высоких частот, графитированного материала ЭЭГ, вихрекопировального станка и устройств регулирования. По этой лицензии французская фирма ЮЗЕМ уже наладила выпуск оборудования. В США, Англии, ФРГ, Швейцарии, Японии, Польше, ЧССР и других странах также начался выпуск электроимпульсных станков.

Необходимо отметить большую роль и творческое участие в выборе принципиальных направлений развития и создании основ новой отрасли станкостроения Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР проф., докт. техн. наук А. П. Владзиевского, проф., докт. техн. наук В. С. Васильева, проф. А. Е. Прокоповича, проф. М. Ф. Семко, инж. А. М. Гуллера, А. А. Лысова, С. С. Подлазова, И. А. Хавхало и др. В создании станков, технологических процессов, генераторов импульсов, устройств автоматизации, материала электродов и внедрении на заводах принимали активное участие инженеры А. И. Аронов, Ю. В. Астахов, Э. А. Анненберг, Г. К. Банников, С. Я. Бейлин, Н. И. Блитштейн, Г. Г. Бруско, М. И. Бурда, М. Ш. Гершман, М. О. Гершойг, Г. Б. Дейч, В. В. Евсеев, В. А. Евдокимова, Р. Б. Исакова, С. И. Коминар, П. Е. Курочкин, В. И. Курченко, А. М. Лежнев, Л. Я. Мачихин, И. А. Маслов, Л. И. Меднис, Б. Х. Мечетнер, М. Ш. Отто, Л. Д. Перчик, В. Е. Полоцкий, А. М. Сигарев, В. Н. Соловов, А. И. Титов, А. М. Ткаченко, А. А. Устьянцев, Д. Ф. Яхимович и многие другие. Авторы отмечают большую роль в организации серийного производства машинных генераторов импульсов проф. Н. И. Борисенко, инж. А. И. Якунина и инж. Ю. Г. Борзяка.

Настоящая монография является первой попыткой охватить и систематизировать весь комплекс вопросов, связанных с электроимпульсной обработкой, и авторы с благодарностью примут замечания и предложения, которые могут возникнуть у читателей при работе с книгой.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И СПОСОБОВ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Технический прогресс в материалообработке заключается в совершенствовании классических методов обработки давлением, резанием, литьем и непрерывном пополнении их новыми процессами размерного формообразования. Эти процессы, как правило, характерны скачкообразным изменением тех или иных выходных технологических характеристик.

В связи с тем, что новые процессы обладают необычными свойствами, оригинальны по исполнению и используют ранее не применявшиеся для этих целей виды энергии и энергоносители, их выделяют обычно в отдельную группу. Вместе с тем, более углубленный анализ обнаруживает внутренние связи и некоторые закономерности, общие для всех процессов формообразования.

Вскрытию этой общности, как и различий, будет способствовать разумно построенная единая классификация процессов размерной обработки твердых тел. Классификация должна помогать находить новые комбинации определяющих признаков и описывать некоторые свойства еще не открытых способов обработки. Понимая всю сложность создания такой системы, мы лишь делаем попытку отобрать и систематизировать необходимые в математическом смысле признаки, применив для этого известные методы цифровой индексации. Такая система позволяет относительно просто осуществлять отбор признаков для анализа, при разработке новых вариантов процессов, для выбора направлений поисковых исследований, систематизации разнообразных сведений, свойств и особенностей различных способов обработки.

Классификационные признаки (табл. 1) разбиты на 11 групп, каждая из которых содержит от трех до десяти признаков.

Г р у п п а 0 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к обрабатываемому объекту, например, тепловую энергию при литейных процессах, механическую при обработке резанием и давлением, электрическую при электроэрозионной и электрохимической обработке.

Г р у п п а 1 определяет энергию на границе раздела среды и объекта. Например, при электроэрозионной обработке на границе раздела действует электрическая энергия, передаваемая не

Т а б л и ц а 1

Классификационные признаки процессов и методов размерного формообразования

Характеристика группы	№ групп	№ признака	Характеристика признака
Энергия, непосредственно подводимая к объекту	0	0 1 2	Тепловая Механическая Электрическая
Энергия на границе объекта и среды	1	3 4 5 6	Магнитная Электромагнитная Химическая Ядерная
Энергия, определяющая съем материала и образование формы	2	0 1 5	Тепловая Механическая Химическая
Распределение энергии во времени	3	0 1 2	Непрерывное Пульсирующее Импульсное
Подвод и распределение энергии в пространстве, занимаемом объектом	4	0 1 2 3 4 5 6	Точечный Линейный Поверхностный Объемный Точечно-линейный Точечно-поверхностный Точечно-объемный
Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование (размерный съем материала, размерную деформацию, размерное соединение частиц и т. п.)	5	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Плавление (отвердевание) Испарение (конденсация) Пластическая деформация Хрупкое разрушение (скол) Химическое растворение Электролиз растворов или расплавов Кристаллизация из растворов или расплавов Направленное взаимодействие наэлектризованных или намагниченных частиц Взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов Ядерные преобразования вещества
Характер формообразования	6	0 1 2 3	Удаление припуска Изменение расстояния между точками твердого тела Изменение агрегатного состояния твердого тела Направленное соединение частиц твердого тела

Характеристика группы	№ груп- пы	№ при- знака	Характеристика признака
Вид среды обработки	7	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Вакуум Инертные газы Химически активные газы Воздух Вода техническая Электролиты Диэлектрические жидкости (масла) Суспензии Эмульсии Твердое тело
Давление среды обработки	8	0 1 2 3	Разряжение Нормальное Повышенное Особо высокое
Движение формообразования, приведенное к движению обрабатываемого объекта	9	0 1 2 3 4 5	Поступательное по оси X Поступательное по осям X и Y Поступательное по осям X, Y, Z Вращательное вокруг оси X Вращательное вокруг осей X и Y Вращательное вокруг осей X Y и Z
Физическое состояние материала объекта (заготовки), удаленного в процессе формообразования (состояние «стружки»)	10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Твердое Твердое диспергированное В расплаве В жидком растворе Капельно-жидкое Парообразное Газообразное ионизированное Газообразное нейтральное Исходное состояние не изменяется «Стружка» отсутствует

через твердое тело, а через плазму (канал разряда), в которой происходит преобразование ее в тепловую.

Г р у п п а 2 характеризует энергию, определяющую физический механизм формообразования. Для электроэрозионной обработки это будет тепловая энергия, преобразуемая на границе раздела и в самом объекте в тепловую.

Г р у п п а 3 определяет характер поступления во времени энергии к объекту: непрерывное, в течение всего процесса; порциями или импульсами, наконец, пульсирующее поступление, когда величина подводимой энергии пульсирует, не падая до нуля, как это имеет место при импульсном подводе энергии.

Г р у п п а 4 определяет характер подвода и распределения энергии в пространстве, занимаемом объектом. Признаки этой группы в некоторой мере развивают известную классификацию Л. Кошкина и отличаются введением сочетания в одном процессе нескольких видов подвода энергии. Так, например, эрозионные и ультразвуковые методы характеризуются точечным (в физическом смысле) подводом энергии, но вследствие того, что частоты точечных воздействий велики, интегральная картина явления определяется уже результатом статистики массового воздействия на поверхность; этим методам обработки соответствует 5-й признак (точечно-поверхностный подвод). Светолучевая обработка является примером точечного (при сферической оптике) и точечно-линейного (при цилиндрической оптике) воздействия (признаки 0; 4). Точечно-объемный подвод энергии имеет место при образовании объекта в процессе направленного соединения частиц.

Г р у п п а 5 характеризует основной физический процесс, приводящий к заданному изменению формы твердого тела или к воссозданию этой формы из расплава, раствора, путем размерного растворения (химического «фрезерования»), закономерного перемещения частиц (в частности, процессы электронно-ионной технологии — электроформирование в электрическом поле и др.), пластической деформации (механической обработки резанием и давлением), размерного испарения или плавления (электроэрозионного процесса), размерного откалывания частиц (ультразвуковой обработки) и др. Признаки этой группы тесно связаны с тремя первыми «энергетическими» группами.

Г р у п п а 6 характеризует самый общий принцип формообразования.

П о с л е д у ю щ и е г р у п п ы определяют среду обработки, ее давление и кинематические характеристики процесса формообразования. Эти признаки являются дополнительными и частично вытекающими из признаков первых пяти групп.

Г р у п п а 10 определяет состояние части материала объекта (заготовки), перешедшего в «стружку». Знание конечного состояния отходов позволяет составить энергетический баланс процесса формообразования.

Введем обозначения: E_0 — внутренняя энергия заготовки до формообразования; E_u — внутренняя энергия изделия; E_c — внутренняя энергия срезаемого слоя — «стружки» без учета в обоих случаях воздействия процесса формообразования; E_ϕ — энергия, затраченная на процессе формообразования, $E_{\phi u}$ — приращение внутренней энергии изделия; $E_{\phi c}$ — приращение энергии «стружки» в результате формообразования; $E_{\phi n}$ — потери энергии в окружающую среду. В самом общем случае (исключая, однако, расход энергии на термообработку и т. п.) уравнение энергетического баланса будет иметь вид

$$E_0 + E_\phi = E_u + E_c + E_{\phi u} + E_{\phi c} + E_{\phi n}. \quad (I. 1)$$

Энергетический баланс (I. 1) включает «пассивные» (внутреннюю энергию) и «активные» (вводимую извне энергию) составляющие. Эти составляющие несоизмеримы по величине. Поэтому целесообразно рассмотреть отдельно активные и пассивные составляющие. Из закона сохранения следует:

$$E_0 = E_u + E_c; \quad (I. 2)$$

$$E_\phi = E_{\phi u} + E_{\phi c} + E_{\phi n}. \quad (I. 3)$$

На основании уравнения (I. 2) можно ввести коэффициент использования материала, определяющий отношение энергосодержания готового изделия и энергосодержания заготовки

$$K_m = \frac{E_u}{E_u + E_c} = \frac{m_u}{m_u + m_c} \quad (I. 4)$$

и равный отношению массы изделия m_u к массе исходной заготовки. Если принять, что увеличение внутренней энергии изделия, обусловленное изменением кристаллической решетки, химического состава, образованием новых поверхностей и т. п., является полезной затратой энергии, то энергетический к. п. д. процесса формообразования

$$\eta_p = \frac{E_{\phi u}}{E_\phi} = \frac{E_{\phi u}}{E_{\phi u} + E_{\phi c} + E_{\phi n}} = \frac{1}{1 + \frac{E_{\phi c}}{E_{\phi u}} + \frac{E_{\phi n}}{E_{\phi u}}} = \frac{1}{1 + \xi'_c + \xi_n}, \quad (I. 5)$$

где ξ'_c — коэффициент, характеризующий распределение энергии формообразования между «стружкой» и «изделием», а ξ_n — коэффициент активных потерь.

Энергетические коэффициенты, учитывающие связь между активными и пассивными составляющими, определяются как отношения приращения внутренней энергии изделия или «стружки» к их внутренней энергии до формообразования:

$$\xi_u = \frac{E_{\phi u}}{E_u}; \quad (I. 6)$$

$$\xi_c = \frac{E_{\phi c}}{E_c}. \quad (I. 7)$$

ξ_u характеризует влияние процесса формообразования на качество материала изделия; ξ_c определяет увеличение внутренней энергии «стружки». Этот коэффициент может изменяться в широких пределах. При штамповке без отходов $\xi_c = 0$, но зато увеличивается доля энергии, перешедшая в изделие (изменение структуры в объеме изделия). В другом случае, при резании ξ_c резко растет, в то время как ξ_u относительно уменьшается (изменения структуры только в зоне, прилегающей к зоне обработки). Чем выше энергосодержание «стружки» (газ, пар, жидкое состояние, твердое диспергированное вещество и т. д. по степени снижения внутренней энергии), тем выше ξ_c и тем менее энергетически выгоден процесс в целом.

Из приведенных уравнений следует, что энергетический к. п. д. процесса формообразования тем выше: а) чем меньше материала заготовки переходит в «стружку» и чем ниже ее энергосодержание; б) чем меньше изменений вносится в материал изделия по сравнению с исходным материалом заготовки и, наконец, в) чем меньше потерь в окружающую среду. Теоретически можно представить процесс формообразования проходящим не только за счет подведения внешней энергии, но и за счет высвобождения внутренней энергии материала объекта.

Классификационные признаки (см. табл. 1), как и вся цифровая система классификации, не заменяют, а дополняют различные существующие системы классифицирования отдельных процессов, методов и способов обработки. Поэтому группы и признаки табл. 1 могут, в свою очередь, стать исходными для расширенного анализа явления и объединения их с существующими системами классификации проф. Г. И. Грановского и др.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Под электрофизическими и электрохимическими методами размерной обработки понимается совокупность электрических, электромагнитных (магнитных), электрохимических, химических и ядерных процессов и методов непосредственного одновременного, последовательного или в различных сочетаниях теплового, механического или химического воздействия на твердое тело с целью придания ему заданной формы и размеров.

Первая часть определения характеризует основные виды **подводимой** энергии (группа 0, табл. 1), вторая часть — **преобразованной** (группа 2), осуществляющей непосредственно работу по размерному формообразованию. Среди основных видов подводимой энергии нет механической и тепловой: они являются основными при механической обработке давлением и резанием, а также в литейных процессах. В то же время эти виды участвуют и могут являться основными после преобразования в объекте (например,

тепловая — в эрозионных методах, механическая — при магнитно-импульсной обработке давлением).

В свою очередь, среди основных видов преобразованной энергии нет электрической и электромагнитной энергии. Это объясняется тем, что возможные физические процессы формообразования, указанные в табл. 1 группе 5 и вытекающие из природы твердого тела, не связаны (хотя и могут ими инициироваться) с этими видами энергии. Действительно, на атомном и молекулярном уровне определяющими являются тепловые и химические процессы, а в макросистемах — механические. Поэтому все методы и процессы размерной обработки сводятся в итоге к использованию тепловой, механической или химической энергии (не учитывая при этом первичной электрической природы химических связей).

Электрофизические и электрохимические методы (ЭФЭХ) являются составной частью процессов электротехнологии, охватывающих не только размерное формообразование, но и электрическую сварку, высокочастотный электронагрев и плавление, электрометаллургию, электролиз и др. Электротехнология включает также процессы электронно-ионной технологии, позволяющие осуществить в том числе и некоторые операции формообразования из заряженных диспергированных частиц, направленно перемещаемых в сильных электрических полях [5 (7)].

Некоторые физические явления, такие, как сфокусированные световые, электронные и ионные пучки и другие, дают основание относить часть ЭФЭХ-методов также к области промышленной электроники и ее составной части — электронной технологии.

ЭФЭХ-методы по аналогии с методами механической обработки можно разделить на два класса: первый — класс процессов и методов, в которых формообразование является результатом удаления припуска (снятия «стружки») [6 (0)], и второй класс — аналогичный обработке давлением, т. е. без снятия «стружки» [6 (1)]. В перспективе появление еще одного класса методов, в котором образование заданной формы осуществляется направленным перемещением и соединением диспергированных заряженных или намагниченных частиц [6 (3)] и ряд других.

Ниже кратко остановимся на характеристиках, уже получивших промышленное применение, новых методов обработки, относящихся к первому классу, т. е. к признаку [6 (0)] — формообразованию со снятием «стружки». Место и значение этих методов обработки в современной технологии определяется следующими факторами, соответствующими главным тенденциям развития машиностроения и обработки материалов.

Первый фактор обусловлен необходимостью увеличения скоростей, нагрузок и повышения температуры ответственных деталей машин, увеличением их надежности и долговечности, расширением номенклатуры материалов, обладающих специальными свойствами. Удовлетворение этих требований достигается более

широким применением жаропрочных, магнитных, нержавеющей, антикавитационных и других высоколегированных сталей, твердых сплавов, полупроводниковых материалов (германия и кремния), алмазов, рубинов, кварца, ферритов и других, обработка которых обычными механическими методами чрезвычайно затруднена или невозможна.

Второй фактор связан с увеличением удельного веса обработки давлением, точного литья, и особенно — с расширением применения пластических масс, изделия из которых изготавливаются преимущественно прессованием. Все это приводит к росту потребности в штампах, литейных формах, прессформах и других подобных изделиях сложной конфигурации, весьма трудоемких в производстве и требующих высококвалифицированного ручного труда.

Наконец, третий фактор связан с необходимостью изготавливать отверстия, щели и фасонные прорези сверхмалых размеров, соединительные каналы в труднодоступных местах и тому подобные операции, которые не могут быть осуществлены механическими методами из-за ограничений, накладываемых кинематикой резания, либо из-за несоответствия между малой жесткостью и прочностью детали и требуемыми большими силами резания, либо из-за невозможности изготовить инструмент нужных размеров и формы.

Во всех указанных случаях, а особенно при их сочетании эффективно используются электрофизические и электрохимические методы размерной обработки материалов.

Общими характерными свойствами ЭФЭХ-методов являются:

а) практическая независимость от твердости и вязкости обрабатываемого материала (за исключением ультразвукового метода, при котором увеличение твердости и хрупкости повышает обрабатываемость, а вязкости — понижает);

б) возможность отображения (копирования) формы инструмента сразу по всей поверхности заготовки при простом поступательном перемещении инструмента (в отличие от механической обработки резанием, при которой для получения объемной формы необходим последовательный обход всей поверхности по строчкам). Вследствие этого становится возможным введение больших мощностей в зону обработки и соответственно — увеличение производительности при изготовлении изделий с фасонными полостями. Простая кинематика формообразования позволяет осуществлять также операции, не доступные механической обработке;

в) обработка осуществляется практически без силового воздействия на обрабатываемую заготовку;

г) процесс обработки легко автоматизируется и позволяет, как правило, осуществлять многостаночное обслуживание.

В соответствии с принятой классификацией известные и уже применяющиеся в промышленности ЭФЭХ-методы можно разбить на четыре группы (рис. 1).

Первая группа охватывает электроэрозионные методы обработки токопроводящих материалов — металлов и сплавов, основанные на использовании преобразуемой в тепло энергии электрических разрядов, возбуждаемых между инструментом и заготовкой. В зависимости от вида электрического разряда (искры, дуги), параметров импульсов тока, напряжения и других условий электроэрозионная обработка включает четыре основных

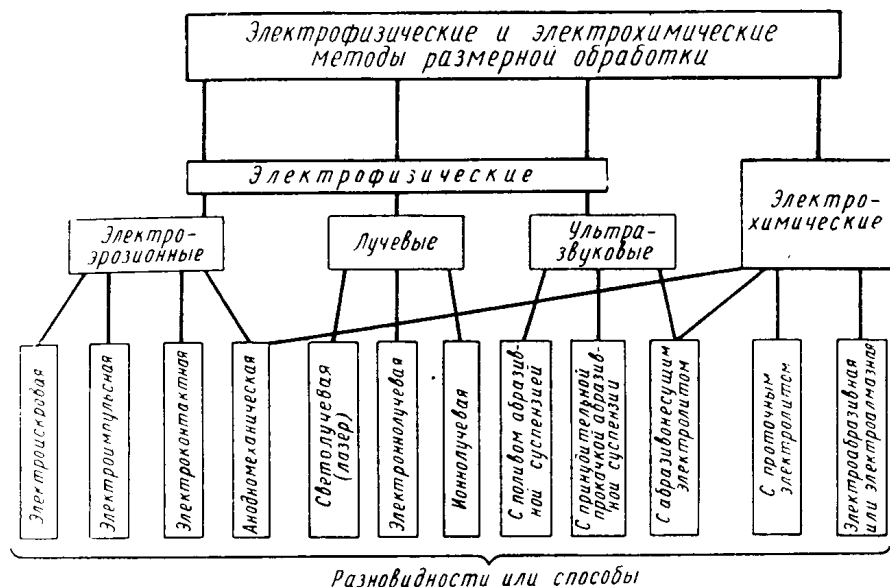


Рис. 1. Классификация электрофизических и электрохимических методов и способов размерной обработки материалов

разновидности: электроискровую, электроимпульсную, электроконтактную и анодно-механическую, каждая из которых отличается выходными технологическими характеристиками, оборудованием и имеет свою область промышленного применения. Эти разновидности метода, или способы, отличаюсь диапазоном используемых физических параметров процесса, имеют свою область применения и специфическое оборудование.

Электроискровой способ имеет следующие характерные признаки: энергоносителем при преобразовании на границе раздела объекта и среды являются преимущественно электроны (искровая или искродуговая стадии разряда), а при формообразовании — тепловое движение; импульсный процесс характерен большой скважностью; физический процесс съема — размерным испарением; подвод энергии при осуществлении вырезки по двум координатам — точечно-линейный, а при копировании — точечно-поверхностный; кинематика формообразования — поступательное (при вырезании

и копировании) и вращательное (при шлифовании) движение при поступательном в обоих случаях движении подачи; обрабатываемые материалы — проводники (реже полупроводники) в широком диапазоне характеристик; точность, достаточная для деталей нормальной точности и прецизионных.

Электрод-инструмент включается на прямую полярность (катод) (рис. 2, а). Источник питания — зависимые релаксационные (конденсаторные) генераторы знакопеременных импульсов напряжения, ограничено зависимые или независимые высокочастотные тиратронные или транзисторные генераторы. Мощность генератора — от сотен ватт до нескольких киловатт. Максимальная скорость съема по стали до $600 \text{ мм}^3/\text{мин}$, по твердому сплаву (при предварительной обработке) — $100 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Максимальная чистота поверхности $\nabla 7$ — $\nabla 8$ (по твердому сплаву). Относительный износ инструмента по стали 25—100%, по твердым сплавам — более 100%. Этот способ применяется преимущественно для прецизионной обработки небольших деталей радиоэлектронной промышленности, топливной аппаратуры (мелкие отверстия, шлифовальные операции), вырезки фасонных контуров твердосплавных вырубных штампов проволочным электродом, перемещаемым по двум координатам, управляемым по программе или от плоского копира.

Электроимпульсный способ. Энергоносителем на границе раздела являются ионы (дуговая форма разряда), съем материала происходит в результате теплового действия; процесс импульсный преимущественно при малой скважности и в сочетании с пульсирующим; физический процесс съема металла осуществляется размерным плавлением, остальные признаки являются следствием указанных отличий. Электрод-инструмент включается на обратную (анод) полярность (рис. 2, б).

Источники питания — машинные, магнитонасыщенные или тиристорные генераторы низких и средних частот (при предварительной обработке), электронно-полупроводниковые, индукторные, широкодиапазонные транзисторные генераторы повышенных и высоких частот (при чистовой обработке). Мощность генераторов — от нескольких киловатт до нескольких десятков и сотен киловатт. Максимальная скорость съема по стали — до $25\,000 \text{ мм}^3/\text{мин}$, по твердому сплаву (на высокочастотных генераторах) — 70 — $120 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Максимальная чистота поверхности по стали $\nabla 5$ — $\nabla 6$, по твердому сплаву $\nabla 6$ — $\nabla 7$. Относительный износ инструмента по стали 0,05—0,3%. Способ применяется преимущественно для трехкоординатной обработки фасонных полостей.

Электроконтактный способ. Энергоносителем являются ионы (дуговой разряд), энергия движения которых переходит в тепло; процесс импульсный, при малой скважности; съем металла размерным плавлением; существенное отличие вносит признак группы 9 (табл. 1): электрод-инструмент вращается, и этим обу-

словливает так называемое механическое генерирование знакопеременных импульсов. Вращение инструмента ограничивает этот способ операциями, подобными точению, фрезерованию и в меньшей степени разрезанию (рис. 2, г).

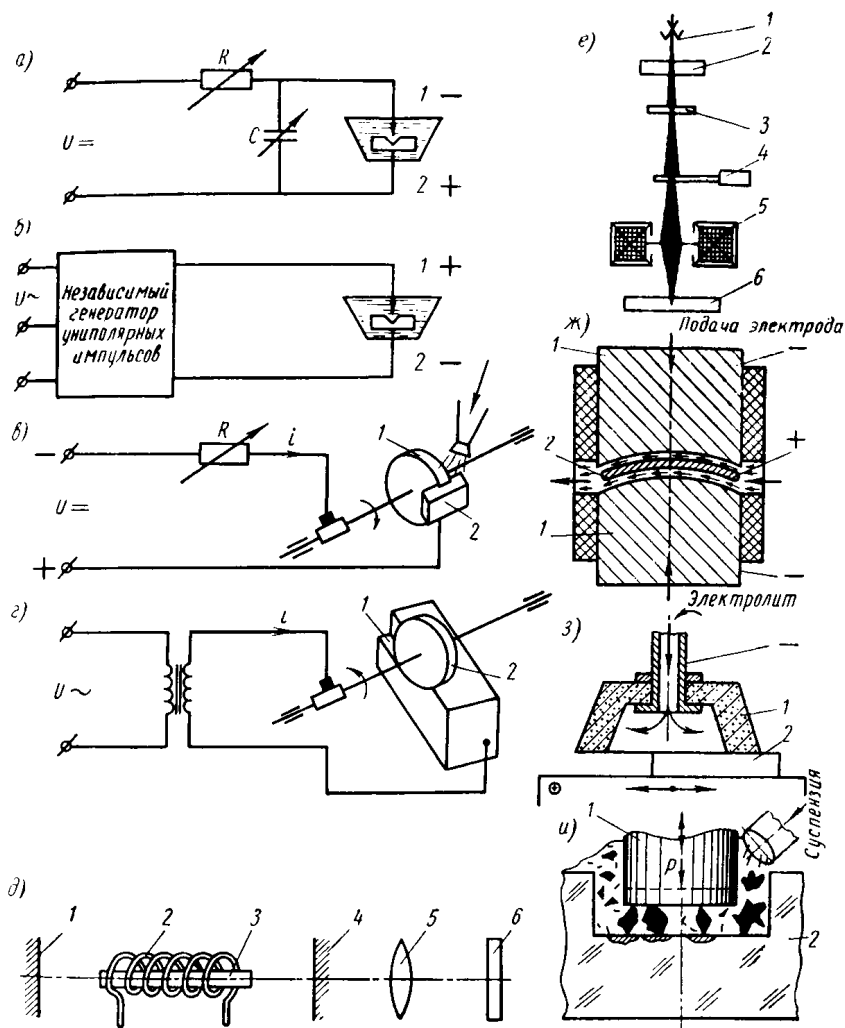


Рис. 2. Принципиальные схемы осуществления электрофизических и электрохимических способов размерной обработки материалов:

а — электроискровой; б — электроимпульсной; в — анодно-механической; г — электроконтактной разновидностей электроэрозионной обработки (1 — электрод-инструмент; 2 — деталь); д — светолучевой (1 — полностью отражающее зеркало; 2 — лампа-вспышка; 3 — рубиновый стержень; 4 — зеркало с частичным пропусканием; 5 — фокусирующая линза; 6 — обрабатываемая деталь); е — электронно-лучевой обработки (1 — электронная пушка; 2 — анод; 3, 4 — диафрагмы; 5 — фокусирующая система; 6 — обрабатываемая деталь); ж — электрохимическое формообразование в среде проточного электролита; з — электрохимическое электроалмазное шлифование; и — ультразвуковая обработка со свободным поливом абразива.

Источник питания — понижающий трансформатор мощностью от десятков до сотен киловатт. Максимальная скорость съема при электроконтактном «фрезеровании» достигает 1 млн. $\text{мм}^3/\text{мин}$, или 500 $\text{кг}/\text{ч}$. Способ используется для обдирки перед прокатом слитков из специальных сталей, предварительной обработки фасонных поверхностей типа лопастей гидротурбин (фрезерование по копиру), разрезки заготовок и других подобных операций.

Анодно-механический способ основан на комбинированном эрозионном (дуговом) и электрохимическом (анодном растворении) процессах. Импульсный процесс является результатом механического генерирования, т. е. обязательного вращения инструмента (диска или ленты), включаемого на прямую полярность. Источник питания — выпрямитель постоянного тока напряжением 22—26 в, мощностью от нескольких киловатт до десятков киловатт. Обработка осуществляется в электролите—водном растворе жидкого стекла (рис. 2, в).

Выходные технологические характеристики — скорость разрезки до 50 см^2 площади реза в минуту, чистота поверхности до $\nabla 4$ (при резке) и $\nabla 7$ — $\nabla 8$ (при шлифовании), относительный износ инструмента 15—25%.

Преимущественная область применения этого способа — разрезка заготовок из специальных сталей диаметром до 750 мм , а также внутреннее и наружное шлифование твердосплавных втулок и фильер.

Ко второй группе методов, используемых для обработки как токопроводящих, так и нетокопроводящих материалов, относятся лучевые способы обработки, основанные на съеме материала при воздействии на него концентрированными лучами с высокой плотностью энергии. Как и при электроэрозионной обработке, съем материала осуществляется при преобразовании этой энергии в тепло непосредственно в зоне обработки. К лучевым методам относится обработка сфокусированными световым электронным или ионным лучами.

Светолучевая обработка. Когерентный световой луч, генерируемый монохроматическим оптическим квантовым генератором (лазером), направляется через оптическую систему на обрабатываемую заготовку (рис. 2, д). Луч фокусируется до диаметра в несколько микрон, в зоне его действия возникает высокая температура (тысячи градусов). Метод может быть применен для получения отверстий малого диаметра в любых материалах при изготовлении алмазных волок, мелких сит, фильер для получения искусственного волокна и др. Обработка осуществляется в воздухе. Производительность — до 30—60 отверстий (диаметром от 0,03 до 0,5 мм) в минуту при глубине от нескольких десятых долей до нескольких миллиметров при мощности источника питания несколько десятков киловатт.

Электронно-лучевая обработка основана на том, что излучаемые катодом электроны (при глубоком вакууме) ускоряются в мощном электрическом поле и фокусируются в узкий пучок, направленный на обрабатываемую деталь — анод (рис. 2, е). При этом кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую, благодаря чему могут прошиваться малые отверстия, щели с размером в несколько десятков микрон. Метод находит применение при обработке прецизионных деталей радиоэлектронной промышленности и т. п.

Ионно-лучевая обработка использует явление катодного распыления, возникающего при тлеющем газовом разряде. Электроны, эмитируемые катодом, ионизируют молекулы газа. Ионы ускоряются сильным электрическим полем и фокусируются в узком конусе, вершина которого находится на обрабатываемом изделии. Этим методом можно прошить в тонком листовом материале отверстия диаметром от 5 мк и выше.

По кинематике формообразования метод лучевой обработки подобен методу обработки тонкой струей жидкости при сверхвысоком давлении, способной прошить отверстие или разрезать листовой материал.

К третьей группе относится метод импульсного ударного механического воздействия на материал. Этот метод назван **ультразвуковым** вследствие того, что частота ударов соответствует диапазону неслышимых звуков. Этим методом обрабатываются твердые и хрупкие материалы, частицы которых выкалываются при ударе. Строго говоря, ультразвуковой метод относится не к ЭФЭХ-методам, а к разновидности механической обработки со снятием «стружки», поскольку к объекту подводится механическая энергия и она же производит работу по снятию материала. Энергоноситель — механическое движение — обуславливает протекание импульсного процесса хрупкого скола. Отнесение этого метода к электрофизическим весьма условно и объясняется тем, что методы получения высокочастотных механических колебаний, составляющих основу этого метода, — электромагнитные. Электрические колебания ультразвуковой частоты (16—25 тыс. гц) преобразуются в специальном электромеханическом (магнитострикционном) преобразователе.

Через систему акустических концентраторов колебания сообщаются торцу инструмента (рис. 2, и). В зону обработки, под торец инструмента, поступает абразивная суспензия — зерна абразива в воде во взвешенном состоянии. Колеблющийся с ультразвуковой частотой инструмент ударяет по зернам абразива, которые выкалывают частицы материала, осуществляя таким образом копирование формы инструмента на заготовке. Источник питания — электронный генератор мощностью от сотен ватт до нескольких киловатт.

Этим методом хорошо обрабатываются твердые и хрупкие материалы, в том числе нетокопроводящие — типа керамики,

кварц, рубин, алмаз, стекло, фарфор, германий, кремний, а также твердые сплавы и др.

Выходные технологические характеристики способа: максимальная скорость съема металла по стеклу $9000 \text{ мм}^3/\text{мин}$, по твердому сплаву $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$, максимальная чистота поверхности до $\nabla 10$. Относительный износ инструмента по твердому сплаву 40—60%. Скорость съема и соответствующая ей чистота поверхности — наибольшие по сравнению с другими методами.

Преимущественная область применения этого метода — изготовление вырубных и чеканочных твердосплавных штампов, вырезка из германия и кремния дисков транзисторов, обработка алмазных и твердосплавных фильер, рубиновых подшипников и т. п.

Четвертая группа объединяет электрохимические методы размерного формообразования. Эти методы основаны на явлении анодного растворения, заключающемся в том, что при прохождении тока через электролит электрод, подключенный к положительному полюсу (аноду), растворяется (рис. 2, ж). При этом металл заготовки переходит в ионное состояние и выносится проточным электролитом из зоны обработки. В качестве электролита применяется преимущественно водный раствор хлористого натрия, прокачиваемый через малый (0,10—0,5 мм) межэлектродный зазор, причем в результате того, что быстрее растворяются те участки деталей, которые ближе к поверхности инструмента, в процессе обработки профиль инструмента копируется на изделии. При введении регулируемой подачи электрода точность отображения плавных поверхностей достигает 0,1—0,3 мм. Метод особенно эффективен при обработке поверхностей типа лопаток, так как при этом обеспечиваются наилучшие условия потока электролита без завихрений.

Электрохимический процесс также комбинируется с шлифованием абразивом или алмазом (рис. 2, з) на токопроводящей основе (электроабразивная или электроалмазная обработка — в зависимости от того, что входит в состав вращающегося диска — электрода). При этом процесс анодного растворения облегчает съем металла, вследствие чего производительность повышается в 1,5—2 раза и во столько же экономится расход алмазов.

Электрохимический способ применяется для обработки пера турбинных лопаток, прошивания фасонных отверстий, электрохимического шлифования и заточки, снятия заусенцев на зубчатых колесах и других деталях. Особенностью процесса является высокий класс чистоты поверхности ($\nabla 7$ — $\nabla 8$) при высокой производительности (несколько сот миллиметров кубических в минуту на 1 см^2) и энергоемкости до 15 — $25 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$.

К этой группе близки методы химической обработки без наложения тока (химическое «фрезерование») путем растворения подлежащего удалению металла сильными кисло-

20

тами или щелочами. Скорость съема (по алюминию) достигает $0,5—1 \text{ дм}^3/\text{мин}$.

Первая, вторая и третья группы относятся к электрофизическим, а четвертая — к электрохимическим методам обработки.

Методы первой, третьей и четвертой групп позволяют осуществлять обработку по всем трем координатам, методы второй группы — пока только по двум координатам.

Наибольшее внедрение имеет группа электроэрозионных методов. Это соотношение, однако, не определяет возможный объем внедрения и действительное значение отдельных методов. Особенно это касается электрохимической обработки, которая получит большое развитие. Новые методы обработки оказывают революционизирующее влияние на такие отрасли промышленности, как производство штампов, прессформ, турбинных лопаток, твердосплавного инструмента, электронной аппаратуры и других, определяющих развитие машиностроения в целом, открывают перед конструкторами новые возможности в создании надежных и долговечных машин и аппаратов, во многих случаях являются единственно возможными методами, позволяющими решать сложнейшие технологические задачи. Высокая производительность, достигаемая на эффективных операциях, не требует при переводе технологического процесса на новый метод столь резкого количественного роста парка станков. Таким образом, удельный вес и значение ЭФЭХ-методов обработки в технологии будут значительно выше, чем в парке станков.

В 70-х годах следует ожидать перевода на новые методы обработки примерно 5—10% технологических операций в машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности.

Вместе с тем имеется ряд факторов, ограничивающих применение ЭФЭХ-методов. Производительность, точность и чистота поверхности, достигаемые при механической обработке обычных конструкционных материалов, а также тел вращения (при точении, сверлении, круглом шлифовании и т. п.), плоскостей (при фрезеровании, строгании, протягивании, плоском шлифовании и т. п.), поверхностей, образованных сочетанием вращательного и поступательного движений (при резьбонарезании, зубонарезании и т. п.), в большинстве случаев выше, чем у новых методов обработки, а энергоемкость в этих же условиях ниже. Ввиду того, что объем труднообрабатываемых материалов в общем расходе материалов, перерабатываемых промышленностью, относительно меньше (хотя и имеет тенденцию к опережающему росту и не только в отраслях специального машиностроения), а количество изделий, получаемых сочетанием простых поверхностей, значительно больше, чем сложных, механическая обработка, наряду с другими классическими процессами формообразования, по-прежнему будет составлять основу технологии машиностроения.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ
РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионная размерная обработка металлов и сплавов основана главным образом на тепловом действии импульсов электрического тока, непрерывно подводимых непосредственно к локальным участкам обрабатываемой заготовки с целью придания ей заданной формы и размеров или изменения структуры и качества поверхностного слоя. Первичными при этом являются электрические импульсы (электрические разряды), преобразуемые в зоне обработки в тепловые, собственно и осуществляющие работу по съему металла и эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки.

В этом определении в сжатом виде содержатся основные физические условия осуществления электроэрозионной обработки. Рассмотрим и обоснуем эти условия.

Непосредственный подвод энергии означает, что между источником энергии и заготовкой должен быть электрический контакт (т. е. гальваническая связь) и что заготовка и инструмент являются, следовательно, полюсами электрической цепи. Требование непрерывного подвода энергии означает, что для снятия заданного объема металла (припуска) к заготовке должна поступать энергия для осуществления заданной работы в течение необходимого времени.

Менее очевидны условия, связанные с импульсным и локальным выделением энергии.

Под импульсом в общем случае понимается воздействие, под которым находится объект в течение времени, соизмеримого со временем вызванного этим импульсом переходного процесса, который, в свою очередь, должен заканчиваться к моменту начала следующего импульса. Электрический импульс определяется током и напряжением, действующими в электрической цепи, состоящей из нагрузки (объекта), линии связи и генератора периодической э. д. с. сложной формы, описываемой уравнением

$$E(t) = E(t + kT), \quad (II. 1)$$

где $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$; T — период изменения э. д. с.

Согласно определению напряжение действует только в течение некоторой части периода T , причем длительность переходного процесса $t_{пер}$ в системе генератор—линия—нагрузка соизмерима с длительностью импульса t_u , и этот процесс практически должен заканчиваться в течение паузы t_n между импульсами. Таким образом, периодический импульсный процесс должен характеризоваться соотношениями

$$t_u \approx t_{пер}; \quad (II. 2)$$

$$t_{пер} \leq t_n. \quad (II. 3)$$

При соблюдении этих условий периодическую э. д. с. сложной формы $E(t)$ будем называть импульсной э. д. с.

Условие (II. 3) обычно соблюдается, если постоянная времени системы генератор—линия—нагрузка, определяющая время переходного процесса, меньше, чем длительность интервала между импульсами. При этом время переходного процесса в установках сильных периодических импульсных токов определяется не только электрическими постоянными времени системы, но и неэлектрическими постоянными времени, зависящими от характера и масштабов происходящих физических процессов преобразования энергии в нагрузке (тепловых, химических, механических и других процессов). При $T \gg t_u$ можно говорить о действии на объект не периодических, а одиночных импульсов.

Таким образом, непосредственность, непрерывность, импульсность обеспечиваются воздействием на объект в течение необходимого времени обработки периодической импульсной э. д. с. $E(t) = E(t + kT)$, вырабатываемой специальным генератором сильных импульсных токов. Этот генератор является неизменным элементом электроэрозионной установки.

Однако возможны и не чисто электрические методы генерирования импульсов. Периодическое поступление импульсов к данному участку объекта может быть обеспечено введением относительного механического движения (вибрации, вращения, поступательного перемещения) электродов — объекта и инструмента, включенных в цепь не импульсного, а например, гладкотокового или переменного тока. С точки зрения наблюдателя, находящегося на участке объекта, через этот участок будет проходить не постоянный или переменный ток, а импульсный, обусловленный прерыванием цепи питания, при относительном движении электродов.

На механическом методе генерирования импульсов основаны электроконтактная и анодно-механическая разновидности электроэрозионной обработки, на электрическом методе — электроискровая и электроимпульсная разновидности ¹.

¹ Может быть еще комбинированный метод генерирования импульсов — совмещение источника периодической импульсной э. д. с. с механическим движением (например, электроимпульсное точение, шлифование и т. п.).

Ниже будут рассмотрены общие закономерности электроэрозионной обработки только с электрическим методом генерирования. Хотя все разновидности и имеют много общего в используемом физическом механизме электроэрозионного разрушения металлов, но методы формообразования, из-за введения относительного движения, у двух групп электроэрозионных методов обработки различны.

Основными параметрами периодических импульсов различной формы являются *скважность*, *длительность*, *амплитуда* и *частота*, определяющие максимальную мощность и энергию импульса, мощность генератора, средние и действующие значения и коэффициенты формы кривых токов и напряжений и другие величины, характеризующие как генератор импульсов, так и физические процессы, происходящие в нагрузке.

Скважность импульсов называется отношение периода повторения T к длительности импульса:

$$q = \frac{T}{t_u} \geq 1. \quad (II. 4)$$

Различают *скважности импульсов* по э. д. с. и по току. В первом случае *скважность импульсов* характеризуется при холостом ходе генератора, во втором — при нагрузке. При определении *скважности по току* $t_u = t_{пер}$. Вследствие влияния индуктивности линии связи, нагрузки и генератора *скважность по току* должна быть ниже, чем *скважность по э. д. с.*, однако при нелинейной нагрузке (например, при искровом или дуговом разряде) *скважность по току* выше, чем по напряжению на нагрузке, и может быть даже выше, чем по э. д. с.; это обусловлено прекращением тока разряда раньше, чем напряжение перейдет через ноль.

Физически *скважность импульсного процесса* определяет возможность концентрации во времени больших энергий и мощностей в объекте. Действительно, при преобразовании энергии без потерь в объекте в течение времени t_u выделится мощность P_n в q раз большая, чем средняя мощность P_{cp} источника питания:

$$P_n = qP_{cp}. \quad (II. 5)$$

Идея заключается в том, что если при $P = P_{cp}$ энергия связей частиц $P_{св}$ в твердом теле $P_{св} < P_{cp}$, то при $P = P_n$ и той же средней мощности источника $P_{cp} = \text{const}$

$$P_n > P_{св}, \quad (II. 6)$$

что является условием обрабатываемости твердого тела. Кроме того, при изменении *скважности*, а следовательно, и отношения длительности импульса к вводимой порции энергии изменяется не только абсолютное значение мощности воздействия, но и, в ряде случаев, качественно физический механизм процесса, что будет показано ниже.

Далее, при непрерывном подводе энергии ($q = 1$) тепловая энергия, определяющая съем металла при электроэрозионной обработке, концентрируется не только на участках, подлежащих обработке, но и распространяется на весь объем объекта. Помимо уменьшения к. п. д., это приводит к потере точности, нежелательному изменению структуры металла, увеличению шероховатости и потере, в конечном счете, самой возможности размерной обработки.

Диапазон применяемых при электроэрозионной обработке скважностей заключен в пределах от 1 до 25—30, в том числе при электродискровой разновидности $q > 5 \div 10$, при электроимпульсной $q < 5$.

Д л и т е л ь н о с т ь импульса t_u определяется по времени действия импульса э. д. с. или тока (см. рис. 3, *ж, н, р, т* и др.). В последнем случае $t_u = t_{пер}$, так как импульс тока в нагрузке прекращается одновременно с окончанием переходного процесса. При этом в момент равенства тока нулю переходные процессы, вызванные прохождением импульса тока в нагрузке, как правило, еще продолжаются в течение некоторого времени, определяемого, как указывалось выше, неэлектрическими постоянными времени. Однако при анализе работы генератора импульсов можно определять длительность импульса по моменту окончания импульса тока, в то время как при исследовании процессов в нагрузке необходимо учитывать как длительность импульса тока, так и длительность и характер вызванных им явлений. Поскольку условие (II. 3) должно выполняться с учетом длительности п о л н о г о переходного процесса, требования к генератору будут формулироваться на основании изучения конкретных физических процессов в нагрузке.

Длительность импульса является одной из характеристик вида электрического разряда. Электроэрозионная обработка занимает область длительностей $10^{-7}—10^{-1}$ сек, причем диапазон $t_u < 10^{-4}$ сек преимущественно используется в электроискровой, а диапазон $t_u > 10^{-4}$ сек — в электроимпульсной обработке, хотя имеются взаимные переходы через эту границу при сохранении за каждым способом его основной специфики.

Длительность импульса и скважность при постоянной частоте связаны обратно пропорциональной зависимостью

$$t_u = \frac{1}{fq}. \quad (\text{II. 7})$$

Следовательно, приведенные выше данные о влиянии скважности при постоянной средней мощности и частоте являются обратными для t_u : чем меньше t_u (или больше q), тем больше концентрация энергии. Для конкретных условий обработки должна избираться такая длительность импульса, чтобы соблюдались необходимые требования по производительности, точности и шероховатости поверхности.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{qt_u} \quad (\text{II. 8})$$

однозначно определяется заданными длительностью и скважностью импульсов. Общий диапазон используемых в электроэрозионной обработке частот составляет примерно $0,5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^6$ *имп/сек.*

Амплитуды импульсов тока изменяются в электроэрозионных установках от долей до десятков тысяч ампер, а амплитуды импульсов напряжения — от десятков до нескольких сотен вольт.

Последняя часть условия — необходимость реализации энергии импульса на достаточно малом участке — дополняет условие локализации процесса во времени: чем больше участок при заданной энергии импульса, тем меньше плотность энергии, меньше зона структурных изменений. В противном случае плотность энергии может достигнуть критического значения, при котором съем металла резко упадет или вообще не произойдет. В последнем случае не только плотность энергии, но и плотность мощности должны достигнуть значений ниже критических (т. е. соответствующая максимальной мощности импульса температура должна быть ниже температуры плавления металла объекта). При уменьшении элементарного участка указанные характеристики изменяются в обратном направлении; при этом может измениться даже вид физического процесса — размерное плавление заменится размерным испарением.

Локализация элементарного съема металла в пространстве требует применения определенного метода подвода энергии к каждому участку поверхности объекта. Энергию электрического тока можно подвести к элементарному участку поверхности через контакт, канал разряда или комбинировано. Рассмотрим эти способы.

В первом случае энергия подводится через контакт инструмент—объект. Контакт осуществляется по микронеровностям их поверхностей. Чисто контактный подвод энергии имеет место при соблюдении определенных условий, например, в случае, когда инструмент и объект неподвижны или находятся в относительно движении при большом контактном давлении. При достаточной вводимой мощности возникает нагрев контакта и близлежащей к нему зоны. Размерная обработка может быть осуществлена только в том случае, если металл объекта в зоне контакта будет доведен до пластического состояния или плавления, при котором вращающийся инструмент (диск) механически будет удалять размягченный или расплавленный металл. Этот метод подвода позволяет концентрировать энергию на элементарных площадках касания диска с объектом подобно площадке контакта шлифовального круга с плоскостью. Ниже будет показано, что такая форма

площадки контакта не позволяет осуществлять формообразование методом копирования.

Подвод энергии через канал разряда осуществляется при возбуждении между элементарными участками инструмента и объекта электрического разряда. Локализация энергии определяется диаметром канала разряда, достигающим весьма малых величин, изменение которых позволяет регулировать режимы обработки. В этом случае мощность, выделяемая в элементарном объеме каждым ампером проходящего тока, значительно выше, чем при контактном подводе энергии, так как разрядное падение напряжения, определяющего величину этой мощности, в десятки раз больше, чем при контакте.

Комбинированный подвод энергии имеет место обычно при контактном начале разряда, последующем прерывании этого контакта вследствие механического движения и развитии разряда (дуги замыкания).

При электроэрозионной обработке используются искровая и дуговая формы электрических разрядов, одним из отличий которых является меньший при искровом разряде диаметр канала и, следовательно, большая (при равных энергиях) концентрация мощности.

Чисто контактный подвод энергии применяется при одном из видов электроконтактной обработки (при напряжениях меньших 15—20 в и большом давлении) и связан всегда с механическим движением одного из электродов. Подвод через канал разряда определяет электрический метод генерирования и составляет основу электроискрового (искровой разряд) и электроимпульсного (дуговой разряд) способов обработки. Комбинированный подвод связан соответственно с комбинированным методом генерирования, т. е. с сочетанием импульсного питания от электрического генератора импульсов с механическим прерыванием движущимися электродами (электроискровая, электроимпульсная обработка вращающимся электродом — шлифование, точение и т. п.).

Электроконтактная обработка при повышенном напряжении (25—40 в) и малом давлении также имеет комбинированный подвод энергии, но при источнике переменного или постоянного тока, а не импульсного.

По характеру влияния нагрузки на генератор и обратной реакции генератора на нагрузку электрические генераторы импульсов разделяют на два класса: на независимые и зависимые. Независимыми будем называть генераторы, у которых амплитуда, длительность, полярность, частота и форма импульсов практически во время работы не зависят от физического состояния эрозионного промежутка, т. е. от нагрузки; соответственно у зависимых генераторов эти же параметры определяются не только генератором, но и состоянием нагрузки.

Группы генераторов, у которых часть параметров зависит, а часть не зависит от нагрузки, будем называть ограниченно

зависимыми. При механическом генерировании имеет место ограниченная зависимость ряда параметров от нагрузки (изменения давления электродов приводят к изменению тока в соответствии с внешней характеристикой источника питания).

Зависимые генераторы составляют техническую основу электроискрового способа; в последние годы получили применение ограниченно зависимые и независимые генераторы коротких импульсов, составляющие техническую основу так называемой высокочастотной разновидности электроискровой обработки.

Принципы независимого генерирования импульсов и соответствующие системы генераторов составили техническую основу электроимпульсного способа и всех его разновидностей.

Рабочим инструментом при электроэрозионной обработке является электрический разряд — импульс. Поэтому весьма важными являются не только параметры, но и форма этого «инструмента». Формы используемых в электроэрозионной обработке импульсов можно разбить на четыре группы (рис. 3): униполярные; униполярные с постоянной составляющей (пульсирующий ток); симметричные относительно начала координат знакопеременные импульсы и несимметричные знакопеременные импульсы.

Внутри каждой группы различают импульсы синусоидальные, трапецеидальные, треугольные, прямоугольные и т. п. Степень влияния формы импульса на характеристики эрозионной обработки зависит от метода генерирования импульсов. При электрическом методе генерирования форма импульса и его полярность определяют величину эрозии обоих электродов и стабильность процесса. Так, при униполярном импульсе каждый из электродов может иметь оптимальную полярность, при которой на электроде-заготовке эрозия максимальная, а на электроде-инструменте минимальная. При симметричном знакопеременном импульсе полярность переменная, что увеличивает износ инструмента. При несимметричных знакопеременных импульсах этот недостаток частично сглаживается и на некоторых режимах можно вообще исключить вторую полуволну с малой амплитудой напряжения, получив таким образом униполярный импульс тока как бы «выпрямлением» импульса эрозионным промежутком. Те же симметричные знакопеременные импульсы при механическом генерировании могут обеспечить минимальный износ инструмента тепловой асимметрией на движущемся электроде-инструменте и неподвижной заготовке (например, при электроконтактной обработке на вращающемся диске-электроде удельная тепловая нагрузка в сотни раз меньше, чем на неподвижной заготовке, в результате чего он изнашивается в сотни раз меньше).

Импульсы униполярные и униполярные с постоянной составляющей (пульсирующий ток, рис. 3, *г, ж, з, н, р, с, т, у*) используются в электроимпульсных установках, несимметричные знакопеременные импульсы — в электроискровых (рис. 3, *д, е, ф, х*),

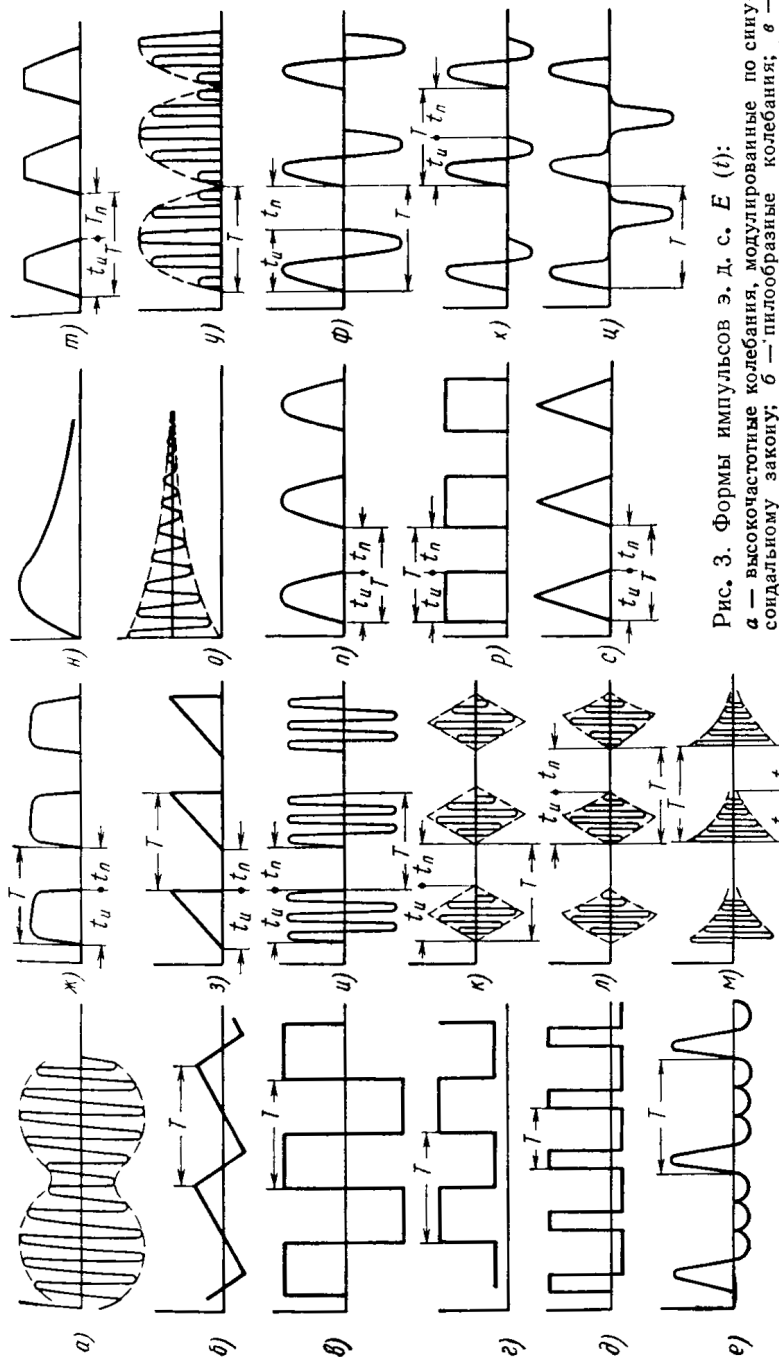


Рис. 3. Формы импульсов э. д. с. $E(t)$:

а — высокочастотные колебания, модулированные по синусоидальному закону; б — пилообразные колебания; в — прямоугольные колебания; г — пульсирующая э. д. с. (прямоугольные колебания); д — несимметричные знакопеременные прямоугольные колебания; е — несимметричные знакопеременные трапециевидные и треугольные видеопульсы; ж, з — соответственно и затухающие радиопульсы; и, о — однопериодические и колебательные импульсы; л — м — соответственно синусоидальные, прямоугольные, треугольные и трапециевидные униполярные импульсы; у — модулированные до амплитуды униполярные импульсы; ф, х — соответственно симметричные и несимметричные знакопеременные синусоидальные импульсы; ц — знакопеременные несинусоидальные импульсы;

симметричные знакопеременные и униполярные — в электроконтактных установках (рис. 3, б, в, г, п).

Форма импульсов (прямоугольная, синусоидальная, трапецидальная и т. п.) тока и напряжения влияет на характеристики процесса тем сильнее, чем короче импульс. Наиболее сильное влияние форма импульсов оказывает на износостойкость некоторых материалов электродов-инструментов, особенно важна при этом форма хвостовой части импульса.

В условиях непрерывного подвода энергии в неявном виде существует еще одно общее для всех разновидностей требование: для обеспечения непрерывности процесса необходимо не только подключить заготовку к источнику периодической импульсной э. д. с. $E(t)$, но и непрерывно восстанавливать исходное рабочее состояние нарушаемого самим же рабочим процессом съема. Для этого следует, во-первых, непрерывно удалять продукты обработки из зазора и, во-вторых, непрерывно восстанавливать увеличивающееся вследствие этого расстояние между электродами до такой величины, чтобы могли снова возникнуть и устойчиво поддерживаться импульсы-разряды. Если второе требование удовлетворяется путем введения наряду с генератором импульсов нового элемента — **регулятора подачи**, то первое требование касается коренных физических условий, лежащих в основе не только эрозионной, но и других видов размерной обработки, основанных на процессах формообразования со снятием припуска [группа 6(0), табл. 1]. Действительно, процесс обработки объединяет два совершенно различных физических процесса: собственно с ъ е м металла (в нашем случае тепловой процесс) и у д а л е н и е из активной зоны продуктов обработки (как будет показано ниже, в нашем случае действует физический механизм возникновения от тех же импульсов-разрядов ударных и акустических волн, очищающих зазор).

Волны, возникающие в узком и протяженном междуэлектродном зазоре, образуются в результате воздействия на рабочую жидкость разрядов, вызывающих ее пиролиз, бурное газообразование и, как результат, образование в зазоре «эвакуационных вихрей» и течений, выносящих продукты эрозии за пределы обработки. Очевидно, чем больше скорость образования канала разряда, его диаметр, а также количество газов и чем меньше затрачивается на это энергии разряда, тем эффективнее действует механизм эвакуации. Таким образом, роль **рабочей жидкости** является основной не на первой тепловой фазе процесса (известно, что единичный съем металла из лунки в воздухе не меньше, чем в масле), а на второй — «очистительной». Поэтому требования к рабочей жидкости должны вытекать главным образом из условия получения наиболее эффективным образом эвакуационных течений, а также обеспечения захвата частиц и охлаждения электродов. Таким образом, выходные технологические характеристики опре

деляются соотношением и взаимодействием двух процессов, объединенных в едином физическом механизме размерной обработки. В частности, при прочих равных условиях производительность обработки определяется скоростью менее эффективного процесса. Обычно лимитирующим становится механизм распространения ударных волн, не справляющийся с эвакуацией продуктов эрозии.

Физические условия осуществимости размерного съема металла определили, таким образом, важнейшие элементы электроэрозионной установки — генератор импульсов, регулятор подачи, рабочую жидкость и их главные характеристики. Последующие условия, в известной мере, являются производными и уточняют отдельные стороны процесса.

УСЛОВИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Припуск с заготовки может быть удален двумя способами.

1. Путем задания заготовке и инструменту такого движения, при котором «режущая» часть последнего рядом последовательных приближений (представляющих собой отдельные фазы предварительной и окончательной обработки детали с последовательно увеличивающейся точностью) обойдет, в конечном счете, всю поверхность будущего изделия; форма изделия определяется, таким образом, кинематикой или уравнением движения инструмента и заготовки. Движение формообразования включает в себя и движение, обуславливающее съем металла, и движение подачи. Направление съема металла при этом должно совпадать с касательной к направлению движения. На этом принципе основано формообразование ряда процессов механической обработки.

2. Путем копирования формы инструмента (представляющего собой зеркальное изображение будущего изделия) в заготовке. При этом необходимо только одно поступательное движение инструмента (или заготовки), обеспечивающее его внедрение в заготовку. Направление съема металла (или деформации) при этом должно совпадать с направлением поступательного перемещения или с нормалью к обрабатываемой поверхности. На этом принципе основано формообразование при обработке давлением (объемная штамповка), а также формообразование при электроискровой и электроимпульсной обработках.

Наконец, комбинированные методы сочетают в себе оба способа формообразования. Перемещение фасонного инструмента по определенному закону позволяет получить форму изделия, не совпадающую ни с формой инструмента, ни с направлением относительно движения (например, точение фасонными резцами, а также электроэрозионная обработка методом обкатки).

Поскольку объемное формообразование путем копирования исходной формы инструмента составляет основу электроимпульс-

ного (и в ряде случаев электроискрового) способа, рассмотрим физические условия, определяющие такую обработку.

Первым условием является наличие такого физического процесса, при котором направление съема металла совпадало бы с направлением движения инструмента и в то же время было бы нормально к поверхности обработки. Следовательно, фасонный инструмент должен перемещаться только поступательно (параллельно самому себе) и при этом каждая его точка должна «обрабатывать» элементарные участки заготовки, лежащие на одной оси¹.

Вторым условием возможности копирования является так называемая избирательность процесса, т. е. наличие зависимости элементарного съема μ от расстояния S между участками взаимодействующих поверхностей инструмента и заготовки $\mu = f(S)$. Эта зависимость может быть линейной и непрерывной. Например, для электрохимического копирования в первом приближении можно получить равенство

$$\mu_i = kIt = k \frac{U}{R_i} t = k_1 \frac{U}{S_i} t = \frac{k_2}{S_i}, \quad (\text{II. 9})$$

где k, k_1, k_2 — коэффициенты;

I — ток;

t — время;

U — напряжение на электродах;

R_i — сопротивление на i -м участке;

S_i — зазор, соответствующий сопротивлению R_i .

Элементарный съем μ_i , таким образом, обратно пропорционален расстоянию между элементарными участками заготовки и инструмента. При непрерывной зависимости всегда существует взаимное влияние соседних участков, находящихся на близких расстояниях, что нарушает линейность и точность копирования. Отсюда стремление максимально сближать электроды, для того чтобы увеличить относительное различие между S_i и S_{i+1} , поэтому и корректируют размеры электродов, учитывая при этом в некоторой мере возможность искажения формы.

Для электроэрозионного формообразования зависимость $\mu = f(S)$ прерывистая и нелинейная. Полагая, что элементарный съем пропорционален энергии импульса, получим

$$\mu = kw_s = k \left[\int_0^T uidt \right] \bar{\varphi}(S), \quad (\text{II. 10})$$

¹ Очевидно, что при механическом резании (точении, фрезеровании, сверлении) чисто объемное копирование невозможно, так как для физического процесса резания требуется не только поступательное (движение подачи), но и вращательное движение. Наоборот, объемная штамповка по принципу формообразования сходна с разновидностями эрозионной обработки, основанными на электрическом генерировании импульсов.

где w_s — энергия единичного импульса;
 u, i — мгновенные значения напряжения и тока импульса;
 $\bar{\varphi}(S)$ — единичная функция, обладающая следующими свойствами:

$$\left. \begin{array}{l} S > S_0 \\ \text{при } S < S_k \end{array} \right\} \begin{array}{l} \bar{\varphi}(S) = 0; \\ \bar{\varphi}(S) = 0, \end{array} \quad (\text{II. 11})$$

S_0 — максимальный зазор, при котором процесс съема может начаться;

S_k — минимальный зазор, при котором процесс съема металла прекращается.

Поведение функции $\bar{\varphi}(S)$ в интервале от S_0 до S_k будет рассмотрено в гл. V. Отметим, что при прямоугольном импульсе напряжения в этом интервале $\bar{\varphi}(S) = 1$.

Очевидно, дискретная зависимость (II. 11) позволяет исключить влияние соседних участков на съем, как бы близкими по расстоянию к инструменту они не были. Если будет осуществлен элементарный съем с участка i -го слоя, имеющего координату S_i , то эта координата тотчас же после съема возрастет до $S_i > S_0$; поэтому следующий элементарный съем состоится в том же слое, но в другой точке $S_{i+1} < S_0$. После того, как будет снят весь слой i , аналогичный процесс будет со слоем k , и так далее, до тех пор, пока заготовка не примет форму, обратную форме инструмента.

Выше было установлено, что подвод энергии через канал разряда позволяет концентрировать большие мощности в малом объеме и на достаточно малой элементарной площадке заготовки. Оказывается, что электрический разряд обладает также свойствами, необходимыми для формообразования методом копирования, т. е. позволяет осуществить съем металла в направлении поступательного движения инструмента и обладает свойством избирательности, описываемым единичной функцией $\bar{\varphi}(S)$. Действительно, при $S > S_0$ разряд отсутствует: $\bar{\varphi}(S) = 0$, так как не сформирован канал сквозной проводимости; при $S = S_0$ нарушается электрическая прочность между инструментом и заготовкой и возникает канал разряда. Далее в интервале $S_0 — S_k$ происходит съем металла (зависимо или независимо от S , что определяется системой генерирования и формой разряда). При $S \leq S_k$ наступает короткое замыкание, и процесс съема прекращается: $\bar{\varphi}(S)_{s=s_k} = 0$.

Комбинированный метод формообразования и формообразование только за счет движений инструмента и заготовки также могут быть осуществлены при использовании в качестве «инструмента» электрического разряда. Однако при этом только частично или совсем не используется ценное свойство разряда — дискретная избирательность по расстоянию.

С физической точки зрения процесс обработки заключается в непрерывном производстве и удалении из зоны обработки частиц металла и других продуктов эрозии. Обоим процессам соответствуют различные физические явления:

а) явление электрической эрозии в импульсном разряде, имеющее, в свою очередь, две стороны — электрическую, связанную с возбуждением в жидкой диэлектрической среде разряда, и тепловую, обусловленную воздействием разряда на поверхность электрода-заготовки и преобразованием его энергии в тепло, собственно и приводящее к элементарному съему металла из лунки, и

б) явление возбуждения в жидкой среде ударных и акустических волн, также имеющее электрическую сторону, связанную с возникновением в жидкой среде высокотемпературного канала разряда и выделением им энергии, и гидродинамическую сторону, обуславливающую закономерности распространения волн в объеме зазора и его самоочищение.

Отсюда следует, что импульсный электрический разряд является причиной и источником двух различных физических явлений, единство которых составляет основу электроэрозионной обработки. Поэтому последовательно рассмотрим электрическую, тепловую и гидродинамическую стороны процесса.

Электрические процессы в эрозионном промежутке, развиваясь во времени, последовательно проходят следующие стадии.

Первая стадия — подготовка и образование канала сквозной проводимости между наиболее близко расположенными участками инструмента и изделия (начальная стадия разряда — фаза малого тока). Механизм образования канала еще не окончательно ясен, однако он, по-видимому, включает в себя вытягивание вдоль силовых линий электрического поля мостиков из проводящих частиц, находящихся в межэлектродной жидкости во взвешенном состоянии. При определенном критическом напряжении пробоя нарушение диэлектрической прочности масляной пленки, отделяющей частицы друг от друга (микроконденсатор), происходит скачкообразно, и весь мостик оказывается проводящим. Ток, проходящий через мостик, уменьшает его сопротивление, увеличивая соответственно величину тока до тех пор, пока мостик не взрывается, оставляя ионизированный, хорошо проводящий канал-шнур, способный пропустить ток большой силы.

В этой стадии имеет место нагрев канала, бурная ионизация и увеличение его диаметра со скоростью, соответствующей скоростям распространения ударной волны. Изменение диаметра канала разряда, протекающего при атмосферном давлении во времени, приближенно пропорционально $\sqrt[3]{t}$ или $\sqrt[3]{t^2}$ в зависимости от того, как выделяется энергия в канале разряда: мгновенно

или равномерно¹. Диаметр канала при малых межэлектродных расстояниях и пробое в жидкой диэлектрической среде (т. е. в условиях электроэрозионной обработки) зависит также от материала электродов, в парах которых канал расширяется.

Качественной характеристикой изменения диаметра канала разряда в период начальной стадии при разных силах тока может служить рис. 4*. Из графика следует, что диаметр канала резко нарастает в самый начальный период порядка 10^{-7} — 10^{-6} сек от 0,1—0,2 до 1—1,5 мм. Далее в интервале 10^{-6} — 10^{-5} сек диаметр канала практически стабилизировался. Диаметр канала зависит (хотя и менее, чем пропорционально) также от тока (при $I \approx 60$ а

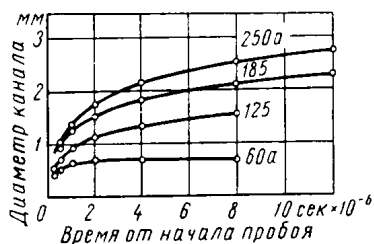


Рис. 4. Изменение во времени диаметра канала искры при атмосферном давлении (по Хайхему и Мику)

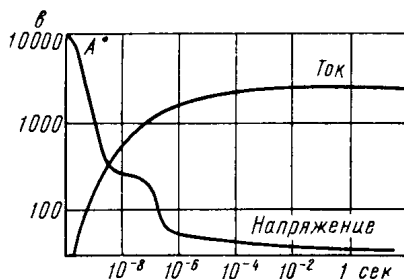


Рис. 5. Изменение после пробоя напряжения и тока между двумя электродами (по Самервиллу)

по прошествии 10^{-6} сек диаметр канала достиг примерно 0,5 мм, а при $I \approx 250$ а 1,2 мм). Приведенные цифры могут изменяться в зависимости от условий, однако они указывают на порядок величин и характеризуют переходную неустойчивую начальную стадию разряда, называемую искровым разрядом. Эта стадия разряда является переходной между пробоем и установившимся дуговым разрядом, хотя дуговой разряд может развиваться из тлеющего, минуя искровую стадию. Но в тех случаях, когда дуговому разряду предшествует пробой, между ним и установившейся дугой будет период существования переходного искрового разряда. Кроме времени, в течение которого заканчивается неустойчивый период искрового разряда, он, как и другие стадии разряда, характеризуется свойственными ему величинами падения напряжения (рис. 5)**. Период времени от $t = 0$ до $t \approx 10^{-6}$ сек характерен для искровой стадии разряда: падение напряжения изменяется примерно от 180 до 100 в через $0,5 \cdot 10^{-7}$ сек. В условиях электроискровой обработки (с медными электродами и средой — трансфор-

¹ С. И. Драбкина, ЖЭТФ, 21, 473 (1951).

* J. B. Higham and J. M. Meek, Proc. Phys. Soc. B63, 633 (1950).

** Д. М. Самервилл. «Электрическая дуга», ГЭИ, 1962.

маторным маслом) падение напряжения на искровом разряде* после пробоя составило 90 в и в момент окончания искровой стадии (через 10^{-4} сек) упало до 30 в, т. е. нижний предел совпадает уже с падением напряжения на дуговом разряде. Ход вольт-секундной характеристики $u_s(t)$ искрового разряда (первая полуволна) описывается уравнением, соответствующим обычным условиям электроискровой обработки:

$$u_s \approx \left[0,7 \exp \left(-2,4 \frac{t}{T_1} \right) + 0,3 \right] U_{сн}, \quad (II. 12)$$

где $U_{сн}$ — напряжение начала искродуговой стадии разряда ($\sim 90-50$ в);

T_1 — продолжительность первой полуволны напряжения.

Таким образом, первая стадия разряда включает в себя две фазы — фазу пробоя, занимающую период порядка 10^{-8} — 10^{-7} сек, и фазу неустойчивого искрового разряда, переходящего в стадию искродугового разряда и подготавливающего появление устойчивого дугового разряда. Искродуговая фаза занимает период времени примерно до 10^{-4} сек, после чего (а обычно значительно раньше, в зависимости от величины тока, проходящего через канал разряда) наступает конец неустойчивости, диаметр канала стабилизируется, падение напряжения приближается к величинам, характерным для дуги. В переходную искровую стадию энергия из канала разряда выделяется преимущественно на аноде, которому отдают свою энергию тормозящиеся электроны.

Начальная фаза пробоя ни по времени существования, ни по весьма малой энергии, затрачиваемой в этот период, не может влиять непосредственно на величину съема металла с электрода. Однако эта стадия очень важна для последующего развития процесса, так как она определяет вид единичной функции $\bar{\varphi}(S)$, влияет на величину межэлектродного зазора, частично на длительность импульса и на многие другие существенные стороны процесса обработки. Пусть генератор импульсов вырабатывает импульсную э. д. с., состоящую из синусоидальных импульсов (рис. 6), описываемых уравнением $e = E_m \sin \omega t$.

Примем близкую к действительной линейную зависимость между напряжением пробоя и межэлектродным зазором:

$$e = kS. \quad (II. 13)$$

* Точнее затянутый искровой разряд называть искродуговым разрядом, так как при увеличении времени существования искры она на конечном участке уже обладает свойствами не переходной стадии, а устойчивого дугового разряда, а падение напряжения становится равным начальному (30—35 в) падению напряжения на коротком импульсном дуговом разряде.

При зазоре, большем S_0 , соответствующем напряжению E_m , пробой не возникнет. С другой стороны, при зазоре S_k , меньшем, чем может существовать последующая стадия дугового разряда, процесс также не установится. В интервале $S_k - S_0$ длительность импульса в зависимости от зазора может изменяться в пределах $t_{\min} - t_{\max}$, или

$$\frac{\pi}{2\omega} < t_u < \frac{\pi}{\omega} - \frac{1}{\omega} \arcsin(kS_k). \quad (\text{II. 14})$$

Обычно отношение $\frac{e_k}{E_m} = \frac{S_k}{S_0} \ll 0,2$. Поэтому длительность синусоидального импульса при изменении зазора может откло-

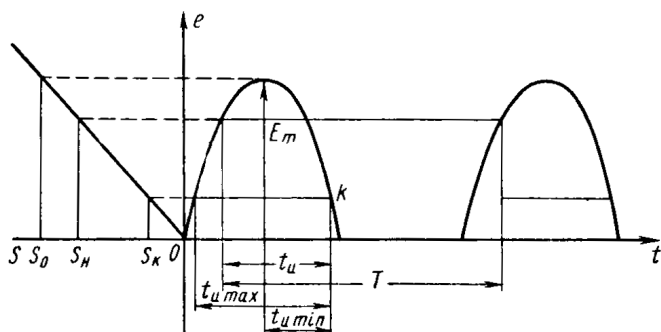


Рис. 6. К расчету влияния напряжения пробоя на длительность фронта импульса

няться от среднего значения приблизительно на $\pm 25\%$. При этом скважность изменится в том же отношении, а частота останется неизменной.

В действительности эти отклонения еще меньше, так как импульсы, генерируемые машинными и электронными независимыми генераторами, имеют значительно более крутой фронт, чем синусоидальный импульс. Только в магнитонасыщенных генераторах импульс близок к синусоидальному, и там колебания длительности импульса достигают указанных значений. Таким образом, говоря о независимости параметров импульса от зазора, следует иметь в виду технический и относительный смысл этого определения¹.

Первая стадия процесса началась пробоем и закончилась формированием искродугового разряда. Время его существования и высокие параметры тока и напряжения (сотни ампер, десятки —

¹ При экспоненциальном импульсе, вырабатываемом в зависимом релаксационном генераторе $e = E_m [1 - \exp(-t/RC)]$, изменение зазора приводит не только к более сильному изменению длительности и скважности импульса, но и в десятки раз — частоты импульсов.

до сотни вольт) делают искродуговой разряд уже энергетическим потребителем и преобразователем энергии электрического поля в тепловую. Следовательно, уже первая стадия заканчивается съемом некоторого количества материала электродов. Если для электроискровой обработки эта стадия является завершающей, то для электроимпульсной — начальной, после окончания которой подготовляются условия для съема больших количеств материала в физических условиях, соответствующих дуговой форме электрического разряда.

Вторая стадия — стадия дугового разряда, большой энергии и большого съема металла. В эту стадию одновременно проходят электрические процессы в дуговом разряде, тепловые процессы в электродах, обуславливающие съем металла и гидродинамические процессы, очищающие зазор.

Рассмотрим некоторые общие свойства дугового разряда и методику расчета электрической цепи с нелинейным элементом — электрической дугой в цепи импульсного тока.

Из рис. 5 следует, что дуговой разряд начинается при падении напряжения $u_s \leq 30$ в, чему соответствует интервал времени от пробоя (включая всю искродуговую стадию) примерно 10^{-5} — 10^{-4} сек. Ток принимает установившееся значение, и его изменение обусловлено только ходом кривой питающего напряжения. Диаметр канала разряда также стабилизируется. Характерной чертой дугового разряда является неравномерное распределение электрического поля в зазоре между электродами, например, скачки потенциала вблизи анода (анодное падение напряжения ΔU_a) и катода (соответственно катодное падение напряжения ΔU_k), обусловленные наличием возле электродов пространственных зарядов и условиями прохождения тока через границу металл—плазма. Обычно $\Delta U_a < \Delta U_k$ и может в некоторых видах дуговых разрядов отсутствовать.

В понятие «дуговой разряд» входит чрезвычайно большое количество видов и разновидностей электрических разрядов, чему соответствует также множество определений этого вида разряда. Однако наиболее характерными признаками дуги являются устойчивость ее параметров, малое падение напряжения, высокие плотности тока, наступающие по прошествии переходных состояний, в частности, искрового разряда.

Кроме анодного и катодного падений напряжения, часть напряжения ложится на область столба разряда. В условиях электроимпульсной обработки расстояние между электродами колеблется от сотых до десятых долей миллиметра. На этом протяжении суммарное падение напряжения в зависимости от материалов электродов и вида рабочей жидкости составляет несколько десятков вольт (см. ниже). На долю ΔU_k приходится, по данным ряда исследователей, малое падение напряжения порядка 10 в (против 300 в при тлеющем разряде), и это является одним из характерных

признаков дугового разряда. В дугах с металлическим анодом анодное падение составляет, по данным Самервилла, величину, превышающую 12 в. Таким образом, на долю столба разряда остается падение напряжения ΔU_i от нескольких до десятка вольт. Эти цифры ориентировочны, так как они получены в различных условиях, но дают верный порядок. По-видимому, падение напряжения в столбе имеет значение для гидродинамических процессов, поскольку энергия в столбе разряда, определяемая ΔU_i , передается непосредственно жидкости и способствует образованию ударной волны так же, как и расширение самого канала разряда.

Дуговой разряд имеет наибольшую плотность тока на электродах (до сотен тысяч ампер на квадратный миллиметр) по сравнению с другими формами разряда. Температура канала разряда при атмосферном давлении достигает 5000°C , а в особых условиях — $50\,000^\circ\text{C}$. Статическая вольт-амперная характеристика имеет падающий характер, с увеличением силы тока напряжение на электродах падает. Однако динамическая характеристика при быстром изменении тока (высокочастотный разряд) может быть и возрастающей.

Электрическая дуга через линию связи питается импульсным напряжением от генератора, поэтому важно для расчета генератора, режимов обработки и системы авторегулирования уметь рассчитывать электрические цепи, содержащие нелинейные сопротивления типа дуги. Излагаемый ниже метод касается только дуг, имеющих место при электроимпульсной обработке.

Экспериментальные исследования таких дуг показали, что для встречающихся практически возможных сочетаний материалов электродов, среды и полярности вольт-временная характеристика дугового разряда остается (с точностью $\pm 10\text{--}15\%$) параллельной оси времени независимо от длительности импульса, напряжения источника питания и сопротивления в цепи генератора, т. е. $U_s \approx \text{const}$ (рис. 7). В качестве расчетной величины напряжения на эрозионном промежутке принимается его значение $U_{sm} \approx \text{const}$ при максимуме тока.

В табл. 2—4 приведены значения U_{sm} для различных материалов электродов, полярности и рабочей жидкости.

Расчет электрической цепи, питающей инструмент и заготовку, требует решения дифференциальных уравнений для контура,

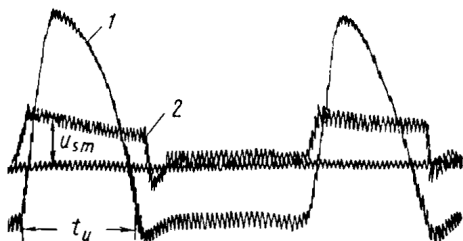


Рис. 7. Типичная осциллограмма напряжения и тока импульсного дугового разряда в диапазоне средних частот:

1 — ток; 2 — напряжение на промежутке

Таблица 2

Значения U_{sm} в в для различных материалов заготовки

Полярность	Армко- железо	Сталь 45	Сталь У8	Сталь У11	Алюми- ний	Медь	Твердый сплав ВК8	Твердый сплав Т15К6
Прямая (заготовка — анод)	24	25	22	25	30	21	25	24
Обратная (заготовка — катод)	30	31	31	27	30	21	22*	24

Примечание. Материал второго электрода (инструмента) — медь, среда — трансформаторное масло.

Таблица 3

Значения U_{sm} в в для различных материалов инструмента

Полярность	Медь	Медно- графит- ная ком- позиция МГС	Алюминий	Латунь ЛС59
Прямая	22	25	Процесс неустойчив 33	23
Обратная . . .	31	34		Процесс неустойчив

Примечание. Материал второго электрода (заготовки) — сталь У8, среда — трансформаторное масло.

Таблица 4

Значения U_{sm} в в для различных жидкостей

Полярность	Транс- форма- торное масло	Инду- стриаль- ное масло 12	Керосин	Техниче- ская вода	Дистил- лирован- ная вода
Прямая	22	23	23	20	18
Обратная	31	32	28	14	13

содержащего нелинейные элементы — вентили и эрозионный промежуток. Если выразить ток через вольт-амперную характеристику

$$i = \frac{1}{r_d} (U_{sm} = \text{const}), \quad (\text{II. 15})$$

где r_d — сопротивление дуги, то дифференциальное уравнение становится нелинейным и его трудно решить. Проще ввести в урав-

нение вольт-временную характеристику $U_s = f(t) = \text{const}$. Уравнение при этом остается линейным, так как падение напряжения на эрозионном промежутке можно представить как постоянную э. д. с. с обратным знаком.

Таким образом, при расчетах режимов в цепях, содержащих эрозионный промежуток, приближенно можно принимать, что в проводящую часть периода напряжение на эрозионном промежутке постоянно, равно величине U_{sm} и направлено противоположно направлению тока.

Дифференциальное уравнение для простейшего контура, содержащего активное сопротивление, индуктивное сопротивление, эрозионный промежуток и вентиль:

$$e_0 - U_{sm} = R_i + X \frac{di}{d\theta}, \quad (\text{II. 16})$$

где R — суммарное активное сопротивление обмотки генератора, цепи нагрузки и прямого сопротивления вентиля;

X — индуктивное сопротивление цепи и генератора;

θ — временной угол.

В этом случае

$$i = \exp(-\rho\theta) \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{e_0 - U_{sm}}{X} \exp(\rho\theta) d\theta, \quad (\text{II. 17})$$

где $\rho = \frac{R}{X}$; θ_0 — момент начала электрического разряда (e_0 соответствует напряжению пробоя).

Значение угла θ_k , при котором ток равен нулю, определяется из уравнения

$$\int_{\theta_0}^{\theta_k} (e_0 - U_{sm}) \exp(\rho\theta) d\theta = 0. \quad (\text{II. 18})$$

В общем случае аналитическое выражение кривой e_0 может быть задано совокупностью кусочно-непрерывных функций e_{0l} , каждая из которых аппроксимирует кривую э. д. с. на соответствующем интервале. Приняв, что начало первого интервала соответствует началу разряда, решение для l -го интервала можно записать в виде

$$i_l = \exp(-\rho\theta) \left[\int_{\theta_{l-1}}^{\theta} \frac{e_{0l} - U_{sm}}{X} \exp(\rho\theta) d\theta + C_l \right]; \quad (\text{II. 19})$$

$$\theta_{l-1} < \theta < \theta_l.$$

Определяя постоянные интегрирования C_l из начального $i(\theta_0) = 0$ и гранично-временных условий $i_l(\theta_l) = i_{l+1}(\theta_l)$, получаем

$$i_l = \exp(-\varrho\theta) \left[\sum_{s=1}^{l-1} \left(\int_{\theta_{s-1}}^{\theta_s} \frac{e_{0s} - U_{sm}}{X} \exp(\varrho\theta) d\theta + \int_{\theta_{l-1}}^{\theta_\kappa} (e_{0l} - U_{sm}) \exp(\varrho\theta) d\theta \right) \right]. \quad (\text{II. 20})$$

Момент окончания импульса тока, если ток изменяет свой знак на l -м интервале, может быть найден из уравнения

$$\sum_{s=1}^{l-1} \left[\int_{\theta_{s-1}}^{\theta_s} (e_{0s} - U_{sm}) \exp(\varrho\theta) d\theta + \int_{\theta_{l-1}}^{\theta_\kappa} (e_{0l} - U_{sm}) \exp(\varrho\theta) d\theta \right] = 0. \quad (\text{II. 21})$$

Этот метод позволяет найти значения тока, являющиеся важной характеристикой технологического режима, получить выражение для токов при замене действительных импульсов напряжения эквивалентными прямоугольными импульсами.

Так как при напряжении на эрозионном промежутке, меньшем примерно U_{sm} (точнее, напряжения в конце разряда), разряд прекращается, общая его продолжительность будет меньше времени от начала пробоя до перехода э. д. с. через ноль. Продолжительность синусоидального импульса (см. рис. 6) с учетом уравнений (II. 12) и (II. 14)

$$t_u = \frac{\pi}{\omega} - \frac{1}{\omega} \arcsin kS_n - \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{U_{sm}}{E_m} \quad (\text{II. 22})$$

или

$$t_u = t_{ux} - (t_{un} + t_{uk}), \quad (\text{II. 23})$$

где t_{ux} — продолжительность импульса напряжения холостого хода;

$t_{un} = \frac{1}{\omega} \arcsin kS_n$ — время, соответствующее началу разряда при зазоре S_n (номинальном);

$t_{uk} = \arcsin \frac{U_{sm}}{E_m}$ — время, соответствующее окончанию импульса напряжения.

Таким образом, вследствие нелинейности дуги продолжительность импульса тока (в отсутствие индуктивности) меньше продолжительности импульса напряжения холостого хода. Это следует иметь в виду при переходе от параметров импульса генератора к параметрам режима станка.

Тепловые процессы в электродах. Электрическая дуга в условиях электроимпульсной обработки является высококонцентрированным преобразователем электрической энергии в тепловую. Действительно, объемная концентрация мощности в этом преобразователе достигает 300 квт/мм^3 , а энергия — до $30\,000 \text{ Дж/мм}^3$. Так как в основе процесса съема лежат тепловые воздействия на обрабатываемую заготовку, следует ожидать, что скорость съема металла с нее и эрозионная стойкость инструмента (или, другими словами, интенсивность полезного съема металла с одного электрода и вредного — с другого), характер механизма эвакуации, удельный расход энергии и выходные технологические характеристики зависят от теплофизических параметров процесса (теплопроводности, теплоемкости, температуры и теплоты плавления и испарения, удельного веса и удельного электросопротивления материалов электродов, вида среды, в которой размещены электроды, и ее физико-механических характеристик), а также от продолжительности, амплитуды, скважности и частоты импульсов, зазора между электродами, условий эвакуации продуктов эрозии и ряда других факторов.

Эрозионная стойкость или обрабатываемость различных материалов может, при прочих постоянных условиях обработки, оцениваться по критерию фазового превращения Палатника, пропорционального времени расплавления некоторого объема металла:

$$\Pi = c\gamma\lambda T_n^2, \quad (\text{II. 24})$$

где c — теплоемкость;

λ — коэффициент теплопроводности;

γ — удельный вес;

T_n — приведенная температура плавления.

Так как критерий пропорционален времени, то он указывает, какой из двух металлов, находящихся в одинаковых условиях, раньше или позже нагревается до температуры плавления. Так как разрушение металла электрода связано с переводом его в жидкое состояние, то для учета скрытой теплоты плавления в формулу введена приведенная температура плавления. Таким образом, критерий Π является относительным, или физическим коэффициентом электроэрозионной стойкости. Чем больше Π , тем при равных условиях выше эрозионная стойкость и соответственно ниже обрабатываемость данного металла.

Энергия, выделяющаяся в эрозионном промежутке, распределяется между анодом, катодом и внешней средой. При зазорах, меньших $0,1 \text{ мм}$, более 90% энергии поступает на электроды и только порядка 10% теряется в канале разряда (по данным Зингермана и Каплана). О распределении энергии между электродами можно также судить по относительному съему металла с электрода каждой полярности. Экспериментально обнаружено преимущественное разрушение одного из электродов, т. е. оказалось,

что эффект электрической эрозии полярен. Однако полярность электрической эрозии зависит не только от полярности электродов, но и является сложной функцией материалов электродов, вида рабочей жидкости, вида электрического разряда и его параметров, а также (при механическом генерировании) относительной скорости одного из электродов. В условиях электроимпульсной обработки (при дуговом разряде; стальных электродах-заготовках; медных, алюминиевых и графитированных электродах-инструментах; индустриальном, соляровом или трансформаторном масле в качестве рабочей жидкости и др.) наибольший относительный съем металла имеет место в том случае, когда инструмент включен в качестве анода, а заготовка — в качестве катода. При сохранении указанных условий неизменными перемена полярности электродов на противоположную приводит к относительному снижению съема с анода. На основании этого можно сделать вывод, что в данных условиях электроимпульсной обработки большая часть энергии выделяется на катоде (заготовке), меньшая — на аноде (инструменте). Величина зазора, как указывалось, не очень сильно влияет на долю энергии, приходящуюся на электроды. Это подтверждается еще и тем, что при изменении зазора в самом широком диапазоне перераспределение энергии не сказывалось на знаке полярности электрической эрозии.

При электроискровой обработке оптимальная полярность включения электродов — прямая, т. е. заготовка — анод, а при электроимпульсной — обратная, т. е. заготовка — катод. Прямая полярность есть следствие использования искровой или искродуговой формы разряда. Так как сразу после пробоя наступает искровая — искродуговая стадия разряда, переходящая затем в дуговую, то при электроимпульсной обработке теоретически оптимальная полярность включения электродов должна была быть на этой стадии прямая, а на последующей дуговой стадии — обратная. Однако поскольку искродуговая стадия занимает в общей продолжительности импульса несколько процентов, то превалирует влияние обратной полярности, специфической для электроимпульсного способа.

Тепло, подводимое к электродам, можно представить в виде двух источников энергии — объемных и поверхностных.

Объемные источники, т. е. источники тепла, выделяющиеся в каждой единице объема электрода, появляются в результате эффекта Джоуля-Ленца, вызванного протеканием тока в объеме электрода. Поскольку величина нагрева в этом случае определяется объемной плотностью тока, а последняя резко уменьшается по мере удаления от поверхности соприкосновения элементарного участка с каналом разряда, наибольшие температуры будут у поверхности.

Поверхностные источники возникают в результате передачи тепла из канала разряда на поверхность соприкосновения

канала разряда с электродом. Проникновение тепла с поверхности соприкосновения в глубь элементарного объема происходит вследствие теплопроводности.

Величина съема металла анода и катода зависит от теплофизических констант этих материалов. Эти же константы определяют и долевое участие в съеме металла поверхностных и объемных источников. Так, у материалов, обладающих большой теплопроводностью, при прочих равных условиях будет увеличена доля поверхностных источников, так как большее количество тепла успеет перейти от поверхностных слоев к нижележащим. Наоборот, для объемных источников теплопроводность играет меньшую роль, так как проходящий ток выделяет тепло на всем объеме.

Если при расчетах элементарного съема объемные источники, ввиду их малого влияния (несколько процентов) можно не учитывать то, что при анализе погрешностей, связанных с тепловыми деформациями электродов, они являются определяющими.

Упрощенную идеализированную тепловую задачу¹ можно свести к одномерной, допуская, что электрод является однородным полубесконечным телом и распределение температуры зависит только от глубины (координаты Z) и времени. Изменение теплофизических коэффициентов от температуры не учитывается.

Принимая во внимание действие только поверхностных источников, введем $v(t)$ — тепловую функцию источника, характеризующую энергию, передаваемую единице поверхности электрода в единицу времени ($\text{кал}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$). Расположим начало координат на поверхности электрода и обозначим температуру в начале координат в момент времени $t = 0$ через $T(0, t)$. Пока температура не достигла температуры плавления T_n , температурное поле внутри электрода может быть описано следующей функцией:

$$T(z, t) = \frac{1}{2(\pi c \lambda \gamma)^{1/2}} \int_0^t v(\tau) (t - \tau)^{-1/2} \exp \left[-\frac{z^2}{4a(t - \tau)} \right] d\tau, \quad (\text{II. 25})$$

где z — расстояние точки в глубине электрода от начала координат;

t — время от начала разряда;

c, λ, γ, a — теплоемкость, плотность, теплопроводность и температуропроводность материала электрода.

На основании уравнения (II. 25), а также учитывая дополнительные соотношения, на которых здесь не будем останавливаться, рассмотрим тепловые процессы на электродах — нагрев и удаление металла, не принимая пока во внимание силы, эвакуирующие

¹ Ниже кратко описываются некоторые результаты, вытекающие из решения тепловой задачи и экспериментов, выполненных в совместных работах ЛИКИ и ЭНИМС (см. Зингерман, Лившиц, Сосенко «О физических факторах, определяющих производительность электроимпульсной обработки металлов», ЭНИМС, ОНТИ, 1962, и др.).

расплавленный металл. При этом выделим все возможные физические механизмы протекания тепловых процессов, чтобы впоследствии, на основании экспериментальных данных, определить, какой из механизмов или их сочетание имеют место в конкретных условиях электроимпульсной обработки. Таких механизмов процесса можно наметить пять.

1. Поверхность участка электрода нагревается до температуры плавления T_n , и металл в капельном состоянии по мере плавления непрерывно удаляется; температурное поле поверхностного слоя будет перемещаться в глубь электрода. Так как толщина расплавленного слоя будет вследствие непрерывного удаления расплава весьма мала, возможно использование для расчета основного уравнения (II. 25). Время t_{nA} , необходимое для достижения на поверхности электрода температуры плавления T_n , как и следовало ожидать, пропорционально критерию Палатника и обратно пропорционально квадрату мощности источника:

$$t_{nA} = \frac{\pi c \gamma \lambda T_n^2}{v^2} = \frac{\pi}{v^2} P. \quad (\text{II. 26})$$

Общая толщина h_1 расплавленного и удаленного в течение времени существования импульса t_u слоя

$$h_1 = \frac{v^2 t_u - \pi P}{2q_{жс} v \gamma}, \quad (\text{II. 27})$$

где $q_{жс}$ — теплосодержание жидкого металла.

Этот процесс энергетически наиболее эффективен, так как исключает перегрев свыше T_n удаленного металла.

2. Поверхность участка нагревается до T_n , но металл капельно удаляется одновременно в самом конце разряда.

В процессе нагрева расплав скопляется в лунке и перегревается свыше T_n , не доходя, однако, до температуры испарения. Энергетически этот процесс менее эффективен, чем первый.

3. Поверхность участка нагревается еще до окончания разряда до температуры, при которой имеет место «спокойное испарение», капельный выброс расплава отсутствует.

Этот процесс еще менее энергетически эффективен, так как удаляемый металл перегревается до температуры испарения.

4. Наряду со «спокойным испарением» имеет место капельный выброс в конце разряда.

Так как часть металла удаляется еще в жидком, капельном состоянии, то энергоемкость этого процесса несколько ниже, чем предыдущего, но выше первого и второго процессов.

5. Имеет место только взрывное испарение (при кратковременном мощном источнике). Капельный выброс вообще отсутствует.

Скорость поступления энергии в электрод весьма велика, происходит бурное испарение, носящее характер взрыва. Поскольку

пары металла удаляются практически одновременно, нет дополнительного перегрева паров и возможен захват капелек металла.

Процесс более эффективен, чем постепенное спокойное испарение (в третьем процессе).

Если на график нанести теоретические зависимости глубины

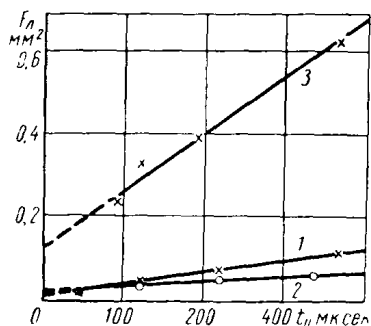


Рис. 8. Зависимость сечения разрядного канала или площади лунки от длительности импульса при постоянной мощности источника:

1 — у стального анода, $U=300$ вт;
2 — у стального катода, $U=300$ вт;
3 — у стального катода, $U=1870$ вт

лунки h_i от продолжительности разряда t_u для постоянной мощности источника v (с учетом поправки на расширение диаметра разрядного канала, рис. 8 и при условии, что в каждом данном случае действует только один из возможных пяти механизмов процесса), то получим на графике $h_i = f(t_u)$ площадь, разбитую на зоны преобладающего действия одного из механизмов процесса (рис. 9). Экспериментальная кривая, проходящая через эти зоны, позволит определить, при каких t_u и v происходит реальное сочетание различных механизмов и удельный вес каждого из них.

Из рис. 10 следует, что экспериментальная кривая 2Э практически совпадает с кривыми 4 и 3 и резко расходится с кривой 1. Следовательно, для стального электрода при мощности импульса 300 вт и длительности до 400 мксек действует

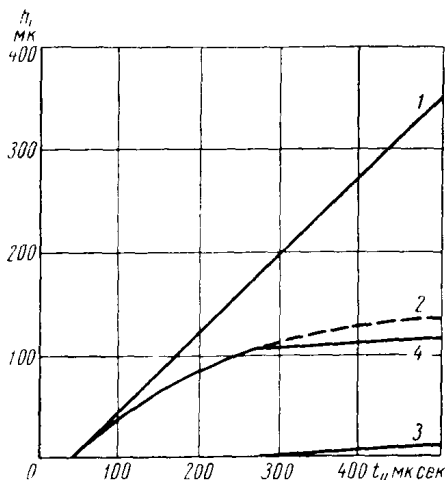


Рис. 9. Зависимость толщины удаленного слоя металла от длительности импульса ($v = 10^5$ кал/см² сек, электрод алюминиевый):

1 — 4 — кривые, соответствующие механизмам процесса

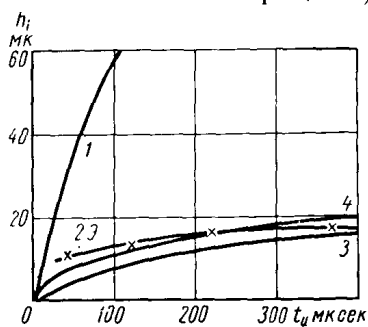


Рис. 10. Зависимость толщины удаленного слоя металла от длительности импульса (катод стальной, мощность 300 вт):

1, 3, 4 — кривые, соответствующие механизмам процесса; 2Э — экспериментальная кривая

в основном механизм «спокойного испарения» (третий процесс) и частично имеет место выброс мелких капель в течение и в конце разряда (участок кривой 2Э между кривыми 1 и 4). Резко изменилась картина при мощности 1870 *вт* (рис. 11). Экспериментальная кривая лежит между кривыми процессов 4 и 1, т. е. действительный процесс характеризуется постепенным выбросом металла за счет «спокойного испарения» по мере накопления достаточного расплавленного слоя.

Сравнение кривых на рис. 10 и 11 показывает, что реальный механизм процесса зависит не только от длительности, но и от

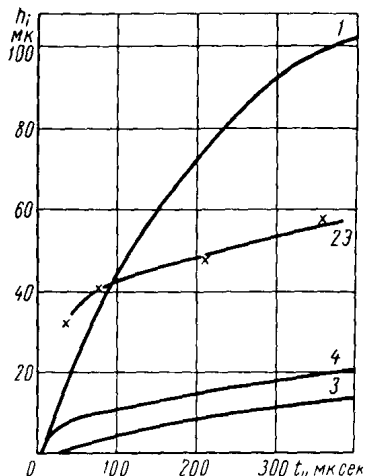


Рис. 11. То же, что на рис. 10, но при мощности импульса 1870 *вт*

мощности импульса. Так, при увеличении мощности импульса примерно в 6 раз (с 300 до 1870 *вт*) объем удаленного металла возрос в 32 раза, что может быть объяснено только изменением физического механизма выброса и снижением (при мощности 1870 *вт*) энергоемкости процесса за счет большего приближения к механизмам капельного выброса (процессы первый и второй) вместо механизма спокойного испарения (процесс третий), превалировавшего при мощности 300 *вт*. Этот вывод подтверждается и результатами скоростной киносъемки, зафиксировавшей при мощности 1000 *вт* и более выброс вначале в виде струй паров, затем — в виде капель металла, а при мощностях 300 *вт* — только светящуюся зону, характеризующую «спокойное испарение».

В этих примерах отсутствует механизм взрывного испарения, так как для того чтобы он проявился, необходимо соблюсти условия такой концентрации мощности во времени, при которой процессы теплоотвода играли бы малую роль. Математически это условие выражается неравенством

$$v > \frac{4,6q_n\gamma\sqrt{a_1}}{\sqrt{t}} \text{ кал/см}^2\text{сек}, \quad (\text{II. 28})$$

где q_n — теплосодержание паров металла;

γ — удельный вес;

a_1 — коэффициент температуропроводности жидкого металла.

Для длительности импульса $t_u = 10$ *мксек* будет иметь место взрывное испарение стального электрода при мощности источника, большей $1,4 \cdot 10^6$ *кал/см*² *сек*. Соответственно при $t_u = 1$ *мксек* мощность источника должна возрасти примерно в 3 раза, до $4,5 \cdot 10^6$ *кал/см*² *сек*.

Увеличение скважности импульсов при постоянной средней мощности приведет к росту средней мощности импульса: при некоторой длительности $t_{икрит}$ будут соблюдаться условия взрывного испарения. Работа с большой скважностью характерна для электроискрового способа.

До сих пор рассматривались единичные лунки и воздействие на них единичных разрядов. Однако механизм процесса производства частиц сохраняет свои характерные черты и в реальных условиях массового воздействия импульсов на поверхность электродов.

О снижении энергоемкости в $\text{мм}^3/\text{дж}$ таких условиях при изменении (увеличении) длительности импульсов в широком диапазоне и при возможном исключении влияния эвакуации частиц из зазора свидетельствует график на рис. 12. На оси ординат отложен съем металла в миллиметрах кубических на один джоуль энергии, введенный в промежуток, а на оси абсцисс — длительность импульсов примерно от 50 до 5000 мксек . Если при $t_u = 100 \text{ мксек}$ на 1 дж затраченной энергии снимается примерно $0,005 \text{ мм}^3$, то при $t_u = 1000 \text{ мксек}$ — уже более чем в 2 раза больше ($0,0113 \text{ мм}^3/\text{дж}$).

Дальнейшее увеличение длительности импульса приводит к менее сильному снижению энергоемкости, поскольку уже начиная со 100 мксек и примерно до 500 мксек произошла в основном замена механизма «спокойного испарения» на более эффективный механизм размерного плавления и капельного удаления металла, специфичный для электроимпульсной обработки.

На рис. 13 показаны зависимости среднего съема металла на один разряд в функции не только длительности, но и средней мощности разряда, а на рис. 14 — в функции от энергии и длительности разряда. Оба семейства кривых получены на основании обработки данных от различных генераторов импульсов, работающих в диапазоне 100—1200 мксек . При постоянной мощности или энергии съем металла в зависимости от длительности импульса имеет максимум, который смещается в сторону больших длительностей при росте мощности или энергии импульса. Так, при энергии импульса 1 дж максимум съема наступает примерно при 500 мксек , а уже при энергии импульса 7,5 дж — при 650 мксек . При постоянной же длительности съем увеличивается с ростом энергии или мощности сначала монотонно-замедленно, затем зна-

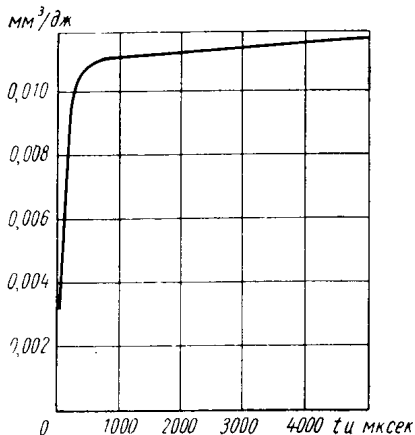


Рис. 12. Изменение съема металла на 1 дж затраченной энергии в зависимости от длительности импульса

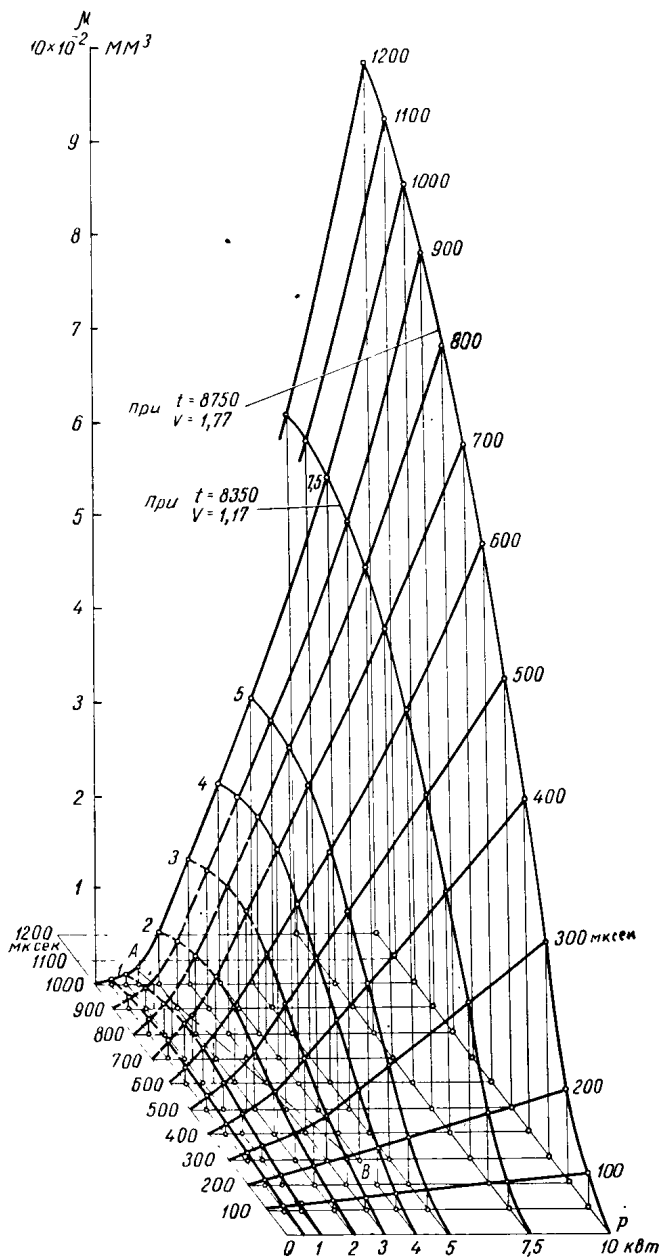


Рис. 13. Зависимость съема металла со стального катода на один разряд в зависимости от средней мощности и длительности разряда

чительно быстрее. Так, для $t_u = 1000$ мксек при увеличении мощности от 1 до 5 квт, т. е. в 5 раз, съем растет более чем в 10 раз, что свидетельствует об изменении механизма процесса и замене его

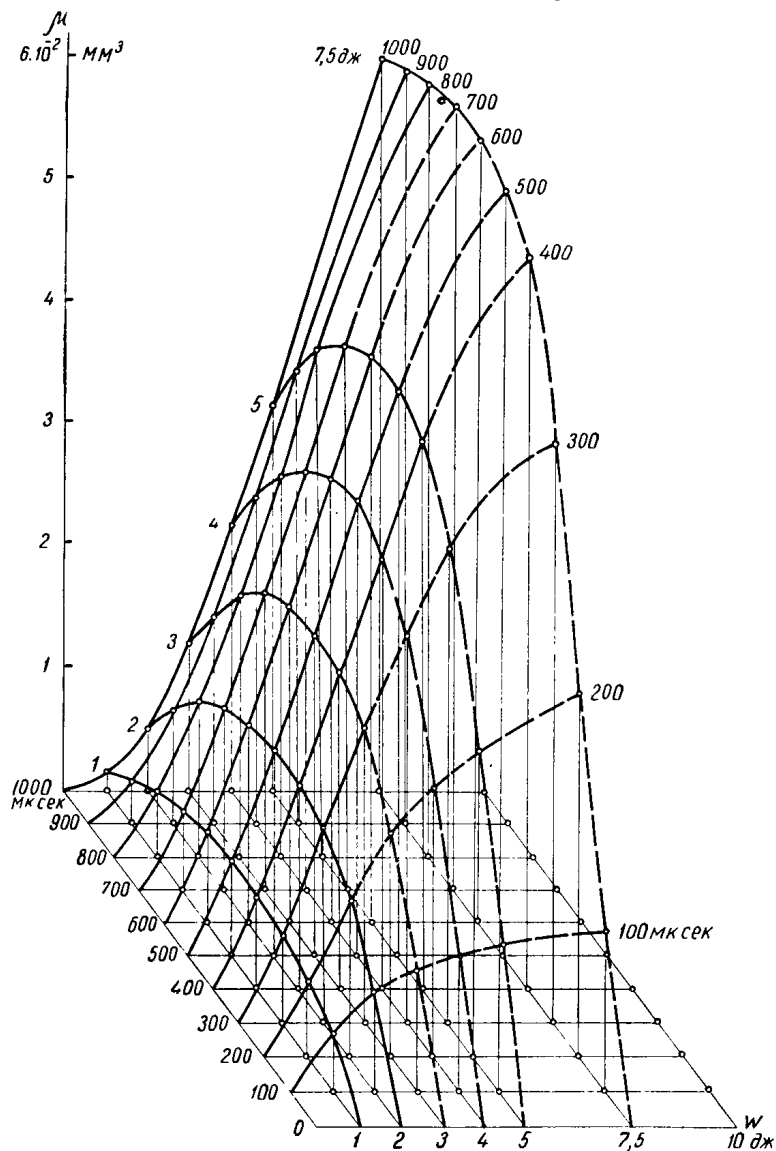


Рис. 14. То же, что на рис. 13, но в зависимости от энергии и длительности разряда

более эффективными по энергоемкости. На рис. 13 штрих-пунктирная линия AB , проведенная через точки изгиба поверхности $\mu(P, t_u)$, отделяет области с различным влиянием механизмов про-

цессов. В области с большими P и $t_{\text{д}}$ превалирует механизм капельного удаления металла из лунок с различной, все повышающейся степенью равномерности эвакуации металла. Указанные закономерности тем сильнее проявляются, чем больше длительность импульса.

Изложенное позволяет рассмотреть особенности искрового и дугового разрядов при эрозионной обработке. Долгое время считалось, что для проведения размерной обработки металлов необходима только искровая форма разряда; в отношении же дугового разряда рекомендовалось принимать меры, исключаящие его появление.

До появления электроимпульсного способа дуговые разряды использовались в системах с механическим генерированием импульсов — в электроконтактных и анодно-механических установках. В системах же электрического генерирования дуговой разряд был впервые применен в 1948 г. М. П. Писаревским, предложившим ввести в схему классического релаксационного генератора типа RC дополнительное сопротивление r в цепь разряда, превратив его в зависимый генератор RCr. Значение r подбирается таким, чтобы обеспечить протекание униполярного аperiodического разряда конденсатора. Чем выше индуктивность контура разряда, или чем меньше его емкость, тем большие величины сопротивления необходимо вводить в контур разряда для получения униполярного аperiodического импульса. Так как при уменьшении емкости и увеличении сопротивления резко падает энергия импульса и, следовательно, скорость съема металла, то в генераторе Писаревского необходимо значительно увеличить (до 700 — 1000 мкф) емкость при соответственном снижении критического сопротивления. Увеличение емкости и введение активного сопротивления обуславливают получение аperiodического импульса большей продолжительности и меньшей амплитуды, чем в электроискровых установках с генератором типа RC. Искродуговой разряд заменяется преимущественно дуговым. В результате этого изменяется тепловой баланс на электродах и, например, медный электрод-инструмент значительно меньше разрушается, будучи включенным анодом; изделие при этом является катодом, т. е. имеет полярность, обратную принятой в электроискровых установках.

Генератор RCr и осуществляемый на его основе дугоимпульсный способ имели ряд существенных недостатков по сравнению с генератором RC и классическим электроискровым способом: а) значительно приблизилась граница непрерывного тока. Чем больше сопротивление в контуре разряда, тем при больших сопротивлениях R и меньших токах в цепи заряда наступает переход импульсного процесса в непрерывный. Так как в генераторе RCr сопротивление в цепи разряда в десятки раз больше, чем в генераторах RC, то этот переход наступит значительно раньше. Этот недостаток принципиально не позволяет увеличить мощность

и производительность установок на генераторах RCr по сравнению с обычными искровыми установками; б) резкое снижение к. п. д. контура разряда вследствие потерь в дополнительном сопротивлении.

Максимальная скорость съема металла из-за первых двух недостатков снизилась по сравнению со скоростью съема электроискровой обработки примерно во столько же раз, во сколько снизился износ инструмента, т. е. в 5—10 раз. Снизилась также частота импульсов, обусловленная введением больших емкостей, вследствие чего чистота поверхности значительно хуже, чем в электроискровых установках.

Недостатки дугоимпульсного способа, казалось, подтвердили прогнозы о недопустимости использования при прошивочно-копировальных работах дугового разряда. Возможно, этим и объяснялось, что в течение четырех лет (с 1948 до 1950—1951 гг.) к идее дуговой обработки больше не возвращались. Вместе с тем, как стало ясно впоследствии, дугоимпульсный способ содержал полезные идеи, содействовавшие созданию электроимпульсного способа. Зависимый генератор униполярных импульсов RCr явился переходным типом между зависимым генератором знакопеременных импульсов RC (электроискровой способ) и классом независимых генераторов униполярных импульсов (электроимпульсный способ). При дуговой форме разрядов, следующих с малой скважностью, резко снижается амплитудное значение мощности и соответственно максимальная температура на электродах (температура в канале разряда снижается примерно с $10\,000$ — $11\,000^\circ\text{C}$ при искровом разряде до 4000 — 5000°C — при дуговом). Так как температура плавления металлов и сплавов значительно ниже, чем температура, получающаяся при искровом разряде, то при дуговом разряде резко снижается перегрев металла и переход его в парообразное состояние, т. е., иными словами, для широкого класса сталей и сплавов осуществляется энергетическое согласование электрических характеристик импульса с теплофизическими характеристиками металла изделия.

Первым следствием такого согласования явилось с н и ж е н и е э н е р г о е м к о с т и процесса, так как удаление металла до капельно-жидкого состояния требует меньших затрат энергии.

Вторым следствием явилось с н и ж е н и е и з н о с а электрода-инструмента, поскольку одновременно со снижением максимальной температуры на участке заготовки снизилась температура соответствующего участка инструмента. Оказалось также, что при более длительном дуговом разряде на поверхности инструмента успевала образовываться графитовая пленка, которая, как было выяснено впоследствии, защищала инструмент от эрозии. Так, медный инструмент снизил износ до 20 раз, а электрод из специального графитированного материала ЭЭГ — в сотни раз по сравнению с износом соответствующих материалов, но при искровой форме разряда.

Наконец, третьим важным следствием оказалась возможность резкого увеличения производительности при переходе к более продолжительным дуговым разрядам. Это обусловлено: а) увеличением непрерывности импульсного процесса за счет уменьшения скважности; при скважности 2 съем металла происходит в течение примерно 50 % времени обработки; в настоящее время удастся обеспечить скважность, близкую к единице (в то же время при скважности, типичной для электроискровой обработки, съем металла происходит в течение примерно 5—10 % времени); б) резким увеличением энергии единичного импульса, соответствующим ростом съема металла на один импульс; в) увеличением «эвакуационной» способности импульса, определяемой, как будет показано ниже, энергией импульса, что, в свою очередь, позволяет на один-два порядка повысить размеры обрабатываемых заготовок.

Физический механизм эвакуации продуктов эрозии. В процессе обработки в межэлектродную полость поступают частицы металла (с заготовки-катода), графита (из инструмента-анода), газообразные, жидкие и твердые продукты пиролиза рабочей жидкости (пределах и в меньшей степени предельные углеводороды, водород, азот, углекислый газ, окись углерода, парафины, смолы, сажа, лаки и др.). Общий объем продуктов эрозии, образующихся в единицу времени,

$$M_0 = M_{\kappa} + M_a + M_m + M_{ж} + M_g \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (\text{II. 29})$$

где M_{κ} , M_a — количество материала, снятого соответственно с катода и анода;

M_m — твердые; $M_{ж}$ — жидкие и M_g — газообразные продукты пиролиза рабочей жидкости.

На грубых режимах через промежуток в 1 сек может проходить свыше 1 г твердых и сотни миллиграмм газообразных продуктов. Различают два этапа эвакуации продуктов эрозии: из лунки и из межэлектродной полости.

Экспериментальные данные показывают, что выброс металла из лунки происходит только во время разряда. Частицы металла вылетают непрерывно небольшими порциями или прерывисто крупными порциями. Металл может находиться во всех трех фазах в зависимости от соотношения возможных механизмов процессов. Частицы, успевшие застыть до удара о препятствие, имеют обычно сферическую форму; наблюдаются полые частицы неправильной формы с острыми краями — все это, очевидно, результат взаимодействия жидкого металла с твердыми препятствиями, газами и т. д. От одного разряда появляются сотни, а иногда и тысячи частиц различного размера, подчиняющихся законам статистического распределения. С увеличением энергии импульса растет общее количество частиц, а кривая распределения смещается в сторону больших диаметров. Например, при энер-

гии, меньшей 3 дж, частиц диаметром более 70 мк не обнаружено. при энергии 3 дж имелась только одна частица, а при 22 дж — уже 32. Одновременно растет и максимальный диаметр частиц. С увеличением энергии импульса при постоянной длительности растет также роль более крупных частиц в очищении лунки. Так, при энергии 3 дж только 8% объема лунки освобождено частицами больших размеров, а при 45 дж — уже 75%. Эти данные говорят о том, что при малых энергиях основная масса металла удалялась в сильно диспергированном состоянии (испарение), а при больших энергиях — в виде крупных частиц (капельно-жидкая фаза).

Ряд гипотез, объяснявших эвакуацию металла из лунки действием электродинамических сил, вскипанием растворенного в металле газа и другими причинами, не получили экспериментального подтверждения и вошли в противоречие с наблюдаемыми фактами. Согласно гипотезе А. С. Зингермана природа сил, эвакуирующих металл из лунки, обусловлена микроскопическими неоднородностями, всегда имеющимися в металле и обладающими различными теплофизическими характеристиками. Образующийся в местах нахождения неоднородностей, расположенных ниже поверхности электрода, пар выбрасывает жидкий металл, находящийся выше этой зоны. Эта гипотеза объясняет зависимость механизма выброса металла от материала электрода и плотности мощности, поступающей в электрод, однако нельзя ее считать окончательно доказанной.

Не менее важную роль играет физический механизм эвакуации частицы из полости промежутка (второй этап эвакуации). Исследование этого механизма долгое время выпадало из поля зрения исследователей, хотя можно утверждать, что нельзя построить единую теорию процесса электроэрозионной обработки, не рассмотрев сложные и интересные явления, связанные с механизмом эвакуации продуктов эрозии из полости. Механизм и характеристики процесса эвакуации продуктов из полости определяют устойчивость процесса, зависимости между электрическими и технологическими параметрами, определяющими режим обработки, возможности и пути дальнейшей интенсификации процесса.

Под устойчивостью будем понимать способность сохранять в течение заданного промежутка времени непрерывный процесс съема металла и эвакуации продуктов эрозии, несмотря на возникновение в системе случайных или закономерных возмущающих воздействий. Если обозначить через Δp отклонение от какого-либо из определяющих процесс параметров, то условие устойчивости будет иметь вид

$$\lim_{t \rightarrow \tau} \Delta p(t) \leq \varepsilon, \quad (\text{II. 30})$$

где ε — малое, заданное значение параметра;
 τ — заданный интервал времени.

Это условие означает, что если система, выведенная из равновесия и будучи (после прекращения действия возмущающих сил) предоставлена самой себе, вновь вернется к установившемуся состоянию — исходному или новому, то такая система будет устойчивой в данном интервале. В общем случае устойчивость следует рассматривать в целом для системы генератор — станок (эрозионный промежуток или собственно процесс) — регулятор (подробнее см. в гл. V). Здесь ограничимся рассмотрением устойчивости собственно процесса и в той мере, в какой она связана с механизмом эвакуации из полости.

Если интервал времени τ в условии (II. 30) ограничить длительностью импульса $\tau \leq t_u$, а в качестве Δp считать, например, отклонение от падения напряжения на промежутке, то при несоблюдении условия (II. 30) возникнет неустойчивость в импульсе. Это означает, что по каким-либо причинам (отсутствие пробоя, несоответствия напряжений, зазоров, материалов электродов, среды, наличие участка так называемого шлакования и др.) единственный разряд не может быть инициирован, а если возникнет, то оборвется, не совершив требуемой полезной работы.

Если $\tau = nt_u$ соизмеримо с продолжительностью серии n импульсов и при этом условие (II. 30) также не соблюдается, то получим «локальную неустойчивость». Соблюдение условия (II. 30) при $t \rightarrow \infty$ означает, что система устойчива «в общем», в том числе «в импульсе» и «локально». Устойчивость «в общем» будет иметь место при соблюдении в заданном весьма большом интервале времени баланса вновь образующихся эвакуируемых продуктов эрозии. Если обозначить через M_e количество продуктов эрозии, которое может быть удалено при данных условиях в единицу времени (скорость эвакуации), то условие баланса запишется так:

$$M_0 \leq M_e \text{ мм}^3/\text{мин.} \quad (\text{II. 31})$$

Условие баланса, как правило, не может соблюдаться для мгновенных значений M_0 и M_e , так как это означало бы, что частица прямо из лунки удаляется за пределы зоны обработки, что наблюдается только при открытых электродах. Таким образом, моменты производства и полной эвакуации частиц сдвинуты во времени. Следовательно, эрозионный промежуток должен иметь емкость — «склад», в котором бы могли находиться небалансируемые продукты эрозии, не нарушая при этом локальной устойчивости. Действительно такой «склад» образуется поверхностями электродов; его емкость L определяется как произведение площади поверхности θ обработки на зазор:

$$L = \theta S. \quad (\text{II. 32})$$

Максимальная емкость L_0 будет при зазоре S_0 , соответствующем амплитуде импульса напряжения.

Очевидно, нарушение устойчивости произойдет раньше, чем заполнится максимальная емкость L_0 избытком неэвакуированных продуктов эрозии, так как слой неубранных частиц может инициировать на себя разряды, особенно в областях, где скорость эвакуации ниже, чем средняя в промежутке. Эти застойные области становятся местом нарушения локальной устойчивости. Если обозначить отношение критического объема застойной зоны, при котором нарушается локальная устойчивость, к максимальной емкости L_0 через коэффициент ψ , то максимально допустимое время работы в пределах локальной устойчивости

$$T_{\psi} = \frac{\psi L_0}{M_0}. \quad (\text{II. 33})$$

Таким образом, в течение времени T_{ψ} процесс обработки может проходить устойчиво при полном «выключении» механизма эвакуации. Если учесть, что за время заполнения емкости некоторое количество частиц будет все же эвакуировано, время локальной устойчивости увеличится:

$$T'_{\psi} = \frac{\psi L_0}{M_0 - M_s} = \frac{\psi \theta S_0}{M_0 - M_s}. \quad (\text{II. 34})$$

Нарушение локальной устойчивости заключается в возникновении в застойной зоне короткого замыкания. Поэтому легко измеряемая величина интервала между двумя короткими замыканиями t_k позволяет судить о величинах застойной зоны, условиях эвакуации и других факторах, являющихся переменными в течение одной технологической операции.

При $\psi = 1$

$$T'_{\psi} = T_0 = \frac{\theta S_0}{M_0 - M_s} \quad (\text{II. 35})$$

— неэлектрической «постоянной времени» процесса, пропорциональной максимальной емкости системы и обратно пропорциональной разности скоростей образования и эвакуации продуктов эрозии. Величина T_0 является постоянной для определенного режима обработки, т. е. разности скорости M_0 и M_s и данной площади поверхности. Таким образом, T_0 изменяется в течение всего процесса обработки и может служить одной из его характеристик.

При $M_0 = M_s \neq 0$ $T_0 = \infty$, т. е. система неограниченно устойчива «в импульсе», «локально» и «в общем».

Из условия (II. 35) можно найти время, в течение которого между двумя заторможенными электродами образуются вследствие эрозионного съема эквидистантные поверхности, находящиеся на расстоянии S_0 . Это время получило название «времени выхаживания»:

$$T_{\text{вых}} = \frac{(S_0 - S_n) \theta}{M_0 - M_s} = T_0 \left(1 - \frac{S_n}{S_0} \right), \quad (\text{II. 36})$$

где S_n — номинальный зазор в момент начала торможения электродов.

Рассмотрим последовательно процесс естественной эвакуации продуктов эрозии, исключив влияние каких-либо внешних сил (прокачки рабочей жидкости, вибрации или вращения электродов, продувки газа, периодической промывки зазора и т. п.), т. е. в условиях естественной устойчивости.

Тепловое действие электрического разряда сопровождается возбуждением механической ударной волны в жидкости. Центром волны становится высокотемпературный ионизированный канал разряда, на границах которого идет пиролиз рабочей жидкости с образованием большого количества газообразных продуктов. Высокая энергонасыщенность канала разряда — тысячи и десятки тысяч джоулей в кубическом миллиметре, большие градиенты температур, также достигающие тысяч и десятков тысяч градусов на 1 мм, малые времена развития процесса создают ситуацию, подобную взрыву. Этот взрыв проходит в узкой щели, ограниченной эквидистантно расположенными фасонными поверхностями, находящимися, как правило, в глубине «колодца», сообщающегося со свободной поверхностью через вертикальные, расположенные по периметру обрабатываемой поверхности щели. Щели заполнены рабочей жидкостью, а на дне «колодца» — еще и остатками неэвакуированных частиц, так как только в редких случаях (разряд между острием и плоскостью, обработка деталей с очень большим отношением периметров к площади и т. п.) частица может быть выброшена за пределы зоны обработки тем же импульсом, которым она была порождена.

Возникающие в межэлектродной полости волны распространяются с большой скоростью, захватывая газы, частицы металла и твердые продукты пиролиза. Двигаясь, жидкость захватывает на своем пути с местных «складов» частицы и перемещает их либо на новые «склады», либо за пределы активной зоны. Можно представить несколько видов ударных волн, отличающихся происхождением и эвакуационным эффектом. Первый вид — ударная волна, порожденная разрядом, поразившим непосредственно основной металл заготовки; это основной вид разряда, имеющий наибольшую эффективность по съему металла и создающий одновременно ударную волну, перемещающую как «собственные», порожденные ею же частицы, так и частицы, находящиеся на пути движения. Последующие виды разрядов могут попадать на одну или группу частиц, свободно лежащих на поверхности или приваренных (частицы могут быть металлические, графитовые, покрытые сажей, лаками или чистые); разряды через частицы могут либо достигать основного металла, либо нет, съем при этом будет колебаться от нуля до величин, получаемых при разрядах первого вида. Соответственно этому ударные волны от разрядов различного типа будут иметь различную интенсивность.

С точки зрения эвакуации более эффективны будут разряды по группе (кучке) частиц, так как избыток неизрасходованной

на сьем металла энергии разряда перейдет в механическую энергию; кроме того, эвакуацию группы частиц, лежащих в застойной области вблизи препятствия, можно представить посредством ударной волны, возникшей в центре «кучки». Таким образом, может быть два крайних типа разряда: рабочий «тепловой», поражающий непосредственно основной металл, осуществляющий сьем, эвакуирующий как «свои», так и «чужие» частицы, и разряд чисто «эвакуационный», повторно диспергирующий и перемещающий частицы, но не дающий полезного съема металла. Все остальные виды разрядов располагаются между этими крайними типами. Электрические характеристики этих типов разряда мало отличаются друг от друга.

Начальные скорости частиц, как показывает скоростная киносъемка, достигают нескольких километров в секунду. При этом начальная скорость оказывается приблизительно пропорциональной энергии разряда. Изменение длительности импульса при неизменной энергии, т. е. изменение мощности при постоянной энергии, мало сказывается на начальной скорости и энергии эвакуируемой частицы.

Проследим примерный путь некоторой частицы от лунки до вылета наружу. Частица, вылетевшая из лунки, вероятнее всего соударяется с противоположным электродом, отражается от него, возможно, повторно ударяется и отражается от первого электрода, пока не потеряет начальную энергию и не осядет на некотором расстоянии от начального положения. Далее возможны перемещения частицы в случайных направлениях под влиянием последующих ударных волн от других разрядов. В зависимости от многих факторов, в том числе от формы и размеров полости, энергии импульса и других, частица может быть выброшена первым разрядом, описывать в межэлектродной полости сложные траектории, многократно попадать под действие повторных диспергирующих разрядов и, в конце концов, быть удаленной из активной зоны. Движения частицы напоминают броуновское движение под влиянием случайных ударов молекул.

Действительно, процесс эвакуации — стохастический процесс с некоторым детерминизмом, обусловленным более облегченным преимущественным распространением ударных и акустических волн к выходу из активной зоны.

Эвакуация газообразной составляющей продуктов эрозии происходит в принципе так же, как и твердых частиц. Пузырьки газа, подвергаясь действию ударных волн, хаотично перемещаются в зазоре, сталкиваются друг с другом и препятствиями, дробятся, вытесняют значительные объемы жидкости. Скорость движения газовых пузырьков значительно ниже, чем твердых частиц. Так, по данным А. Б. Красюка пузырек газа объемом 22 мм^3 удаляется из межэлектродной полости диаметром 10 мм и глубиной 5 мм за 0,01 сек, т. е. со средней скоростью примерно 1 м/сек. При такой

скорости эвакуации газовый пузырь находится в зазоре некоторое время, в течение которого возникают новые разряды и поступают новые порции газа, создавая этим возможность возникновения разрядов не в жидкости, а в газовой среде. Последнее может привести к приварке электродов, к появлению шлакования и снижению энергии попутной ударной волны. Для эвакуации газов из емкости может быть достаточно подъемной силы, действующей на пузырек газа, находящийся в жидкости. Помехи в эвакуации газов может оказать форма электродов. Во внутренних глухих полостях скапливаются газы, которые могут при попадании раскаленной частицы давать «хлопки», поэтому полезно из таких полостей дать специальный выход газам.

Жидкие или растворимые составляющие (смолы, парафины, ароматики) циркулируют вместе с основной рабочей жидкостью, представляя с ней одно целое и изменяя постепенно ее свойства. Эти изменения заключаются в увеличении зольности, выгорании органического вещества, уменьшении количества газов на единицу выделяемой энергии, снижении эвакуационного действия ударной волны.

В свете изложенного принудительная прокачка жидкости через зазор при имеющихся место скоростях движения (десятки сантиметров или метры в минуту) предназначается не только для эвакуации частиц, но и для возобновления жидкости, имеющей непосредственно в рабочей зоне обедненный состав, и помогает одновременно эвакуации газов. Чрезмерное увеличение скорости прокачки нарушает механизм мостикообразования и устойчивого возбуждения разряда, что, в свою очередь, приводит к необходимости уменьшения зазора, ухудшению эвакуации и ликвидирует таким образом эффект от увеличения давления прокачки. Разрешение этого противоречия может быть достигнуто применением периодической, импульсной прокачки высокого давления, действующей одновременно с процессом съема.

Стойкость электрода-инструмента определяется не только различием критерия Π для обеих электродов, но и защитным действием отлагающейся на нем пленки из кристаллического графита — продукта пиролиза жидкости. Пленка отлагается на поверхности электрода и выполняет при этом защитные функции при соблюдении трех условий: а) температура участка электрода не ниже температуры пленкообразования ($\sim 700^\circ\text{C}$); б) в зоне участка имеются в достаточном количестве продукты пиролиза, из которых «строится» пленка и в) имеется достаточное время, чтобы на участке успела отложиться пленка требуемой для данного режима толщины. Эти условия соблюдаются тем лучше, чем продолжительней импульс и ниже частота. При увеличении частоты можно сохранить малый износ, если управлять пространственно-временным распределением разрядов таким образом, чтобы они инициировались кучно, «гнез-

дами», обеспечив этим соблюдение трех условий уже не для одного импульса, а «гнезда» в целом. Основное влияние на «гнездование» разрядов оказывает скважность: чем она ниже, тем больше вероятность возникновения в ионизированной и возмущенной зоне участка серии последовательных разрядов. В предельном случае, при $q \rightarrow 1$ начинается шлакование и возникает стационарная дуга, что эквивалентно слиянию всех разрядов «гнезда» в один. Благодаря съему металла в зоне «гнезда» зазор растет до значений, при которых вероятность пробоя падает, и «гнездо» начинает постепенно смещаться, обходя всю поверхность электрода. Для более тонкого регулирования «гнездованием», особенно при высоких частотах и устранения опасности шлакования, принимают специальные меры, обеспечивающие при применении генераторов ЭНИМС расширение диапазона безызоной электроимпульсной обработки до десятков тыс. *имп/сек.*

Влияние мощности и энергии импульса на износ определяется при наличии «гнездовой» защиты теплофизическими характеристиками двухслойной системы «пленка — материнский материал электрода». Здесь возможны случаи: пленка имеет такую толщину, что при данной энергии а) разрушится только пленка, б) разрушится также и материнский материал, в) разрушится под пленкой только материнский материал и г) происходит одновременно или со сдвигом во времени и восстановление и разрушение пленки, причем при совпадении этих процессов в пространстве износ минимален. Случаи а, б, в можно рассматривать как статическую, а г — как динамическую картину одного и того же явления.

В общем случае для однослойной системы можно подобрать такую форму импульса (например, с пологим фронтом), что нарастающий тепловой поток будет с той же интенсивностью отводиться от поверхности электрода: эрозия электрода будет равна нулю.

Для электрода-заготовки, наоборот, необходимо создать резко нарастающий тепловой поток (например, прямоугольный импульс), чтобы снизить (при приближении к адиабатическому процессу) потери тепла в тело электрода. Двухслойная система и есть одно из средств, обеспечивающих резкую тепловую асимметрию на электродах при одном и том же электрическом импульсе.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЯ

Указанная взаимосвязь является основной при проектировании технологических процессов, она позволяет объединить комплекс электротехнологических характеристик вокруг исходных, задаваемых чертежом, размеров изделия и его формы.

Первая группа характеристик получила название пространственной диаграммы «ток—площадь—скорость съема» или диаграммы IFM.

В качестве определяющей величины принято среднее значение тока, протекающего через электроды. С физической точки зрения диаграмму следовало строить не в функции тока, а в функции энергии, вводимой в промежуток за единицу времени, или средней мощности, поскольку именно эти величины определяют и съём, и эвакуацию металла. Однако легко показать, что среднее значение тока весьма близко следует за средним значением энергии или мощности, отнесенных к одному и тому же интервалу времени. Учитывая легкость измерения и контроля среднего значения тока, во всех технологических расчетах применяют именно этот параметр; электроимпульсные станки оснащены магнитоэлектрическими амперметрами и вольтметрами, по показаниям которых ведется обработка.

Среднее значение энергии за период T или средняя мощность P_{Scp} связаны со средним значением тока:

$$P_{Scp} = \frac{1}{T} \int_0^T U_S i dt = U_{sm} \frac{1}{T} \int_0^T i dt = U_{Sm} I_{cp}. \quad (\text{II. 37})$$

Так как U_{Sm} практически постоянно для данных материалов электродов и среды, зависимость (II. 36) позволяет заменять значением среднего тока там, где это удобно, среднюю мощность или энергию. Близкая к пропорциональной зависимость между энергией и скоростью съема также может в технологических расчетах заменяться эквивалентной ей зависимостью «ток — скорость съема».

Рассмотрим две группы зависимостей.

1. «Скорость съема — площадь обработки» при постоянной энергии (токе или средней мощности) импульса. Энергии импульса соответствует в данных условиях определенная энергия ударной волны и некоторая средняя «длина свободного пробега» частицы, на которой израсходуется полученная ею начальная энергия. Очевидно, l_{cp} является функцией многих параметров: зазора, вида рабочей жидкости, в частности, ее способности генерировать газы, материала электродов и других, однако если они постоянны, то l_{cp} тем больше, чем выше начальная энергия или ток. Если площадь обработки такова, что l_{cp} больше возможного пути или радиуса эвакуации ρ , то частица будет удалена за пределы активной зоны своим же разрядом, и повторного диспергирования частиц не произойдет. Очевидно, для заданной энергии импульса можно найти такую площадь обработки, у которой критический радиус эвакуации будет равен средней длине свободного пробега частицы. Тогда скорость съема, не ограничиваемая механизмом эвакуации, будет максимально возможной для данных условий.

В этих условиях (т. е. в условиях постоянной энергии), казалось бы, дальнейшее уменьшение площади обработки и радиуса эвакуации ниже критического уже не влияло бы на скорость съема, поскольку эвакуация осуществляется и так беспрепятственно, а допустимое увеличение плотности тока лимитировалось бы только нагревом электродов объемными источниками тепла. В действительности же в этих условиях начинает оказывать сильное влияние газообразная составляющая продуктов эрозии. Так как объем выделяемых газов пропорционален энергии разряда и он по условию остается неизменным, то при уменьшении площади наступит момент, когда газовый пузырь займет существенную часть объема зазора и в пределе совсем его заполнит. Это существенно изменит ход процесса: во-первых, возникнут разряды в газовой, а не в жидкой среде, частицы металла начнут привариваться к электродам, ухудшится охлаждение электродов и создадутся, наряду с очагами массового оплавления заготовки, участки шлакования и, во-вторых, в газовой среде резко снизится энергия ударных волн и соответственно уменьшится длина свободного пробега, которая снова станет меньше критического радиуса эвакуации, т. е. скорость съема после достижения наибольшей величины, соответствующей оптимальному соотношению энергии импульса и площади, при дальнейшем снижении площади будет падать.

Увеличение (при той же энергии) площади обработки сверх оптимального значения также приведет постепенно к падению скорости. Для того чтобы частица могла быть выведена за пределы активной зоны, она должна в конце «свободного» пробега пополнить запас энергии либо от «собственного» диспергирующего ее разряда, либо от ударных волн других разрядов — на это необходима дополнительная энергия и тем большая, чем больше площадь обработки и соответствующий ей радиус эвакуации.

Итак, зависимость «скорость съема — площадь обработки» при постоянной энергии (или среднем токе) имеет экстремальный характер. В диапазоне меньших площадей (по отношению к точке максимума) определяющим является механизм эвакуации газов, а в диапазоне больших — механизм эвакуации твердых продуктов эрозии.

Вероятность возникновения разряда в газовой среде уменьшается пропорционально росту площади, поскольку объем газов, определяемый энергией импульса, неизменен.

2. «Скорость съема — ток (энергия)» при постоянной площади обработки. С увеличением тока скорость съема и эвакуация будут вначале расти примерно пропорционально энергии импульса. При некотором значении тока рост скорости съема замедлится по той же причине, что и в первой паре характеристик: полость зазора начнет заполняться газами. При чрезмерно больших для данной площади энергиях наступит момент, когда газы совсем вытеснят жидкость,

скорость съема станет равной нулю и одновременно прекратится дальнейшее газообразование. Жидкость снова заполнит полость, снова начнется процесс съема и газообразования, т. е. описанный цикл повторяется. Таким образом, при больших величинах энергии и малых площадях возникают автоколебания процесса, характерные циклическим изменениям скорости съема при резком снижении ее среднего значения. Следовательно, рассматриваемая зависимость также имеет экстремальный характер. Совокупность всех зависимостей и составит пространственную диаграмму IFM; семейства этих диаграмм рассматриваются в гл. III.

Площадь обработки является не единственной геометрической характеристикой, определяющей скорость съема. Важными характеристиками являются также форма обрабатываемой полости и ее глубина. Влияние формы трудно учесть каким-либо одним параметром. Приблизительно можно представить влияние формы через горизонтальный радиус эвакуации, определяемый как средневзвешенное расстояние, которое должна пройти частица для выхода из активной зоны:

$$\rho = \frac{1}{F} \int_0^F X_{\min} dF, \quad (\text{II. 38})$$

где $X_{\min}$ — минимальное расстояние, которое должна пройти частица в горизонтальном направлении для выхода на вертикальную трассу.

Для круга $\rho = \frac{R}{3}$, прямоугольника со сторонами a и b ($a > b$) $\rho = \frac{b}{4}$. Для сложнофасонной полости ρ определяется по участкам. Вторым параметром, сопряженным с ρ , является вертикальный радиус эвакуации h , равный высоте «колодца», со дна которого должна быть эвакуирована частица. Если зависимость от $M = f(h)$ весьма велика, то от ρ скорость съема начинает заметно изменяться только при весьма больших отношениях параметра к площади обработки. Однако влияние ρ может быть выражено через увеличение допустимой плотности тока (чем меньше ρ , тем больше плотность тока). Физический механизм влияния ρ и h на скорость съема определяется описанными выше процессами эвакуации. При выборе электротехнологических характеристик по пространственной диаграмме необходимо их относить к определенным значениям ρ и h (см. гл. III).

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Анализ тепловых и гидродинамических процессов показывает, что при данных материалах электродов тот или иной механизм процесса определяется, в конечном счете, параметрами импульсов: длительностью, частотой, скважностью, мощностью, энергией.

В свою очередь, механизм процесса определяет не только энергетические, но и технологические характеристики процесса. Следовательно, в основе эффективного использования процессов электроэрозионной обработки должно лежать:

1) оптимальное согласование энергетических и электрических характеристик импульса с теплофизическими характеристиками металла изделия, определяющее скорость съема, удельный расход энергии, величину зоны структурных изменений, чистоту поверхности и другие технологические факторы. Для осуществления такого согласования и предусматривается регулирование в требуемых пределах, порознь или совместно, частоты, длительности, амплитуды или скважности импульсов;

2) согласование электрических режимов с размерами и формой изделия, т. е. определение оптимальных электротехнологических режимов обработки.

В обоих случаях согласование заключается в выборе для данной технологической операции и заданных материалов заготовки и инструмента оптимальных параметров импульсов. Удобно выразить основные параметры, определяющие физический механизм процесса, через частоту импульсов f и скважность. Длительность импульсов t_u обратно пропорциональна f и q :

$$t_u = \frac{1}{fq}. \quad (\text{II. 39})$$

Если принять мощность установки (т. е. среднюю мощность, вводимую в эрозионный промежуток P_{Scp}) постоянной, что является условием для сравнения различных вариантов процесса, то амплитуда импульса тока I_m , максимальная мощность P_{Sm} и энергия W_s импульса могут быть также выражены через f и q :

$$I_m = K_1 q; \quad (\text{II. 40})$$

$$P_{Sm} = P_{Scp} q = K_2 q; \quad (\text{II. 41})$$

$$W_s = P_{Scp} q t_u = \frac{K_3}{f}, \quad (\text{II. 42})$$

т. е. амплитуда импульса тока и максимальная мощность импульса пропорциональны скважности, а энергия импульса — обратно пропорциональна частоте. Таким образом, совокупность характеристик, определяющих физический механизм процесса и согласование энергетических, электрических, технологических и электротехнологических режимов электроэрозионной обработки, можно представить как комплексную частотную характеристику процесса. Иными словами, можно выразить все главные характеристики процесса, как функцию частоты и скважности.

Рассмотрим общий ход частотных характеристик процесса.

Верхний предел производительности для каждой частоты лимитируется возможностью эвакуации диспергированных частиц опре-

деленных размеров. Чем выше частота и меньше энергия импульса, тем меньше энергия ударных волн и эвакуационная способность импульса. Таким образом, можно полагать, что для каждой данной частоты и скважности существует свой предел по скорости съема. Этому пределу должны соответствовать физические условия, важнейшие из которых определенная амплитуда импульса напряжения, оптимальная площадь обработки, подходящие вид рабочей жидкости и условия эвакуации продуктов эрозии, обеспечение естественной или искусственной устойчивости процесса. Общая

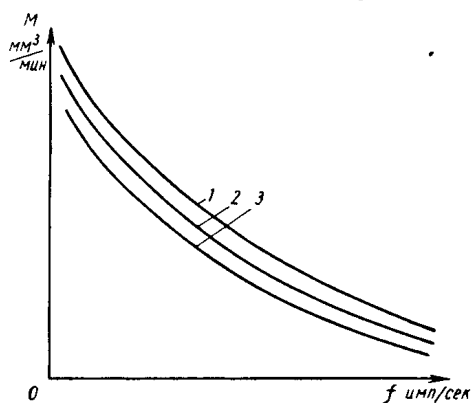


Рис. 15. Частотная характеристика скорости съема (качественная) $U_1 > U_2$; $q_2 > q_1$; 1 — q_1, U_1 ; 2 — U_1, q_2 ; 3 — q_2, U_2

тенденция такова, что с ростом частоты предельно возможная для данной частоты и физических условий введения процесса производительность падает. Такой же вид будет иметь частотная характеристика по скорости съема для разных значений скважности: чем меньше скважность ($q_1 < q_2$), тем при большей частоте наступает предельная скорость съема (рис. 15). С увеличением амплитуды импульса напряжения ($U_1 > U_2$) возрастает зазор, появляется возможность эвакуации большего количества металла —

предельная скорость съема также растет. Аналогичным образом влияют и другие факторы, особенно мероприятия по повышению искусственной устойчивости (вибрация, прокатка, орбитальное движение, релаксация электрода и др.).

Далее с ростом частоты должна увеличиваться энергоемкость процесса. Здесь возможны два направления развития процесса: когда 1) рост частоты сопровождается увеличением скважности или сохранением такой ее величины, при которой возникают условия для взрывного испарения. Энергоемкость возрастает вследствие замены менее энергоемкого механизма процесса более энергоемким; 2) рост частоты сопровождается уменьшением скважности. Энергоемкость возрастает даже в рамках единого механизма процесса за счет большей степени диспергирования металла (при капельном механизме — вследствие дробления на более мелкие капли, при паровом механизме — большее распыление металла и т. д.). В конце концов процесс пойдет по первому направлению, но при большей частоте.

Изменение частотных характеристик происходит в соответствии с изменением определяющих их ход механизмов теплового процесса (на высоких частотах — паровой, на низких — капельный меха-

низм; в промежуточных областях — сочетание различных механизмов) и процесса эвакуации ударными волнами (уменьшение на высоких частотах количества первичных импульсов за счет роста вторичных, расходуемых на повторное диспергирование).

Неограниченное увеличение частоты приведет в конце концов к такому состоянию, когда диспергированная частица в силу ограничений скоростей механического движения не сможет быть удалена из зоны обработки действием маломощных ударных волн. В настоящее время достигнуты максимальные частоты в пределах до 1—2 *мгц*, однако процесс идет уже в области искусственной устойчивости и скорость съема составляет доли кубических миллиметров в минуту.

С другой стороны, неограниченное уменьшение частоты ведет к непрерывному нагреву и расплавлению не локальных объемов металла, а заготовки в целом. Минимальной частоте 50 *имп/сек* соответствует скорость съема 15—25 000 *мм³/мин*. Для получения еще более высоких скоростей съема нужно применять более низкие частоты — 25 *имп/сек* (а также $\frac{50}{3} = 16\frac{2}{3}$ *имп/сек* и т. п.), хотя это приводит к усложнению генераторов импульсов.

В соответствии с частотной характеристикой устанавливаются номинальные частоты и номинальные токи генераторов импульсов.

В табл. 5 даны рекомендованные ЭНИМСом номинальные значения частот и токов для среднечастотных и высокочастотных генераторов.

Таблица 5

Номер модели станка	Класс частоты поверхности на наибольшей частоте	Номинальные токи в <i>a</i> при номинальных частотах в <i>имп/сек</i>					
		400±5%	1000±5%	8000±5%	66 000±5%	440 000±±2,5%	1 760 000±±2,5%
0	9—10	—	—	—	—	6,3	2,5
I	8—9	—	25	25	—	6,3	—
II, III	7	100	100	63	25	2	—
IV—VI	6	250	160	100	63	—	—

Верхний предел частоты установлен 1750 *кГц* ± 2,5% при наибольшей силе тока 2,5 *a*. Верхний предел силы тока при частоте 400 *имп/сек* равен 250 *a*, т. е. в 100 раз ниже.

В низкочастотном диапазоне ряд токов при частотах 50 и 100 *имп/сек* равен 100, 160, 250, 400, 630, 1200 *a*.

При сравнении совокупности частотных характеристик для крайних значений частоты определяется «разрешающая способность» и диапазон возможностей электроэрозионного метода (при электрическом генерировании) в целом.

Область максимальных частот: наибольшая площадь обработки — доли или единицы квадратных миллиметров, наибольшая чистота поверхности — до 10-го класса, наибольшая скорость съема — доли кубических миллиметров в 1 мин, наименьшая зона структурных изменений — в пределах десятка микрон, энергоемкость — сотни и тысячи джоулей на 1 мм³. Этим характеристикам соответствуют частоты около 2 мГц.

Область минимально низких частот: наибольшая площадь обработки — сотни тысяч и миллионы квадратных миллиметров, наибольшая чистота поверхности — ниже 1-го класса, наибольшая скорость съема — десятки тыс. мм³/мин, наименьшая зона структурных изменений — десятые доли мм, энергоемкость — единицы и десятки Дж/мм³. Этой области соответствуют частоты — десятки имп/сек.

Приведенные данные ориентировочны, они только характеризуют порядок величин, направление их изменения и отражают современный уровень техники в этой области.

В промежутке между крайними значениями частоты располагаются все характеристики эрозионного метода и его разновидностей. Отдельные области частотной характеристики, имеющие существенные физические, технические и технологические особенности в литературе и промышленной практике, выделяют обычно как отдельные разновидности или способы эрозионной обработки:

1. Область импульсов весьма малой длительности (обычно в пределах до 10 мксек), высоких частот (десятки и сотни кГц — примерно до 2 мГц), больших скважностей (более 10). Эта область непосредственно примыкает к диапазону максимальных частот и характеризуется превалированием искровой стадии разряда, механизма взрывного испарения и пароструйного выброса металла, преимущественным разрушением анода, повышенной обрабатываемостью металлокерамических композиций и, наоборот, пониженной обрабатываемостью сталей.

Эта область в ряде работ получила название высокочастотной электроискровой обработки. В качестве генераторов используются обычно независимые или ограниченно зависимые тириatronные генераторы знакопеременных «коротких» импульсов напряжения с указанными выше параметрами.

2. Область импульсов несколько, примерно на один порядок, большей длительности (обычно в пределах до 100—400 мксек), при средних частотах (сотни и тысячи импульсов в 1 сек), большой скважности (15—30), средней мощности, в которой превалирует искродуговая стадия разряда, имеет место также преимущественное разрушение анода; наряду (или взамен) с механизмом взрывного испарения существует «спокойное» испарение, на границах области при увеличении длительности и энергии импульса возможно появление элементов капельного процесса. Эта область

соответствует классической электроискровой обработке в том виде, как она была предложена, с зависимыми релаксационными генераторами знакопеременных импульсов напряжения и тока, прямой полярностью включения электродов, с использованием преимущественно латунных электродов инструментов и другими признаками, описанными в литературе.

Нижнюю границу этой области (в зоне малых длительностей и энергий импульсов) занимает прецизионная электроискровая обработка с релаксационным зависимым генератором, сливающаяся в конечном итоге с режимами прецизионной высокочастотной электроискровой обработки, осуществляемой на ограниченно зависимых или независимых генераторах.

Далее начинается область режимов обработки, свойственных электроимпульсному способу.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИАПАЗОНОВ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Выяснение роли геометрических характеристик изделия, главным образом площади обработки, позволяет обосновать выделение внутри электроимпульсной обработки трех диапазонов. В соответствии с частотной характеристикой процесса, определяющей согласование параметров импульсов (частота, скважность) с теплофизическими, технологическими и геометрическими характеристиками изделия, можно утверждать, что, строго говоря, не только для каждого материала, но и для каждой величины площади обработки существуют свои оптимальные частоты и скважность. Фактор площади является важнейшим не только потому, что он, собственно, позволяет сделать первый отбор изделия по его размерам, но и потому, что он, в конечном счете, определяет производительность обработки при копировании. Действительно, при электроимпульсной обработке копированием форма электрода в заготовке отображается при простом поступательном движении инструмента. Поэтому производительность процесса определяется скоростью углубления электрода, обратно пропорциональной (при заданном электрическом режиме) площади обработки. Следовательно, при источнике тока достаточной мощности продолжительность изготовления фасонного изделия определяется главным образом глубиной фигуры, а от ее размеров по двум другим координатам зависит в гораздо меньшей степени.

Так как частотная зависимость по площади не критична, то используемые частоты достаточно разбить на три диапазона, охватывающие все подходящие для электроимпульсной обработки размеры изделия: низкочастотная электроимпульсная обработка — до 150—300 *имп/сек*; среднечастотная — от 400 до 1000 *имп/сек* и высокочастотная — примерно от 1000 *имп/сек* и выше.

Скважность импульсов во всех случаях относится к низкой и не превышает 5, хотя практически редко выходит за пределы 1,05—3.

Общим у трех диапазонов является использование дугового разряда, обратной полярности электродов (инструмент — анод, деталь — катод), униполярных импульсов напряжения и тока, применение генераторов импульсов независимого типа.

Эти три диапазона разрабатывались не одновременно, а по мере расширения применения электроэрозионной обработки.

Среднечастотная обработка получила развитие раньше других и имеет наибольшее распространение для обработки деталей средних размеров с площадью обработки, измеряемой несколькими десятками тысяч квадратных миллиметров, при скорости съема до 5000 мм³/мин. Мощность машинных генераторов, используемых в этом диапазоне, достигает 20 кВт при частоте 400 имп/сек ($t_u \approx 1000$ мксек).

На базе оригинальных магнитонасыщенных генераторов с частотой 50—100 имп/сек ($t_u \approx 10 \div 12$ 000 мксек) начала интенсивно развиваться низкочастотная обработка импульсами большой энергии, обеспечивающая обработку поверхностей размером до многих сотен тысяч квадратных миллиметров при скоростях съема, достигающих 15—25 тыс. мм³/мин. Мощность генераторов достигает сотни киловатт, и ее рост (вследствие более низкой энергоемкости процесса и повышенного к. п. д. самого генератора) отстает от роста скорости съема.

Высокочастотная обработка в диапазоне до 66 000 имп/сек, получившая развитие на базе электронно-полупроводниковых и машинных индукторных генераторов мощностью до 8—10 кВт, обеспечивает получение более высокого класса чистоты поверхности на деталях, предварительно обработанных с применением машинных среднечастотных или магнитонасыщенных низкочастотных генераторов.

Получение более чистых поверхностей основывалось на следующих очевидных предпосылках: чем выше энергия импульса, тем больше размеры единичной лунки, ниже класс чистоты поверхности и больше зона структурных изменений в изделии. Следовательно, для финишных операций необходимо уменьшить энергию импульса либо снижением его амплитуды при постоянной частоте и скважности, либо увеличением частоты импульсов. В первом случае пропорционально падает мощность, вводимая в зону обработки, и в еще большей степени — скорость съема. Во втором случае можно сохранить ту же величину вводимой мощности, а скорость съема будет падать только вследствие увеличения энергоемкости процесса на высокой частоте. Поэтому разумное построение технологического процесса требует деления его на предварительный (съем основного объема металла при максимальной производительности и низком качестве поверхности)

и окончательный (заданная чистота поверхности при максимально возможной производительности).

При одинаковой частоте импульсов можно генерировать импульсы с большой (как при электроискровой обработке) и с малой скважностью (как при электроимпульсной обработке). По первому пути пошли зарубежные и ряд советских исследователей; результатом явилось создание высокочастотных систем с короткими искровыми импульсами, пригодных для получения небольших изделий из твердых сплавов, но значительно менее эффективных при изготовлении изделий больших размеров из сталей.

При высокочастотной электроимпульсной обработке обычно используются импульсы с малой скважностью (1,05—2), при этом вследствие увеличения непрерывности процесса удалось ввести достаточно большие мощности и обеспечить обработку стальных заготовок на частоте (пока до 66 000 *имп/сек*) по 5—6-му классам чистоты при сниженном износе. Несмотря на резкое уменьшение длительности импульса, вследствие малой скважности сохранились в основном признаки и преимущества электроимпульсной обработки: пониженное падение напряжения U_{sm} , капельный и в меньшей степени «паровой» механизм эвакуации, обратная полярность, сниженный износ инструмента. Таким образом, по большинству признаков высокочастотная обработка с использованием импульсов малой скважности совпадает со средне- и низкочастотной электроимпульсной обработкой, причем главные из этих признаков — возможность эффективной обработки деталей со сниженным износом инструмента и на обратной полярности, использование одних и тех же материалов электродов (в частности, графитированного материала ЭЭГ), одних и тех же рабочих жидкостей и, наконец, возможность доводки (при работе в области искусственной устойчивости) таких же больших площадей.

Доводочные операции после предварительной обработки осуществляются на режимах, обеспечивающих получение в минимальное время заданной чистоты поверхности путем последовательного регулирования режимов по частоте (увеличение) или току (снижение). Для этой цели все современные электроимпульсные станки снабжаются источниками питания, рассчитанными на несколько частот с одновременным регулированием амплитуды или скважности импульсов.

Дальнейшее усовершенствование электроимпульсных станков и питающих их независимых генераторов импульсов основано на созданных в ЭНИМСе широкодиапазонных генераторах с плавным регулированием частоты и скважности, объединяющих все три диапазона электроимпульсной обработки и позволяющей синтезировать в одном агрегате свойства полной частотной характеристики эрозионной обработки.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ

III ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

СХЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Электроимпульсная обработка принципиально позволяет осуществить все схемы формообразования, которые встречаются при обработке на металлорежущих станках. В связи с тем, что относительное перемещение инструмента и обрабатываемой заготовки, аналогичное главному движению резания, не является неизменным условием съема металла при электроимпульсной обработке, схемы формообразования в ряде случаев могут быть видоизменены и приближены к схемам обработки давлением — штампованию, прокатке.

Наиболее часто применяемые схемы формообразования показаны на рис. 16.

Основной схемой формообразования, охватывающей не менее 80% всех операций, выполняемых электроимпульсным методом, является схема (рис. 16, а) обработки поверхностей при прямолинейном поступательном движении электрода-инструмента (или заготовки) по принципу прошивания с объемным копированием формы электрода.

При обработке фасонных поверхностей по этой схеме можно подводить наибольшие мощности. На чистовых режимах схема прошивания часто применяется в измененном виде (рис. 16, б). Электроду-инструменту сообщаются не прямолинейные, а круговые поступательные движения, при которых все точки электрода-инструмента совершают движения по окружностям одинакового радиуса (орбитальное движение).

Круговые движения позволяют корректировать размеры обрабатываемой поверхности в процессе работы, дают возможность вести обработку на черновых и чистовых режимах одним электродом, оказывают стабилизирующее влияние на эрозионный процесс.

Помимо схемы прошивания, используются также следующие схемы формообразования: по принципу обкатки заготовки электродом-инструментом (рис. 16, в), вращающимся электродом, выполненным в виде тела вращения (рис. 16, г, д), электродом-инструментом, получающим винтовые движения (рис. 16, д), нитевидным электродом-инструментом или электродом-инструментом в виде ленты, выполняющим движение по заданной траектории (рис. 16, е).

Основная схема — схема прошивания (рис. 16, а, б) — используется в универсальных и ряде специализированных электроимпульсных станках. Схемы рис. 16, в—е применяются в специализированных станках и специальных наладках универсальных станков.

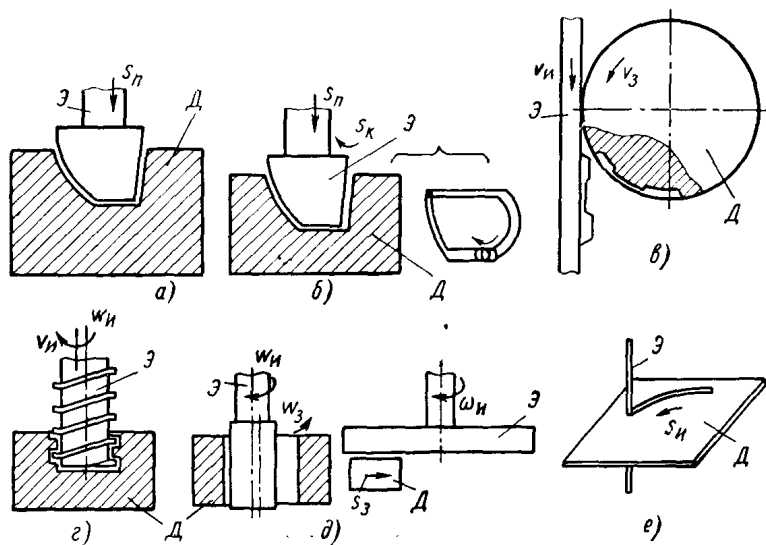


Рис. 16. Схемы формообразования, применяемые при электроимпульсной обработке:

а — по принципу прошивания с прямолинейным поступательным перемещением электрода-инструмента; б — с круговыми поступательными движениями электрода-инструмента; в — обкаткой заготовки электродом-инструментом; г — вращающимся электродом-инструментом, совершающим винтовые движения; д — нитевидным электродом-инструментом

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА

Как указывалось, одной из основных характеристик обработки является взаимосвязь между энергией или током I , площадью обработки F и скоростью съема M (рис. 17).

Пространственная диаграмма (рис. 17) представляет собой семейство двух-групп зависимостей: скорости съема от тока при постоянной площади обрабатываемой поверхности и скорости съема от площади обработки при неизменном токе, полученных при стандартных условиях (частоте, скважности, материалах электродов и виде рабочей жидкости).

В общем случае зависимость «площадь обработки — скорость съема» имеет следующий характер. Увеличение площади обрабатываемой поверхности при неизменном токе ведет сначала к возрастанию скорости съема, затем рост скорости съема замедляется, и в дальнейшем, с увеличением тока, имеет место некоторое уменьшение скорости съема. Каждому значению тока соответствует своя оптимальная площадь обработки F_{opt} , при которой скорость

съема максимальная, причем с ростом тока оптимальная величина площади обработки сдвигается в сторону больших значений.

На рис. 18 даны зависимости скорости съема от площади обработки на частоте 400 *имп/сек*, а также фактический съем на один импульс и расчетная скорость съема, полученная умножением величины выброса одного импульса на общее число импульсов.

Каждому значению площади обработки соответствует своя оптимальная мощность или ток, которые могут быть эффективно реализованы и соответствуют наилучшему использованию импуль-

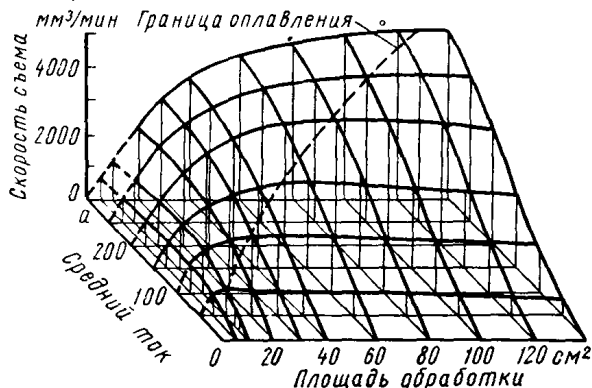


Рис. 17. Зависимость скорости съема от тока площади обрабатываемой поверхности:

материал образца — сталь; материал электрода — медь; рабочая жидкость — индустриальное масло 12; частота 400 *имп/сек*

сов, вырабатываемых генератором. Взаимосвязь между эффективно реализуемой мощностью $P_{S\text{ ср оп}}$ и площадью обработки имеет вид

$$P_{S\text{ ср оп}} \approx C_m F^k. \quad (\text{III. 1})$$

Для обычных условий обработки коэффициент C_m равен примерно 0,2—0,27, а показатель степени $k = 0,7 \div 0,75$.

Процесс обработки при оптимальных соотношениях мощности и площади обрабатываемой поверхности осуществляется с близкими удельными скоростями съема, (т. е. отнесенными к единице площади). Удельная скорость съема с 1 *см²* обрабатываемой поверхности, например для стали 45, составляет 35—60 *мм³/мин*, что позволяет получить скорость прошивания по глубине независимо от площади обработки 0,35—0,6 *мм/мин*.

Зависимость «оптимальный ток—площадь обработки» используется для установления электрического режима при обработке поверхностей сложного профиля. При этом в качестве параметра, определяющего площадь обработки, принимается площадь проекции обрабатываемой поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению подачи.

Количество металла V , удаляемого с любого участка фасонной вогнутой или выпуклой поверхности, ограниченного координатами x_1x_2 и y_1y_2 при перемещении электрода-инструмента на величину подачи s , равно:

$$V = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} s dx dy = s \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} dx dy. \quad (\text{III. 2})$$

Из выражения видно, что количество металла, снимаемого с любого участка поверхности при работе с поступательно-переме-

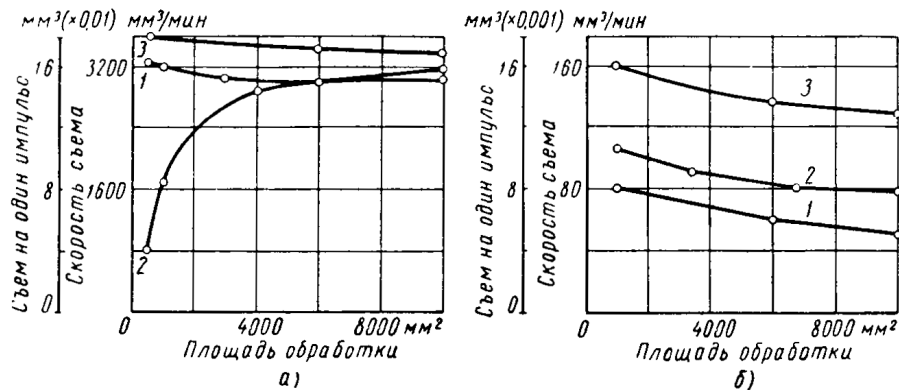


Рис. 18. Скорость съема металла и съем на один рабочий импульс в зависимости от площади обработки при использовании тока:

а — 200 а; б — 10 а; 1 — съем на один рабочий импульс; 2 — скорость съема фактическая; 3 — скорость съема расчетная; материал образца — сталь; материал электрода — медь; рабочая жидкость — индустриальное масло 12, частота 400 имп/сек

щающимся электродом-инструментом и пропорционального подводимой энергии, равно величине подачи, умноженной на величину проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению подачи.

Пространственная диаграмма дает представление о связи между электрическим режимом, площадью обработки и скоростью съема для упрощенной формы электрода. С изменением формы рабочей поверхности электрода-инструмента (в плане) и глубины прошивания условия осуществления процесса эрозии изменяются, так как меняется трасса эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки.

Изменение трассы эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка является существенным фактором, определяющим баланс продуктов эрозии в зоне обработки. От формы обрабатываемой поверхности и глубины прошивания зависят также условия теплообмена в зоне обработки.

По своей сущности влияние формы обрабатываемой поверхности на скорость съема аналогично тому влиянию, которое ока-

зывает изменение площади обработки при заданном токе в диапазоне площадей, больших $F_{онт}$.

Глубина прошивания является одним из сильнодействующих при эрозионной обработке факторов.

Снижение скорости съема с увеличением глубины прошивания определяется балансом продуктов эрозии в зоне обработки. Это видно из прошивания ступенчатыми электродами (рис. 19) с рабочей частью в виде цилиндра, высота которого меньше глубины прошиваемого отверстия. Такие электроды часто применяются при прошивании глубоких отверстий.

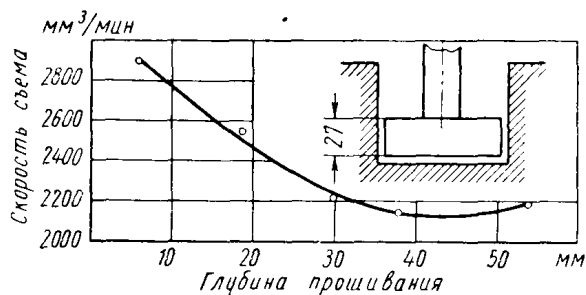


Рис. 19. Зависимость скорости съема металла от глубины при прошивании ступенчатым электродом: материал образца — сталь; материал электрода — медь; рабочая жидкость — индустриальное масло 12; частота — 400 имп/сек; ток 50 а

При прошивании этими электродами скорость съема снижается до тех пор, пока вся рабочая часть не погрузится в прошиваемое отверстие. С дальнейшим увеличением глубины прошивания скорость съема стабилизируется и находится примерно на том уровне, который был достигнут на глубине, равной высоте рабочей части электрода.

Стабилизация процесса путем применения электрода-инструмента с укороченной рабочей частью широко используется на операциях прошивания глубоких полостей, отверстий и щелей. Стабилизация процесса на глубине достигается также прокачиванием рабочей жидкости через электрод-инструмент (рис. 20).

Для ввода рабочей жидкости в зону эрозии достаточны отверстия диаметром 1,5—3,0 мм, которые в практически применимом диапазоне режимов не оставляют трудноудаляемых стержневых выступов на обрабатываемой поверхности. Небольшие возвышения, расположенные против отверстий, легко удаляются.

Принудительное введение рабочей жидкости в зону обработки, создавая благоприятные условия восстановлению среды и эвакуации продуктов эрозии, способствует более полному использованию подводимых импульсов. Как видно из рис. 21, для работы с прокачкой характерна относительная стабилизация скорости съема по глубине: съем на один импульс — разряд с увеличением глубины существенно не меняется.

Принудительное прокачивание рабочей жидкости через электрод-инструмент оказывает стабилизирующее действие не только в тех случаях, когда площади обрабатываемых поверхностей больше $F_{опт}$, но и тогда, когда они меньше $F_{опт}$. Прокачиваемая рабочая жидкость сдвигает границу оплавления для заданной площади обработки в сторону больших токов.

Увеличивая давление и расход вводимой в зону обработки рабочей жидкости, можно повысить плотность подводимой энергии и этим увеличить скорость съема металла с 1 см^2 обрабатываемой поверхности ¹. Например, максимальная, независимо от тока

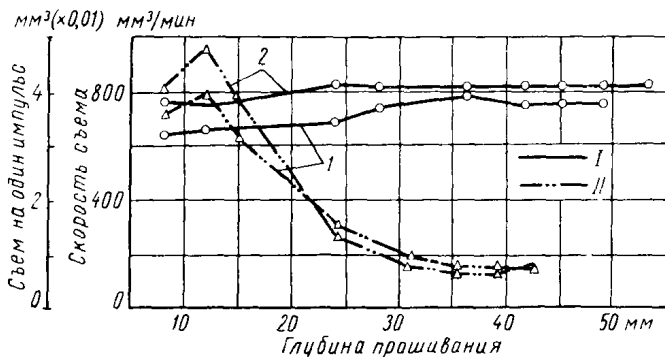


Рис. 20. Зависимость скорости съема и съема на один импульс-разряд при работе с прокачкой (I) и без прокачки (II):
I — съем на один импульс; 2 — скорость съема

для заданной площади 1000 мм^2 , скорость съема с 1 см^2 обрабатываемой поверхности при обработке круглыми медными электродами на глубине 2 мм без прокачки равна $132 \text{ мм}^3/\text{мин}$ и с прокачкой рабочей жидкости под давлением $6\text{—}7 \text{ кг/см}^2$ с расходом $6 \text{ л/м} — 243 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Поэтому копировально-прошивочные электроимпульсные станки снабжаются устройством для прокачки жидкости.

В ряде случаев для стабилизации процесса целесообразно придавать электроду-инструменту колебательное движение в направлении подачи. Вибрация инструмента обеспечивает улучшение эвакуации продуктов обработки из межэлектродного зазора и, следовательно, повышение производительности обработки. В зависимости от условий обработки (электрический режим, площадь и форма обрабатываемой поверхности, глубина обработки) максимальной производительности соответствует некоторая оптимальная амплитуда продольных колебаний инструмента, так как, с одной стороны, увеличение амплитуды колебаний создает более благоприятные условия для эвакуации продуктов эрозии, а с дру-

¹ Однако давление прокачки нельзя беспредельно увеличивать, так как может нарушиться механизм образования канала разряда и устойчивость процесса.

гой — чрезмерное увеличение амплитуды приводит к возрастанию количества импульсов холостого хода и короткого замыкания и к связанному с этим уменьшению числа рабочих импульсов, т. е. имеет место экстремальная зависимость. При работе на мягких режимах с наложением вибраций интенсивность съема металла повышается как для графитированных, так и для медных инструментов при амплитуде продольных вибраций инструмента в пределах 0,02—0,07 мм.

Как уже указывалось в гл. II, на эрозионный процесс оказывает существенное влияние рабочая среда.

Установлено, что жидкость, применяемая в качестве рабочей среды, влияет на величину падения напряжения между электродами при возбуждении дуговых разрядов; величина напряжения, в свою очередь, определяет энергию, выделяющуюся в зоне обработки, соответствующие величины съема металла и энергию ударных волн, способствующих эвакуации диспергированных частиц.

В табл. 6 указана относительная величина напряжения на дугах, возбуждаемых в различных жидкостях, и соответствующие скорости съема металла.

Таблица 6

Интенсивность съема металла и напряжения на дуге при работе в различных средах

Рабочая жидкость	Напряжение на дуге в относительных единицах	Скорость съема в мм ³ /мин	ГОСТ
Индустриальное масло	1	640	1767—51 4753—49
Трансформаторное масло	0,97	600	982—56
Велосит	0,95	550	1840—51
Керосин	0,9	520	4753—49

Наибольшие скорости съема получены для индустриального и трансформаторного масла, меньшие — для велосита и керосина. В том же порядке на эрозионном промежутке расположено для этих сред и напряжение.

Зависимость скорости съема от вязкости жидкости имеет экстремальный характер. Увеличение вязкости затрудняет эвакуацию продуктов эрозии, что ведет к падению скорости съема металла. Величина предельной вязкости уменьшается при снижении энергии импульсов. В идеальной жидкости (вязкость равна нулю), вследствие отсутствия захвата частиц, скорость эвакуации становится равной нулю и скорость объема также стремится к нулю.

В процессе работы характеристики рабочей жидкости изменяются вследствие загрязнения продуктами эрозии, повышаются ее зольность и вязкость. Установлено, что расход наиболее дешевого индустриального масла 12 составляет около 0,5—0,85 л/квт·ч.

Некоторые физико-химические свойства свежего и полностью отработанного индустриального масла 12 указаны в табл. 7.

Таблица 7

Характеристика свежего и отработанного масла

Состояние масла	Вязкость в сст (50° С)	Температура вспышки в °С	Зольность в %
Свежее	10	135	0,007
Отработанное	20	168	1,23

По допустимой вязкости определяется срок замены масла.

Существенное влияние на производительность процесса оказывает материал электрода-инструмента и напряжение, подаваемое от источника питания к эрозионному промежутку для возбуждения разрядов.

От материала электрода-инструмента зависит падение напряжения на эрозионном промежутке во время разряда и, таким образом, энергия разряда; со свойствами материала электрода-инструмента связаны теплообмен в зоне обработки и восстановление среды в межэлектродном пространстве.

Для каждого из материалов инструментов существует своя предельная мощность, которая может быть эффективно реализована при заданном напряжении, возбуждающем разряды. Теплообмен и баланс продуктов эрозии зависят от теплопроводности материала, шероховатости поверхности, однородности и некоторых других его свойств.

Чем больше теплопроводность и шероховатость эрозированной поверхности, тем большая мощность может быть реализована, так как повышение теплопроводности улучшает отвод тепла; увеличение шероховатости увеличивает объем рабочего пространства между обрабатываемой поверхностью и поверхностью электрода-инструмента. Например, наибольшие мощности реализуются при использовании электродов-инструментов из меди, меньшие — из алюминия и еще меньшие — из графитированных материалов.

В этом же порядке располагаются и коэффициенты теплопроводности этих материалов, а при переходе к графитированным материалам резко уменьшается шероховатость рабочей поверхности электрода, вызванная эрозионным процессом.

Благоприятное влияние на возможность реализации мощности оказывает увеличение напряжения, так как при этом увели-

чиваются эрозионный промежуток и рабочее пространство между электродами. Однако при выборе напряжения стремятся ограничиться минимальными величинами, достаточными для осуществления стабильного эрозионного процесса, так как чрезмерное увеличение напряжения для многих типов генераторов импульсов приводит к дополнительным непроизводительным затратам энергии. В табл. 8 указаны наибольшие рабочий ток и мощность, реализуемые при изготовлении электродов-инструментов из различных материалов.

Таблица 8

Предельные значения мощности и рабочего тока при работе электродами-инструментами, изготовленными из различных материалов

Материал электрода-инструмента	Предельный ток $I_{ср}$ в а и мощность $P_{ср}$ в квт					
	Амплитуда напряжения 105 в, продолжительность импульсов 100—1100 мксек, частота 400 имп/сек		Амплитуда напряжения 135 в, продолжительность импульсов 2500 мксек, частота 100 имп/сек		Амплитуда напряжения 200 в, продолжительность импульсов 2500 мксек, частота 100 имп/сек	
	$I_{ср}$	$P_{ср}$	$I_{ср}$	$P_{ср}$	$I_{ср}$	$P_{ср}$
Медь	250—300	8—10	Не достигнут	Не достигнута	Не достигнут	Не достигнута
Алюминий	160—180	6—5	400—450	15—15,5	То же	То же
Графитированный марки ЭЭГ	120—150	3,5—4,5	300—350	12,5—13	400	15

Выше рассматривалась производительность электроимпульсной обработки в различных условиях ведения процесса.

Одним из важнейших факторов, определяющих область использования метода, является обрабатываемость различных металлов и сплавов (табл. 9). За единицу обрабатываемости принята обрабатываемость стали 45.

Установлено, что на скорость съема металла закалка влияет незначительно; закаленные и незакаленные стали обрабатываются практически с одинаковой производительностью.

Углеродистые конструкционные и инструментальные стали, а также низколегированные стали обрабатываются примерно с одинаковой эффективностью.

Серый чугун в диапазоне сравнительно невысоких по реализуемой мощности режимов (ток до 30—50 а) обрабатывается примерно при той же скорости съема металла, что и стали. Для серого чугуна характерно ухудшение стабильности эрозионного процесса при работе на грубых режимах при повышенной мощности. Нестабильность процесса сопровождается появлением на обрабатываемой поверхности отдельных выделяющихся углублений. Эта особенность обработки серых чугунов связана с включе-

Сравнительная обрабатываемость металлов и сплавов электроимпульсным способом

Обрабатываемый материал	Относительная скорость съема металла
Сталь 45	1
Конструкционные и инструментальные стали (типа сталей 15, У8А, 5ХНВ, ХВГ)	1—1,1
Серый чугун СЧ 15-32	0,6—1
Жаропрочные сплавы:	
ХН77ТЮ (ЭИ437А)	1,4—1,7
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	1,3—1,5
ЭИ661	1,4—1,55
Ж6	1,5—2
ЭИ827	1—1,1
Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т	1,2—1,3
Твердые сплавы:	
Т15К6	0,09—0,1
ВК8	0,14—0,15
ВК15	0,16—0,18
ВК20	0,22—0,25
ВК30	0,3—0,32
Алюминий	1,5—1,7
Алюминиевые сплавы:	
АЛ5	1,5—1,6
Д1	1,3—1,35
Магнитные сплавы:	
АНКО	1,3—1,5
АН2	1,4—1,6

ниями свободного графита, способствующего локализации процесса на отдельных участках обрабатываемой поверхности.

Группа жаропрочных сплавов на никелевой основе отличается улучшенной по сравнению со сталями обрабатываемостью. Скорость съема для жаропрочных сплавов на 30—50 % выше получаемой при обработке обычных сталей. Для некоторых жаропрочных сплавов (например, Ж6) получены скорости съема, превышающие в 2 раза аналогичный показатель обрабатываемости сталей. Замечено, что с ростом мощности указанное различие в обрабатываемости между сталями и жаропрочными сплавами увеличивается. Это улучшение обрабатываемости с переходом от обычных углеродистых сталей к жаропрочным сталям и сплавам обусловлено уменьшением температуропроводности и теплосодержания последних. Добавки к жаропрочным сплавам тугоплавких компонентов, таких как вольфрам и титан, ухудшают обрабатываемость жаропрочных сплавов.

Твердые сплавы по сравнению со сталями обрабатываются в несколько раз менее производительно. Наилучшей обрабатываемостью обладают сплавы группы ВК, причем обраба-

тываемость для этой группы сплавов резко повышается с увеличением содержания кобальта.

Сплавы группы ТК по сравнению со сплавами группы ВК обрабатываются со значительно пониженной эффективностью.

Алюминиевые сплавы и алюминий по обрабатываемости близки к жаропрочным сплавам на основе никеля: скорость съема при обработке этих сплавов на 30—60 % выше скоростей съема при обработке стали, что связано со сравнительно низкой температурой плавления алюминия.

Хорошая обрабатываемость присуща магнитным сплавам, обладающим пониженной теплопроводностью. Получаемые при их обработке скорости съема металла примерно в 1,5 раза превышают скорости съема при обработке углеродистых сталей.

КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При электроимпульсной обработке в результате воздействия дуговых импульсных разрядов на обрабатываемую поверхность образуются характерные неровности, поверхностные слои металла подвергаются тепловому воздействию.

Качество получаемой поверхности определяется ее шероховатостью и термическими изменениями в поверхностных слоях металла.

Шероховатость обработанной поверхности. Поверхности, полученные при электроимпульсной обработке, по характеру шероховатости значительно отличаются от поверхностей, обработанных резанием. Микронеровности имеют вид лунок, нерегулярно расположенных на обработанной поверхности. Границы между отдельными микронеровностями обозначены нечетко.

После обработки на грубых режимах при энергии импульсов свыше 2—3 дж получают блестящие поверхности, у которых заметны сфероидальные оплавленные выступы, представляющие собой приваренные диспергированные частицы металла.

При снижении энергии импульсов получают матовые поверхности, что является особенностью отражательной способности этих поверхностей.

Обрабатываемые поверхности могут располагаться перпендикулярно и параллельно оси канала возбуждаемых разрядов. При этом имеет место различная схема образования микрорельефа. В первом случае микрорельеф получается в результате суперпозиции всей поверхности лунок, во втором — как результат сложения краевых поверхностей лунок.

Первый тип поверхностей, расположенных перпендикулярно каналу разряда, наиболее характерен для фасонных поверхностей. Он получается при расположении обрабатываемой поверхности под углом к направлению подачи электрода-инструмента. Этот тип поверхностей может получаться и при обработке вертикаль-

ных поверхностей, например, при таких износах электрода, при которых на его торце появляется закругление, дающее плавный переход от горизонтальной поверхности к вертикальной.

Высота микронеровностей у поверхностей, располагающихся перпендикулярно каналу разряда, в 1,5—2 раза превышает высоту микронеровностей, образованных в направлении канала разряда. Второй тип поверхностей встречается при обработке вертикальных поверхностей.

Степень неоднородности микрорельефа, характеризующаяся отношением размаха варьирования высот микронеровностей к их среднему значению, равна 1,15—1,2, что значительно превышает аналогичный показатель при обработке методами резания.

На рис. 21 даны кривые распределения высоты поверхностных микронеровностей. Из кривых распределений видно, что высота последовательно измеренных микронеровностей для одного режима изменяется более чем на класс.

Для поверхностей, обработанных электроимпульсным способом, коэффициент заполнения профиля k , равный отношению площади профиля, заполненной металлом, ко всей площади между линиями вершин и впадин, равен 0,46—0,49 и находится в тех же пределах, что и при обработке резанием, где он равен, по различным данным, 0,4—0,6.

Особенности шероховатости эрозионных поверхностей вносят свою специфику в оценку степени шероховатости.

В литературе по электроэрозионной обработке содержатся противоречивые данные по оценке шероховатости поверхностей, полученной с помощью различных приемов и методов. Поверхности, обработанные на одних и тех же режимах и имеющие одина-

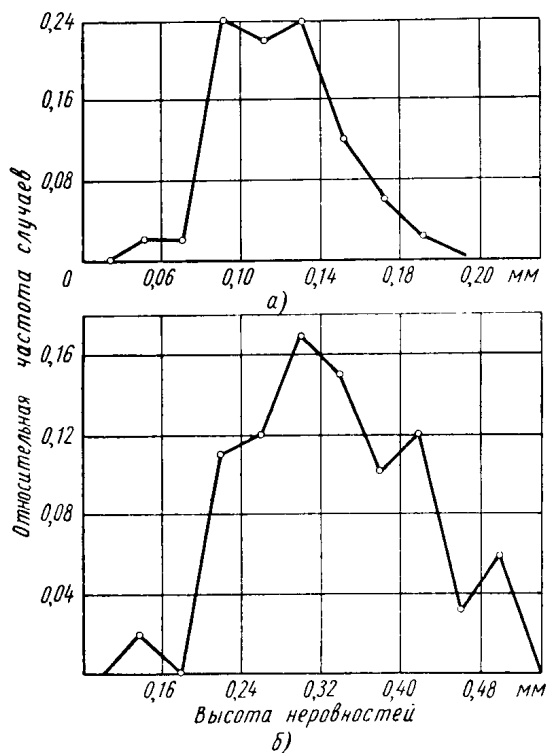


Рис. 21. Кривые распределения высот поверхностных неровностей при токе:

а — $I_{cp} = 10$ а; б — $I_{cp} = 300$ а; материал образца — сталь; материал электрода — медь; рабочая жидкость — индустриальное масло 12; частота 400 имп/сек

ковую шероховатость, иногда оцениваются разными авторами с различием в один-два класса шероховатости.

Это в основном связано с выбором критерия для оценки шероховатости и методикой измерений. В имеющейся литературе даются оценки шероховатости эрозированной поверхности по среднеквадратическому отклонению $H_{ск}$, средней высоте микронеровностей $H_{ср}^*$, среднеарифметическому отклонению R_a и наибольшей высоте микронеровностей H .

В результате изучения различных критериев оценки шероховатости установлено, что наиболее объективным критерием шероховатости эрозированной поверхности является наибольшая высота микронеровностей, которая в отличие от методики по ГОСТу 2789—59, как показали исследования, должна определяться без каких-либо усреднений величин, кажущихся случайными. Определенная таким образом наибольшая высота микронеровностей является строго определенной величиной, она характеризует толщину слоя металла, который необходимо снять для удаления следов обработки.

Наибольшая высота микронеровностей может быть найдена из профилограмм или путем измерения микронеровностей при числе измерений 40—50. Такое число измерений позволяет определить наибольшую высоту микронеровностей с точностью до 10—12%, что обусловлено возможным отклонением генерального распределения от указанной величины выборки.

Величина H превышает в области чистовых режимов в 4—6 раз среднее арифметическое отклонение от средней линии профиля R_a , полученное с помощью профилометров типа ПЧ-4.

Микрогеометрия обрабатываемой поверхности зависит от условий обработки, теплофизических свойств обрабатываемого материала, размеров обрабатываемой поверхности, рабочей жидкости и др. Первостепенное значение имеет электрический режим, диапазон регулирования которого очень широк. Изменения микро рельефа поверхности в пределах регулирования электрического режима значительно превышают изменения, вызываемые другими факторами.

При регулировании электрического режима основным параметром, определяющим микрогеометрию обработанной поверхности, является энергия импульсов.

Соотношение между высотой микронеровностей H и энергией импульсов W_s имеет следующий вид:

$$H = C_H W_s^p, \quad (\text{III. } 3)$$

где C_H — коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал, в мк/дж .

* Применение критерия $H_{ск}$ и $H_{ср}$ для оценки шероховатости связано с ранее существовавшим ГОСТом 2789—51 на чистоту обработанной поверхности.

В табл. 10 указаны значения коэффициента C_H и показатель степени p для основных групп материалов при обработке поверхностей, перпендикулярных к каналу разряда.

Т а б л и ц а 10

Значение C_H и показателя p для основной группы материалов

Обрабатываемый материал	C_H мк/дж	p
Углеродистые стали, в том числе штамповые	190	0,33—0,37
Жаропрочные сплавы на никелевой основе	205	0,37—0,4
Твердые сплавы	67	0,36—0,4

Энергию импульсов можно выразить через подводимую среднюю мощность $P_{ср}$ и частоту импульсов f :

$$W_s = \frac{P_{ср}}{f}, \quad (\text{III. 4})$$

или, с достаточным приближением, можно считать

$$H \approx C_H \left(\frac{I_{ср} U_{sm}}{f} \right)^p. \quad (\text{III. 5})$$

Из выражений видно, что рабочая среда и материал электрода-инструмента, вследствие малой зависимости высоты микронеровностей от энергии импульсов, не могут существенно влиять на шероховатость обработанной поверхности.

Изменение высоты микронеровностей, вызываемое регулированием электрического режима процесса, определяется через изменение энергии импульсов при регулировании электрического режима:

$$R_{pэ} = R_f R_I,$$

где $R_{pэ}$, R_f и R_I — диапазоны изменения соответственно энергии импульсов, частоты и тока.

Более точно, с учетом изменения U_{sm} , диапазон изменения энергии

$$R_{эз} = c R_f R_I, \quad (\text{III. 6})$$

где c — коэффициент, учитывающий изменение напряжения на эрозионном промежутке при регулировании режима.

При большом диапазоне регулирования режима коэффициент $c = 2$.

Отношение высот микронеровностей, полученных на двух различных режимах,

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^p. \quad (\text{III. 7})$$

Выражая энергию импульса второго режима через энергию импульсов первого режима, получим:

$$H_2 = \frac{H_1}{R_{p3}^p} \text{ или } H_2 = \frac{H_1}{(cR_f R_l)^p}. \quad (\text{III. 8})$$

Изменения в эрозионном процессе, обусловленные размерами обрабатываемой поверхности, оказывают влияние не только на съем металла, но и на микрогеометрию. На площадях, меньших F_{opt} , там, где имеет место оплавление обрабатываемой поверхности, границы отдельных лунок сливаются. Неровности имеют вид ванночек отвердевшего металла неопределенных размеров, причем высота неровностей возрастает. В области площадей, больших F_{opt} , заметные изменения в микрорельефе поверхности наблюдаются в тех случаях, когда имеют место постоянные скопления газов в межэлектродном пространстве. Поверхностные микронеровности в зоне таких скоплений газов имеют сглаженный вид и меньшую высоту. Это объясняется тем, что при недостаточной эвакуации газов из зоны обработки часть разрядов возбуждается в газовой среде. Не производя эффективного съема металла, эти разряды разрушают вершины образующихся микронеровностей.

Низко- и среднечастотная электроимпульсная обработки (области частот 50—1000 гц) позволяют получить довольно грубые поверхности при высокой производительности (табл. 11). Вследствие этого частоты указанного диапазона используются либо для черновой обработки, либо при относительно невысоких требованиях к качеству поверхности.

Чистовую обработку ведут на повышенных частотах.

Для получения наилучшего сочетания скорости съема металла и чистоты обработанной поверхности на чистовых режимах необходимо повысить частоту и выбрать такие параметры импульсов, при которых энергоемкость процесса была бы наименьшей.

Повышение частоты разрядов достигается повышением частоты импульсов напряжения, подаваемых на электрод-инструмент и обрабатываемую деталь. Желательно при повышении частоты импульсов поддерживать среднюю мощность на высоком уровне черновых режимов. Однако этому препятствуют, как указывалось в гл. II, повышение энергоемкости и ухудшение эвакуации при росте частоты.

Кроме того, между шероховатостью и энергией импульсов имеет место весьма явная зависимость — величина шероховатости примерно пропорциональна энергии разрядов в степени $1/3$. Для того чтобы уменьшить шероховатость, например, с 1-го до 8-го класса чистоты, необходимо снизить энергию импульсов примерно в 2,5 млн. раз, т. е. довести верхний предел частоты (принимая, например, частоту импульсов на черновых режимах 400 гц) до 10^9 гц, что в несколько тысяч раз больше, чем получено в настоя-

Высота микронеровностей при среднечастотной и низкочастотной электроимпульсной обработке сталей и твердого сплава

Обрабатываемый материал	Электрический режим		Энергия в дж	Максимальная высота микронеровностей в мк	Скорость съема металла в мм³/мин
	Частота в гц	Средний ток в а			
Стали	50	10	5	270	100
		50	18	590	790
		300	115	1250	5 000
		1000	340	1830	15 000
	100	10	2,6	220	105
		50	14,7	410	750
		300	70	930	5 350
		600	138	1250	11 800
	400	10	0,6	150	110
		50	3,3	280	700
		300	20,5	530	4900
Твердый сплав ВК20	400	10	0,6	35	6—10
		20	1,1	75	62
		30	1,9	90	90
		50	3,3	110	190

щее время в экспериментальных и производственных условиях. При этом еще в большей степени проявляется действие первого фактора, т. е. увеличение энергоемкости. Поэтому одновременно с повышением в разумных пределах частоты необходимо также регулировать энергию импульса, снижая его амплитуду, т. е. уменьшая общую энергию, вводимую в зону обработки.

В связи с этим интенсивность съема металла на финишных режимах существенно снижается. Электроимпульсной обработкой на повышенных частотах можно получить поверхность с шероховатостью до 5—7-го классов чистоты. Получаемая шероховатость и соответствующая ей производительность при обработке сталей и твердых сплавов указана в табл. 12.

При обработке методом прошивания поверхностей с вертикальными стенками трудоемкость чистовой обработки может быть определена из выражения

$$t_{i+1} = \frac{lh[\delta - k_v(H_i + H_{i+1})]}{M_{i+1}}, \quad (\text{III. 9})$$

где M_{i+1} — скорость съема металла на режиме $i + 1$;
 l — периметр обрабатываемой поверхности;
 h — глубина отверстия;
 H_i и H_{i+1} — наибольшая высота микронеровностей соответственно на режимах i и $i + 1$;
 δ — припуск под чистовую обработку;
 k_v — коэффициент, характеризующий сплошность снимаемого слоя и равный отношению объема металла в слое к полному объему слоя. Коэффициент k_v может быть заменен коэффициентом заполнения профиля.

Таблица 12

Шероховатость обработанной поверхности и производительность при высокочастотной электроимпульсной обработке сталей и твердого сплава

Обрабатываемый материал	Электрический режим		Энергия в дж	Максимальная высота микронеровностей ¹ в мк	Класс чистоты	Скорость съема металла в мм ³ /мин
	Частота в кгц	Средний ток в а				
Стали	7	2	0,009	21	5	7—8
		10	0,038	25	5	80
		30	0,098	65	4	240
	25	2	0,0028	15	5—6	2—3
		10	0,011	16	5	16
		20	0,024	21	5	50
Твердый сплав ВК20	7	2	0,0065	6,5	6—7	1—2
		10	0,0027	15	5—6	8
	25	5	0,02	12	6	5
		30	0,098	20	5	50
	100	5	0,012	9	6—7	2
		20	0,024	14	5—6	20
	100	4—5	0,0012	3,5—4	7	0,5—1
		10	0,0027	5	7	2—3

¹ Максимальная высота микронеровностей в 4—6 раз превышает среднее арифметическое отклонение R_a , определяющее класс чистоты по ГОСТу 2781—59.

Объем металла в элементе слоя между двумя параллельными сечениями на расстоянии dx составит

$$dV_m = kah \, dx, \quad (\text{III. } 10)$$

где k — коэффициент заполнения профиля;
 a и h — ширина и высота слоя.

Полный объем металла в слое

$$V_m = \int_0^x kah dx.$$

Коэффициент заполнения профиля можно рассматривать как величину постоянную.

Тогда

$$V_m = kah \int_0^x dx = kahx.$$

Отсюда коэффициент сплошности слоя

$$k_v = \frac{V_m}{V_{сл}} = \frac{kahx}{ahx} = k. \quad (\text{III. 11})$$

Трудоемкость чистовой обработки поверхностей, перпендикулярных к оси канала разряда, может быть охарактеризована наименьшим временем доводки, получаемым при последовательном снижении электрического режима.

Очевидно, наименьшее время доводки получено при плавном регулировании электрического режима в соответствии с изменением высоты поверхностных микронеровностей и скорости съема металла:

$$t = k_v F \frac{H_i - H_{i+1}}{M_{i+1}}. \quad (\text{III. 12})$$

Суммарное время доводки

$$t = k_v F \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i - H_{i+1}}{M_{i+1}}. \quad (\text{III. 13})$$

Оптимальное время доводки можно определить, разбивая общий диапазон изменения режима на достаточное количество ступеней.

Установлено, например, что время, необходимое для перехода от грубого режима ($I_{ср} = 100$ а) низкочастотной обработки (100—400 имп/сек) до режима $f = 100$ кГц ($I_{ср} = 2$ а), составляет 0,5—0,6 мин на 1 см².

■ **Изменения в поверхностных слоях металла под влиянием электроимпульсной обработки.** В результате термического воздействия поверхностные слои металла претерпевают структурные изменения, причем зона термического влияния располагается по обрабатываемой поверхности неравномерно. Распространение термического эффекта зависит от энергии импульсов. Это можно видеть из табл. 13. Зависимость наибольшей глубины термически

Наибольшая глубина зоны термического влияния в зависимости от энергии импульсов (при постоянной скважности). Обрабатываемый материал — сталь 45, твердость *HRC* 48

Энергия импульсов в дж	Глубина зоны термического влияния в мм
0,0027	0,01 (слой прерывистый)
0,020	0,02 (слой прерывистый)
0,1	0,04—0,05 (слой прерывистый)
0,6	0,1—0,12
7	0,18—0,2
20	0,25—0,26
200	0,9—1

измененного слоя от энергии импульсов при постоянной скважности может быть записана в виде приближенной формулы

$$h_t = C_t W_s^m, \quad (\text{III. 14})$$

где C_t — коэффициент, зависящий от материала, в *мк/дж*;

W_s — энергия импульсов в *дж*;

m — показатель степени (для сталей $m = 0,4 \div 0,42$).

Глубина, состав и микротвердость зоны термического влияния зависят в значительной степени от обрабатываемого материала. Глубина слоев металла с измененной структурой в зависимости от обрабатываемого материала указана в табл. 14. На рис. 22 показаны микршлифы образцов, изготовленных из различных материалов. При электроимпульсной обработке закаленных углеродистых сталей измененная зона на черновых режимах состоит из

Таблица 14

Глубина зоны термического влияния для некоторых материалов.
Длительность импульсов 800—1100 *мк/сек*

Обрабатываемый материал	Общая глубина зоны термического влияния в мм при I_{cp} в а					
	5	10	30	50	100	300
Стали:						
15	0,08	—	0,12	—	0,17	—
45 (в состоянииковки) . . .	0,09	0,12	—	—	—	—
45 (закаленная, <i>HRC</i> 48)	0,08	0,12	0,14	0,17	0,19	0,36
У8А (закаленная, <i>HRC</i> 48)	0,07	—	0,15	0,17	0,18	—
5ХНВ (закаленная)	—	—	0,07	0,1	0,1	—
Чугун СЧ 15-32	0,12	—	—	—	0,25	—
Жаропрочный сплав:						
ХН77ТЮ	—	—	0,07	—	0,1	—
ХН70ВМТЮ	—	0,05	—	—	0,08	—

так называемого «белого» плохо травящегося слоя, слоя вторичной закалки и слоя отпуска. Из-за большого перегрева (выше температуры плавления) и высокой скорости последующего охлаждения верхний слой металла, наблюдаемый в виде белой полоски при травлении 4%-ным раствором HNO_3 , содержит очень дисперсные фазы в метастабильном состоянии и плохо травится.

Для жаропрочных сплавов зона термического влияния представляет собой «белый» слой, под которым залегает металл с исходной структурой.

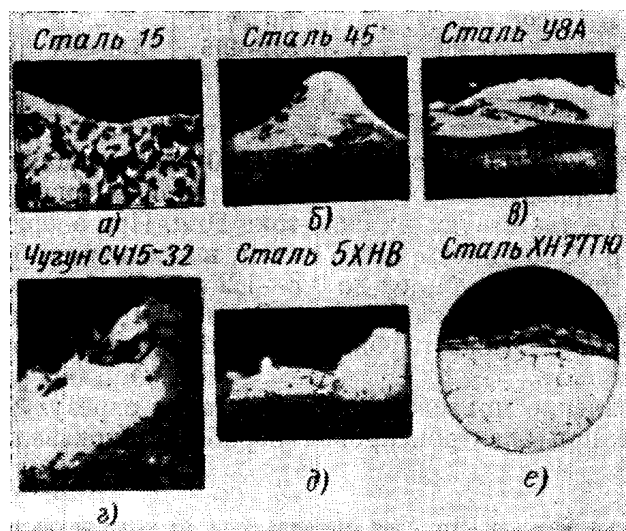


Рис. 22. Структура поверхностного слоя металла после электроимпульсной обработки:

а — сталь 15; б — сталь 45; в — сталь У8А; г — чугун СЧ 15—32; д — сталь 5ХНВ; е — жаропрочный сплав ХН77ТЮ (ЭИ437А)

Верхние слои металла имеют повышенную твердость. В табл. 15 указана микротвердость основных зон слоя металла с измененной структурой.

С повышением частоты импульсов глубина термически измененного слоя уменьшается. При высокочастотной электроимпульсной обработке на финишных режимах глубина измененного слоя для сталей и жаропрочных сплавов составляет 0,01—0,03 мм, причем термически измененный слой залегает в виде отдельных зон.

При обработке твердых сплавов протекающие в поверхностных слоях металла термические процессы могут приводить к образованию трещин, увеличению пористости и укрупнению фазы WC. Электроимпульсная обработка в области низких частот при про-

Микротвердость основных зон измененного слоя металла

Марка стали	Микротвердость зоны термического влияния в кг/мм ² ($P=200$ г)		
	белого слоя	слоя вторич- ной закалки	слоя отпуска
15	701—766	470	—
45 (в состоянии после ковки)	708—771	531	—
45 (закаленная, HRC 48)	701—716	556—596	344—491
У8А (закаленная, HRC 48)	881—915	548—667	501—591
5ХНВ (закаленная, HRC 48)	512—564	—	—

должительности импульсов до 800—1100 мк/сек производится без сколов на обрабатываемой поверхности при энергии импульсов 4—4,5 дж, соответствующих силе тока 50 а. При энергии импульсов свыше 5—6 дж имеют место сколы, вызываемые образованием кольцевых трещин глубиной до 0,8—1,2 мм. С уменьшением силы тока глубина трещин снижается. В табл. 16 указана глубина микротрещин, а также глубина залегания измененного металла и его пористость.

Сопоставление приведенных результатов с результатами, полученными при электроискровой обработке, показало, что при

Таблица 16

Характеристики измененного слоя металла при электроимпульсной обработке с длительностью импульсов 800—1100 имп/сек

Марка твердого сплава	Сред- ний ток в а	Глубина трещин в мм	Глубина залегания измененного металла в мм	Пористость измененного металла в %
ВК8	20 50	0,03—0,09 0,06—0,11	—	—
ВК15	5 20 50	0,03—0,06 0,04—0,07 0,06—0,10	—	—
ВК20	5 10 20 50	Не обнаружены 0,02—0,03 0,04—0,07 0,06—0,12	0,15—0,03 0,02—0,035 0,05—0,07 0,07—0,1	0,005—0,015 0,005—0,02 0,005—0,02 0,005—0,02
ВК30	20 50	0,02—0,04 0,06—0,07	—	—

одной и той же энергии импульсов в случае низкочастотной электроимпульсной обработки глубина микротрещин в 2—2,5 раза ниже, чем в случае электроискровой обработки. Например, при энергии импульсов 0,9—1 дж наибольшая глубина микротрещин при электроимпульсной обработке сплава ВК20 составила 0,05—0,06 мм, при электроискровой 0,13—0,17 мм. Последнее объясняется тем, что температура в канале разряда при электроимпульсной обработке значительно ниже, чем при электроискровой, а следовательно, ниже и градиент температур, в конечном счете приводящий к появлению сетки микротрещин. Это обстоятельство позволяет эффективно использовать предварительную низкочастотную электроимпульсную обработку при изготовлении деталей из твердых сплавов.

При высокочастотной электроимпульсной обработке на финишных режимах с энергией импульсов менее 0,03 дж микротрещины отсутствуют, а при энергии менее 0,002—0,003 дж исчезают какие-либо заметные изменения в поверхностных слоях металла.

На рис. 23 показана фотография образца из твердого сплава

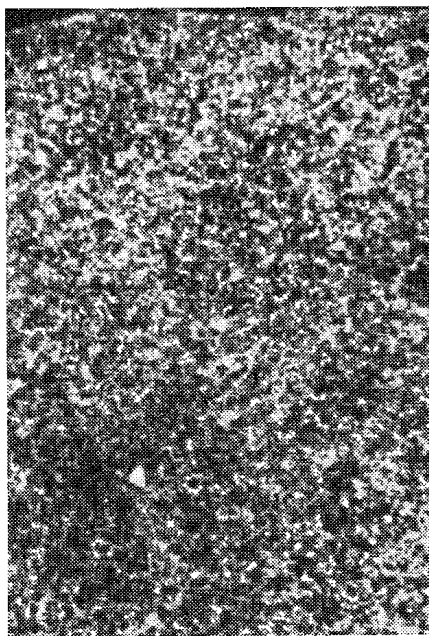


Рис. 23. Структура поверхностного слоя образца из твердого сплава ВК20 после обработки на электроимпульсной станке (частота 100 кГц; ток 10 а)

Т а б л и ц а 17

Глубина залегания измененного слоя и наибольшая глубина микротрещин при обработке твердого сплава типа ВК с содержанием 20% кобальта

Электрический режим		Энергия импульсов в дж	Глубина измененного слоя в мм	Глубина микротрещин в мм
Частота в кГц	Ток в а			
7	2	0,009	0,01	Микротрещин нет То же 0,03—0,04
	10	0,038	0,01—0,02	
	20	0,08	0,01—0,03	
25	2	0,0028	Изменений нет 0,01—0,02 0,01—0,02	Микротрещин нет То же »
	10	0,011		
	20	0,024		

ВК20, обработанного при энергии импульсов 0,001 дж (частота 100 кГц, ток 10 а). В поверхностном слое обработанного образца нет каких-либо изменений. Результаты высокочастотной обработки твердого сплава приведены в табл. 17.

ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ

Характеристика отклонений от исходного профиля электрода-инструмента. Профиль, образованный в процессе обработки поверхности, не совпадает полностью с исходным формообразующим профилем электрода-инструмента.

Отклонение обработанной поверхности от исходной в общем виде может быть представлено как сумма четырех отклонений в заданном направлении:

$$\Delta_{\text{сум}} = \Delta_{\text{ст}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{настр}} + \Delta_{\text{пр}}, \quad (\text{III. 15})$$

где $\Delta_{\text{ст}}$ и $\Delta_{\text{т}}$ — отклонения, соответственно обусловленные станком и вызываемые нагревом обрабатываемой заготовки и электрода-инструмента;

$\Delta_{\text{настр}}$ и $\Delta_{\text{пр}}$ — отклонение, обусловленное неточностью взаимного расположения профилирующего инструмента и заготовки, и отклонение, связанное с процессом эрозии.

Отклонение $\Delta_{\text{ст}}$ вызывается геометрической неточностью станка, деформациями при его нагружении и колебаниями, возбуждаемыми вибратором.

Погрешности, являющиеся следствием неточности изготовления станка, могут быть оценены по нормам на его геометрическую точность. Рабочим движением, обеспечивающим получение заданных размеров обрабатываемой поверхности, в универсальных копировально-прошивочных станках является вертикальное перемещение электрода-инструмента. Все остальные перемещения узлов станка установочные, и их влияние на точность размеров обработки может быть исключено. Отклонение от перпендикулярности направления рабочего перемещения шпинделя к поверхности стола вызывает искажение горизонтальных размеров обрабатываемого профиля. При обычной точности исполнения электророзионных копировально-прошивочных станков эти искажения сравнительно невелики. Например, для электроимпульсного копировально-прошивочного станка мод. 4723 допускаемое отклонение от перпендикулярности направления вертикального перемещения головки к поверхности стола равно $0,04 \times 200$ мм. При глубине 50 мм, что соответствует средним глубинам прошивания для фасонных поверхностей, наибольшее возможное искажение профиля составляет $\frac{0,04}{200} \cdot 50 = 0,01$ мм.

Искажение профиля, вызываемое нагружением станка весом электрода-инструмента и обрабатываемой детали, в основном

определяется жесткостью стола и инструментальной головки с несущими ее элементами. Путем применения рациональной конструкции, обеспечивающей высокую жесткость, эти искажения могут быть уменьшены до величин, мало влияющих на суммарную погрешность обработки.

На рис. 24 дана схема нагрузки основных узлов станка мод. 4723 при установке на нем заготовки электрода-инструмента. Под действием веса заготовки и электрода-инструмента происходит смещение оси шпинделя в горизонтальной плоскости, поворачиваются направляющие вертикального перемещения шпиндельной головки и ось шпинделя отклоняется от вертикали.

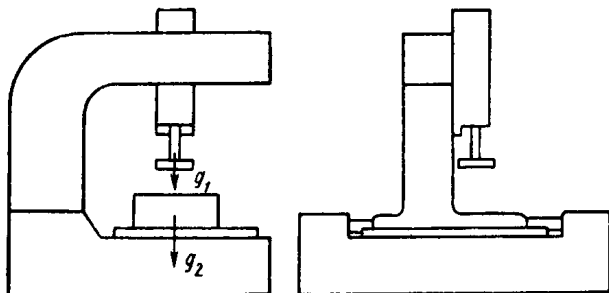


Рис. 24. Схема нагрузки основных узлов станка мод. 4723:

g_1 —вес электрода-инструмента; g_2 —вес обрабатываемой детали

Влияние смещения шпинделя, а вместе с ним и электрода-инструмента на точность размеров получаемой поверхности может быть устранено выверкой и регулированием положения электрода-инструмента относительно заготовки после нагружения станка с учетом имеющихся деформаций.

Наибольшее отклонение для рассматриваемого случая на длине 200 мм, вызываемое нагрузкой, равно 0,004 мм. Следовательно, наибольшие искажения горизонтальных размеров вследствие деформаций станка под нагрузкой при глубине профиля 50 мм будут равны $\frac{0,004}{200} \cdot 50 = 0,001$ мм.

Несколько большие значения могут иметь отклонения, получаемые вследствие колебаний электрода, возбуждаемых электромагнитным вибратором.

Стабилизация процесса с помощью колебательных движений электрода-инструмента вдоль его подачи при прошивочных работах приводит к возникновению колебаний электрода в плоскости, перпендикулярной к направлению подачи.

Соотношение амплитуд продольных и поперечных колебаний инструмента зависит от жесткости системы инструмент—шпиндель—вибратор, от мощности и конструкции вибратора, веса

и конструкции применяемого инструмента. Отношение амплитуды поперечных колебаний к амплитуде продольных полезных колебаний в конструкции со свободно подвешенным шпинделем (станок мод. 4723) достигает 0,7, а в конструкции с жестким направлением шпинделя (станок мод. 4A722) 0,1—0,2.

Ниже для станка мод. 4723 указан размах поперечных колебаний при различном весе электрода-инструмента и оптимальном размахе продольных колебаний 0,05—0,07 мм, соответствующем максимальной производительности.

Вес электрода-инструмента с приспособлениями . . .	1,5	5	10
Размах поперечных колебаний в мм	0,04—0,05	0,015—0,03	0,01—0,02

Погрешности, вызванные колебаниями электрода-инструмента в системе со свободной подвеской шпинделя, могут достигать при использовании электродов малых размеров 0,04—0,05 мм. При электродах средних размеров эти погрешности уменьшаются до 0,02—0,03. Применение дополнительных направляющих электрода-инструмента и установки шпинделя на направляющих с натягом (как в станке мод. 4A722) позволяет в 2—3 раза уменьшить указанный выше размах поперечных колебаний электрода-инструмента и вызванные им погрешности обработки.

Отклонение Δ_m . Во время обработки нагреваются электрод-инструмент, заготовка и рабочая жидкость. Колебания температуры рабочей среды определяют температурные погрешности, возникающие в связи с нагревом на финишных режимах, и могут достигать больших значений. Температура рабочей среды зависит от загрузки станка, повышается и снижается по экспоненциальному закону по мере смены заготовок. Вследствие нагрева рабочей среды при различных материалах электрода-инструмента и заготовки могут возникать сравнительно большие температурные погрешности.

Величина их в направлениях, перпендикулярных к подаче, составит

$$\Delta_m = L (\alpha_s - \alpha_d) (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (\text{III. 16})$$

где Δ_m — погрешность в результате колебаний теплового режима работы станка в мм;

L — размер обрабатываемой поверхности, изменяемый в результате температурных деформаций, в мм;

α_s — коэффициент линейного расширения материала электрода-инструмента в мм/°С;

α_d — коэффициент линейного расширения материала обрабатываемой детали в мм/°С;

Θ_1 — температура окружающей среды в °С;

Θ_2 — температура рабочей жидкости к концу обработки в °С.

В табл. 18 приведены коэффициенты линейного расширения некоторых материалов.

Таблица 18

Коэффициент линейного расширения для некоторых материалов

Материал	Коэффициент линейного расширения в $\text{мм}/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$	Материал	Коэффициент линейного расширения в $\text{мм}/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$
Незакаленная сталь	10,76	Чугун	11,4
Закаленная сталь . . .	12,4	Красная медь	17
Жаропрочный сплав ЭИ437 (ХН77ТЮ)	12,8	Алюминий	25
Твердые сплавы	5—6	Углеродистые мате- риалы	1,2—2,6

Коэффициенты линейного расширения для обрабатываемой детали и электрода-инструмента могут отличаться более чем в 2—4 раза. Из применяемых материалов наибольшие температурные погрешности будут иметь место при работе алюминиевыми электродами-инструментами и электродами-инструментами из углеродистых материалов.

При обработке фасонных поверхностей возможна непрерывная работа станка на грубых режимах в течение 3—4 ч и более. При такой работе температура перегрева достигает $40\text{—}42^\circ\text{C}$, а температурные погрешности — весьма существенных величин. Например, на длине 200 мм, что близко к средним размерам поверхностей, обрабатываемых электроимпульсным методом, температурная погрешность в случае обработки стали алюминиевыми электродами составит $\Delta_m = 200 \cdot 10^{-6} (25 - 12,4) \cdot 40 = 0,1 \text{ мм}$.

Температурная погрешность может быть резко уменьшена при снижении температуры среды. При обработке небольших деталей размерами 16—20 мм эта погрешность невелика и не оказывает большого влияния на суммарную точность обработки.

Отклонение $\Delta_{\text{настр}}$. При установке электрода-инструмента возможны его перекося по отношению к базовым поверхностям заготовки и смещение в горизонтальной плоскости. Точность координирования электрода-инструмента относительно заготовки зависит от метода установки и выверки, применяемых приспособлений и измерительных инструментов, навыка рабочего и других факторов.

При выверке электрода-инструмента используются поверочные угольники, установочные шаблоны, плоскопараллельные плитки и индикаторы, отсчетные микроскопы. Точность выверки электрода-инструмента характеризуется смещением элементов профилирующей поверхности относительно заданного положения на 0,01—0,02 мм, вследствие чего искажения профиля обрабаты-

ваемой поверхности, связанные с неточностью установки, будут достигать 0,02 мм.

При тщательно выполняемых работах и использовании оптических отсчетных устройств погрешность настройки может быть снижена до 0,01 мм.

Отклонение Δ_{np} обусловлено двумя специфическими особенностями процесса: отсутствием механического контакта между обрабатываемой поверхностью и инструментом при наличии периодически повторяющихся между ними разрядов и большим, сравнительно с механической обработкой, износом электрода-инструмента.

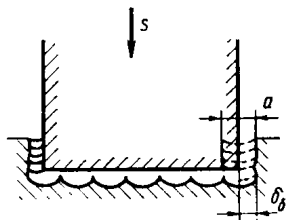


Рис. 25. Схема образования бокового зазора между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью:

δ_b — боковой зазор; s — подача электрода-инструмента; d — диаметр лунки

Процесс обработки протекает при наличии зазора между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. Силы, возникающие при возбуждении разрядов между электродом-инструментом и обрабатываемой поверхностью, при достаточно большой жесткости электродов-инструментов, мало влияют на точность обработки. Размах колебаний конца инструмента под влиянием вибраций обычно не превышает 1 мк, что не может повлечь за собой существенного снижения точности обработки.

Величина межэлектродного зазора не характеризует точности обработки, так как зазор учитывается при разработке инструмента и является составной частью коррекции профиля электрода-инструмента.

На точность обработки оказывают влияние колебания величины межэлектродного зазора, которые не могут быть заранее учтены. Различают два вида зазоров — торцовый, боковой.

Схема образования бокового зазора показана на рис. 25. Диаметральные размеры лунок, а следовательно, и размеры бокового зазора, определяются энергией импульсов.

Зависимость «энергия импульсов — боковой зазор» может быть представлена в виде выражения

$$\delta_b = C_b W_s^q, \quad (\text{III. 17})$$

где δ_b — боковой зазор в мк;

W_s — энергия импульсов;

C_b — постоянный коэффициент, например для сталей $C_b = 240 \text{ мк/дж}$;

q — показатель степени (для сталей $q = 0,36$).

При относительной погрешности определения среднего тока

(которым задается электрический режим) k отклонения зазора $\Delta\delta_z$ от расчетной величины

$$\Delta\delta_z = C_0 W_s^q [(1 + k)^q - 1], \quad (\text{III. 18})$$

где W_s — энергия импульсов, равная $\frac{U_{sm} I_{cp}}{f}$.

Величина погрешности, вызываемой отклонением фактического зазора на финишных режимах от принятой в расчетах величины, невелика. Например, при токе 5 а и частоте 25 кГц, при которых получаема шероховатость обработанной поверхности может быть оценена по 5-му классу чистоты (ГОСТ 2789—59), а энергия импульсов равна 0,007 дж, погрешность, вызванная несоответствием получаемого зазора расчетному, при использовании для контроля режимов обычных приборов с точностью 2% составит всего лишь 0,001—0,002 мм.

Погрешности, вызванные отклонением торцового зазора от расчетной величины, могут иметь значительно бóльшую величину. Исследования показывают, что при воздействии разряда на поверхность края образующихся лунок несколько возвышаются над уровнем поверхности и начало работы характерно увеличением размеров. Расчетный зазор $\delta_{тр}$ при определении размеров электрода-инструмента:

$$\delta_{тр} = \delta_{ts} + \delta_{tn}, \quad (\text{III. 19})$$

где δ_{ts} — рабочий зазор;

δ_{tn} — начальное увеличение размеров.

Соответственно погрешность торцового зазора может рассматриваться как сумма двух погрешностей:

$$\Delta_{тр} = \Delta_{т.} + \Delta_{tn}. \quad (\text{III. 20})$$

Величина фактического межэлектродного зазора $\delta_{tsф}$ зависит от подаваемого на электрод-инструмент и деталь напряжения, состава и состояния межэлектродной среды. Помимо этих факторов, большое значение имеет последовательность работы на станке. Фактический межэлектродный зазор, который определяет точность отображения заданного профиля, к концу обработки может иметь любое значение от нуля до максимальной величины — пробивного промежутка. Наивысшая точность будет получена в том случае, если сначала будет отключаться подача электрода-инструмента и процесс будет продолжаться до полного самостоятельного прекращения разрядов. В этом случае межэлектродный зазор достигает своего максимума s_0 через время $T_{вых}$ [см. формулу (II. 36)]. Экспериментально установлено, что погрешность межэлектродного зазора Δ_{ts} , связанная с установкой напряжения и колебаниями состава среды в связи с ее загрязнением, при отключении подачи и последующей работе до полного прекращения разрядов составляет 0,005—0,008 мм.

Погрешность $\Delta_{тн}$ зависит от энергии импульсов и материала электрода-инструмента. Подобно погрешности бокового зазора она связана с энергией импульсов соотношением

$$\Delta_{тн} = C_{тн} W_S^m [(1 + k)^m - 1]. \quad (\text{III. 21})$$

Показатель m равен для различных материалов электрода-инструмента 0,2—0,5. На финишных режимах погрешность $\Delta_{тн}$, вызываемая неточностью установки электрического режима, составит весьма малую величину. Для указанного выше финишного режима ($I_{ср} = 5 \text{ а}$, $f = 25 \text{ кгц}$) погрешность лежит в пределах 0,001—0,0015 мм. Таким образом, суммарная погрешность торцового зазора, при правильно построенном процессе работы на станке на финишных режимах составит около 0,007—0,01 мм.

Отклонения, вызываемые эрозионным износом электрода-инструмента, зависят в основном от эрозионной стойкости материала инструмента, режима и глубины обработки. Износ электрода-инструмента может достигать значительных величин.

Однако отклонения получаемых размеров от заданных, вызываемые износом, могут быть заранее учтены и путем рационального построения процесса обработки сведены до значений, существенно не влияющих на точность обработки. Вопрос построения процесса обработки в зависимости от износостойкости инструмента и точности рассмотрен в гл. IX.

Оценка точности электроимпульсной обработки. Фасонные поверхности для большого числа деталей задаются сочетанием горизонтальных и вертикальных размеров. Соответственно этому точность обработки определится погрешностями этих размеров.

Суммарная погрешность вертикальных размеров зависит от температурной погрешности, отклонения получаемого межэлектродного зазора от расчетной величины, от погрешностей установки и отсчета рабочего перемещения электрода-инструмента. Погрешность отсчета перемещения инструмента в основном отражается на точности расположения обработанной поверхности относительно баз и может быть уменьшена подгонкой базовых поверхностей, как, например, шлифованием зеркала штампа.

Суммарная погрешность горизонтальных размеров складывается из погрешности, вызываемой вибрациями, погрешности, обусловленной неточностью изготовления станка, погрешности, связанной с нагрузкой станка весом обрабатываемой детали и электрода-инструмента, температурной погрешности, отклонения межэлектродного зазора от расчетной величины, погрешности установки, искажений профиля электрода-инструмента, вызванных его износом. Суммарная погрешность горизонтальных размеров больше общей погрешности вертикальных размеров.

Точность, достигаемая при электроимпульсной обработке, может быть определена исходя из суммарной погрешности горизонтальных размеров.

Совпадение наибольших значений погрешностей является маловероятным. Величина составляющих погрешностей определяется совокупностью большого числа факторов, причем сочетания этих факторов имеют случайный характер. Поэтому можно с достаточным основанием считать, что распределение составляющих погрешностей следует закону нормального распределения. В соответствии с этим результирующая погрешность обработки определяется из выражения

$$\Delta_{\text{сум}} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_n^2}, \quad (\text{III. 22})$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ — составляющие суммарной погрешности.

В табл. 19 указана суммарная погрешность обработки для различных размеров обрабатываемой детали при обработке стали и твердого сплава электродами, изготовленными из алюминия, меди и графитированного материала.

Т а б л и ц а 19

Обрабатываемый материал	Материал электрода	Суммарная погрешность при размерах обрабатываемой детали в мм					
		25	50	100	200	400	800
Сталь	Алюминий	0,04	0,05	0,06	0,11	0,2	0,4
Жаропрочные сплавы	Медь	0,04	0,04	0,045	0,06	0,1	0,16
	Графитированный	0,04	0,05	0,055	0,1	0,16	0,32
Твердый сплав	Медь	0,04	0,05	0,054	0,1	—	—
	Графитированный	0,04	0,04	0,045	0,06	—	—

Температурная погрешность оказывает большое влияние при размерах детали свыше 100 мм. Она может быть снижена в 1,5—3 раза дополнительным охлаждением или переносом чистовой обработки на специальные станки. Тогда суммарная погрешность обработки фасонных деталей для широкого диапазона размеров составит 0,04—0,2 мм. Дальнейшее повышение точности, особенно в диапазоне малых и средних размеров до 100—200 мм, требует снижения других составляющих суммарной погрешности процесса обработки и в первую очередь погрешностей, вносимых колебаниями электрода-инструмента, и погрешностей установки. Повышение жесткости применяемых приспособлений, применение точных отсчетных устройств и измерительных средств, повышение

точности установки электрических режимов позволяет достигнуть точности процесса обработки фасонных деталей малых и средних размеров 0,02—0,05 мм.

Величина допуска должна быть больше возможных погрешностей процесса обработки и погрешности размеров электрода-инструмента, возникающей при его изготовлении. С достаточным основанием можно считать, что распределение отклонений размеров, получаемых при изготовлении электрода-инструмента, следует закону нормального распределения. Отсюда допуск на деталь

$$\delta_d = \sqrt{\Delta_{об}^2 + \delta_{эл}^2}, \quad (\text{III. 23})$$

где $\Delta_{об}$ — возможная погрешность обработки;

$\delta_{эл}$ — допуск на размеры электрода-инструмента.

Допуск на размеры электрода-инструмента может быть установлен исходя из допуска на размеры обрабатываемой детали и погрешности обработки.

Влияние неточности изготовления электрода-инструмента на точность получаемых деталей характеризуется следующим выражением:

$$\xi = \sqrt{1 + k^2} - 1, \quad (\text{III. 24})$$

где ξ — изменение погрешности размеров обрабатываемой детали в связи с неточностью изготовления электродов-инструментов в относительных единицах;

k — относительная погрешность размеров электродов-инструментов в долях от погрешности обработки, равная $\frac{\Delta_{эл}}{\Delta_{об}}$,

где $\Delta_{эл}$ меньше или равна $\delta_{эл}$.

Изменения погрешности размеров обрабатываемой детали в зависимости от величины k приведены ниже.

Относительная погрешность размеров электрода-инструмента k в %	10	20	30	40	50	60	80	100
Величина изменения погрешности размеров обработанной детали в %	5	11	15	18	22	27	35	41

Из таблицы видим, что при допуске на размеры электрода-инструмента в пределах до 30—50% от возможной погрешности процесса обработки суммарная погрешность размеров обрабатываемых деталей меняется незначительно. Отсюда следует, что величину допуска на электрод-инструмент целесообразно выбирать равной 30—50% от величины погрешности, возникающей в процессе обработки.

При этом величина допуска составит 0,015—0,1 мм. Такая величина допуска соответствует обычной точности инструментальных работ.

Износ электрода-инструмента. Износ электрода-инструмента является результатом электроэрозионного разрушения второго профилирующего электрода. Относительный объемный износ, определяющий точность отображения на обрабатываемой поверхности исходного профиля электрода-инструмента,

$$\gamma = \frac{Q}{M} \cdot 100\%, \quad (\text{III. 25})$$

где Q и M — скорости съема металла соответственно с электрода-инструмента и обрабатываемой детали.

Объемный износ может изменяться как при изменении скорости съема с обрабатываемой детали M , так и с электрода-инструмента Q .

Износ электрода-инструмента зависит от параметров импульсов, размеров обрабатываемой поверхности, условий смены рабочей жидкости, настройки регулятора подачи, материала электрода-инструмента, материала обрабатываемой детали и других факторов.

Выше отмечалось два фактора, связанных с параметрами импульсов и существенно влияющих на разрушение электрода-инструмента: термическое разрушающее воздействие и появление защитных углеродистых пленок на электроде-инструменте.

Опыты подтвердили, что наряду с вредным разрушающим воздействием при возбуждении разрядов на поверхности нагретого электрода откладывается слой углерода, выделяемого из минерального масла. Рентгеноструктурный анализ этого слоя показал, что он состоит из графита кристаллической структуры и включает частицы металла электрода-заготовки.

Температура на поверхности электрода и интенсивность образования теплостойкой углеродистой пленки непосредственно связаны с длительностью и скважностью импульсов. Увеличение длительности импульсов и снижение скважности приводит к более интенсивному выпаданию углеродистых защитных пленок. Это, в свою очередь, вызывает снижение разрушающего воздействия

Т а б л и ц а 20

Износ электродов-инструментов в зависимости от длительности импульсов (мощность в эрозионном промежутке 0,5—1 квт)

Длительность импульсов в мксек	Относительный объемный износ в % электродов-инструментов	
	медных	графитированных ЭЭГ
10 000	3—5	Имеет место наращивание
2 500	5—6	
1 000	12—13	
500	17—18	
100	50—60	
20	80—100	15—18

на электрод-инструмент. В табл. 20 приведены полученные экспериментальные данные по износу стали 45 при обработке ее электродами из меди и графитированного материала.

Изменение длительности импульсов сказывается на изменении износа в очень сильной степени. С точки зрения износостойкости электродов-инструментов целесообразно процесс обработки осуществлять при больших длительностях импульсов или, что то же самое (имея в виду постоянную скважность), при низкой частоте. Применение новых идей и схем генераторов импульсов в последнее время позволило достигнуть малого износа также и на высоких частотах.

Одно и то же значение рабочего тока (мощности) может быть получено в некоторых типах генераторов при различных сочетаниях напряжения холостого хода и токоограничивающего сопротивления. Изменение напряжения холостого хода и токоограничивающего сопротивления при одинаковом среднем токе, а следовательно, и одинаковой вводимой в зону обработки мощности может повлечь за собой (табл. 21) изменение скважности и длительности импульсов. В пределах регулирования машинных генераторов эти изменения импульсов, существенно не отражаясь на скорости съема, иногда значительно изменяют износ электрода-инструмента. В табл. 22 сопоставлены для одинаковых средних токов, но разных напряжений холостого хода, износ электрода-инструмента и скорость съема при работе медными электродами по стали 45 на генераторе типа МГИ-3.

Таблица 21

Износ медного электрода-инструмента в зависимости от напряжения и скважности

I_{cp} в а	U_{xx} в в	Скважность	Длительность в мксек	Площадь обработки в мм ²			
				$F=2000$		$F=6000$	
				Скорость съема в мм ³ /мин	Объемный износ в %	Скорость съема в мм ³ /мин	Объемный износ в %
10	30	3	840	80	8—9	—	—
	15,5	4,1	600	78	15,0	—	—
30	30	2,95	830	370	14	—	—
	15	3,9	630	380	17,4	—	—
150	30	2,2	1100	1840	18	2560	17,5
	25	2,4	1000	1800	19,8	2500	19

На рис. 26 показан объемный износ в зависимости от площади обрабатываемой поверхности (стали 45) электродами из красной меди. Износ на площадях, меньших F_{opt} , возрастает. Работа при F_{opt} соответствует оптимальным соотношениям скорости съема и износа.

Принудительная подача рабочей жидкости в зону обработки влияет на процесс отложения углерода на электроде-инструменте. При определенных величинах давления у металлических электродов происходит изменение условий «гнездования», отрыв углеродистой пленки, сопровождаемый возрастанием износа.

На величину зазора, от которого зависит эвакуация продуктов эрозии, а следовательно, и состав импульсов, оказывает влияние настройка регулятора. Вследствие этого также изменяются условия «гнездования» и на одном и том же режиме получаются различные показатели по износу. Это является одним из факторов, обуславливающих большое колебание износа электрода-инструмента, достигающее 40 %.

В качестве материала электрода-инструмента при электроимпульсной обработке могут быть использованы красная медь, серый чугун СЧ 15-32, алюминиевые сплавы Д-1, АЛ5, АЛ3В, алюминий, углеродистые материалы, вольфрам и др.

Красная медь обеспечивает устойчивую работу и может быть использована в широком диапазоне электрических режимов. Износ ее, как показано в табл. 21, зависит от параметров импульсов. В области низких частот при длительностях импульсов от 500 мксек и выше, соответствующих высокопроизводительной обработке, с увеличением мощности износ несколько возрастает. Общий диапазон износа в области низких частот при обработке сталей медными электродами составляет 0,2—20 %.

Зависимость износа от электрического режима для чугуна СЧ 15-32 имеет примерно тот же характер, что и для меди: с увеличением тока износ возрастает. Величина износа для чугунных электродов изменяется в более широких пределах по сравнению с медными. Результаты по износу чугунных электродов (на низких частотах при токах до 30—50 а) близки к имеющим место результатам при работе (длительность импульсов 800—1000 мксек) медными электродами. С увеличением тока свыше 80—100 а износ чугунных электродов-инструментов начинает заметно превышать износ медных электродов. Увеличение износа сопутствует неустойчивой работе.

Алюминиевые электроды-инструменты и электроды-инстру-

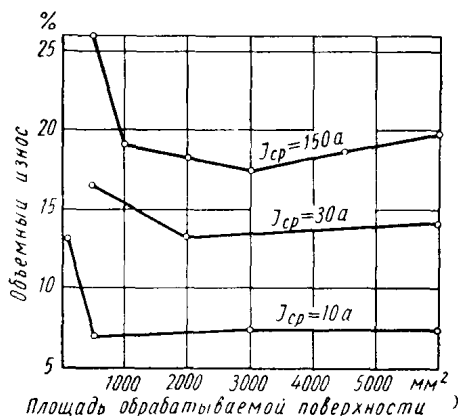


Рис. 26. Объемный износ электрода-инструмента в зависимости от площади обработки:

материал образца—сталь 45; материал электрода — медь; рабочая жидкость—индустриальное масло 12; частота 400 имп/сек

менты из сплавов алюминия эффективно используются на низких частотах при длительностях импульсов свыше 500 мксек.

Характер износа алюминиевых сплавов иной, чем меди и чугуна. Для этих материалов зависимость износа от тока в диапазоне 5—30 а имеет круто падающую характеристику. На токах до 5—7 а у электродов из алюминиевых сплавов наблюдается повышенный износ, достигающий, например, при длительности импульсов 800—1000 мксек 50—60%. При увеличении тока до 10—15 а износ резко сокращается и в диапазоне режимов $I_{cp} = 35 \div 100$ а для электродов-инструментов из алюминиевых спла-

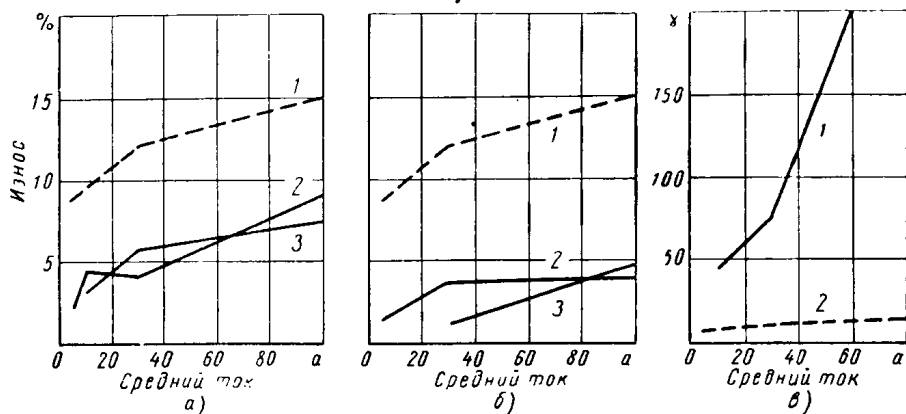


Рис. 27. Износ электрода-инструмента при обработке различных материалов (частота 400 имп/сек; рабочая жидкость — индустриальное масло 12; материал электрода — медь). Обрабатываемый материал:

а — стали: 1 — 45; 2 — ХН77ТЮ; 3 — ХН70ВМТЮ; б — алюминиевые сплавы: 1 — 45; 2 — АЛ5; 3 — Д1; в — твердый сплав и сталь: 1 — ВК15; 2 — 45

вов составляет на низкой частоте 5—20%. Для алюминиевых электродов и электродов из алюминиевых сплавов характерно резкое возрастание износа на острых кромках и в местах резких переходов от малых сечений к большим.

Наиболее благоприятные результаты по износу получены при работе электродами-инструментами из графитированных материалов марки ЭЭГ. Износ графитированных электродов в десятки раз меньше, чем медных. Графитированные материалы стабильно работают как на низких, так и на высоких частотах.

Вольфрамовые электроды-инструменты занимают по износу промежуточное положение между графитированными и медными электродами. Износостойкость вольфрамовых электродов, например при длительности импульсов 1000 мксек и скважности, составляет 2—3%, что в 4—5 раз меньше износа медных электродов и примерно в 10 раз больше износа графитированных электродов.

Изменения скорости съема металла с обрабатываемой поверхности, как было указано выше, непосредственно отражаются на относительном износе электрода-инструмента.

Установлено, что износ электрода следует в порядке, обратном обрабатываемости материала (см. табл. 11).

На рис. 27 приведены полученные зависимости износа от тока для электродов при обработке сталей, алюминиевых и твердых сплавов. Износ электродов при обработке стали 45 показан на рис. 28. Износы электродов при обработке низколегированных сталей примерно одинаковы. Например, в диапазоне токов 5—100 *a* при длительности импульсов 800—1000 *мксек* износ при обработке стали 5ХНВ составил 7—18% против 8—16% для стали 45.

Для жаропрочных сплавов типа сплавов ХН77ТЮ (ЭИ437А) и ХН70ВМТЮ (ЭИ617) износ при обработке электродами-инструментами из красной меди на тех же режимах лежит в пределах 3—9%, увеличиваясь с возрастанием тока.

Наилучшие результаты получены при обработке алюминиевых и магнитных сплавов. Для этих сплавов в диапазоне режимов $I_{cp} = 5 \div 100$ *a* объемный износ составил 1,5—5%, т. е. был в 3—5 раз меньше по сравнению со сталью 45.

Наибольшие износы электрода-инструмента имеют место при обработке твердых сплавов, молибдена и некоторых других тугоплавких материалов. Установлено, например, что износ при обработке твердых сплавов группы ВК при длительности импульсов 800—1000 *мксек* на черновых производственных режимах составляет для медных электродов 30—90%.

Приведенные в данном разделе фактические показатели износа относятся к оборудованию, освоенному промышленностью в 1965 г. При работе на широкодиапазонных генераторах со специально подобранными параметрами импульсов, обеспечивающими достаточно интенсивное отложение защитной углеродистой пленки, получено резкое снижение износа металлических (медных, алюминиевых) электродов против указанных показателей.

На этих генераторах получают снижение износа до практически незаметных величин при работе металлическими электродами также в области повышенных частот.

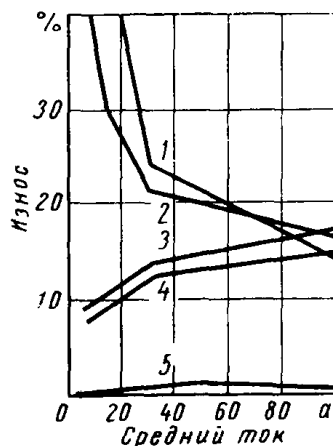


Рис. 28. Износ электрода-инструмента при обработке стали 45 электродами из различных материалов (частота 400 *имп/сек*; рабочая жидкость — индустриальное масло 12, площадь обработки 6000 *мм²*):

1 — Д1; 2 — АЛ5; 3 — СЧ 15-32; 4 — красная медь; 5 — графитированный материал

**МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ
УНИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Можно наметить следующие способы получения указанных импульсов:

1. Прерыванием постоянного или переменного тока (контактными прерывателями, электролитическими, игнитронными, полупроводниковыми, однополупериодным выпрямлением и т. д.).

2. Суммированием нескольких напряжений переменного тока различной частоты и величины с напряжением постоянного тока (наложением постоянного тока на переменный, суммированием нескольких синусоидальных напряжений различной частоты и величины с последующим выпрямлением, суммированием нескольких напряжений переменного тока специальной формы с последующим выпрямлением или с наложением постоянного напряжения и т. п.).

3. Преобразованием постоянного или переменного тока в импульсный при помощи электронно-ионных приборов, тиристоров, транзисторов или их сочетания (преобразователями частоты с последующим усилением мощности и выпрямлением, инвертированием и т. п.).

4. Преобразованием непрерывного переменного тока в импульсный переменный ток при помощи нелинейных устройств (варисторов, варикондов, магнитонасыщенных устройств — дросселей насыщения, пик-трансформаторов, магнитных усилителей, различных формирующих устройств) с последующим выпрямлением.

5. Непосредственным генерированием униполярных или знакопеременных импульсов напряжения путем преобразования механической энергии в электрическую (электромашинными генераторами импульсов) с последующим выпрямлением знакопеременных импульсов.

Из всего многообразия исследованных типов генераторов униполярных импульсов промышленное применение получили электромашинные, магнитонасыщенные, электронно-полупроводниковые.

Электромашинные генераторы импульсов можно разделить на три группы: а) генераторы с внешним выпрямлением (синхронные

и индукторные генераторы знакопеременных импульсов с внешним кремниевым или германиевым выпрямителем); б) коммутаторные генераторы с механическим встроенным выпрямителем (синхронные генераторы с коммутатором); в) униполярные генераторы, вырабатывающие, вследствие наличия различной магнитной проводимости по окружности статора, непосредственно в обмотке, без каких-либо выпрямителей, униполярные импульсы.

Генераторы каждого из указанных типов могут быть выполнены одно- и многофазными, одно- и многопостовыми. Под однофазными генераторами будем в дальнейшем понимать генераторы, имеющие одну (однопостовые) или несколько (многопостовые) обмоток, в которых индуктируются э. д. с., одинаковые по фазе.

Под многофазными генераторами будем понимать генераторы, имеющие несколько обмоток якоря, в каждой из которых генерируются э. д. с., не совпадающие по фазе и включаемые либо на отдельные нагрузки (многопостовые), либо на одну и ту же нагрузку поочередно (однопостовые).

Статические магнитонасыщенные генераторы разделяются на две группы: пик-трансформаторы и дроссели насыщения или магнитные усилители. Обе группы имеют внешние кремниевые или германиевые выпрямители.

Электронно-полупроводниковые генераторы униполярных импульсов относятся также к системам с внешним выпрямлением.

Общий диапазон частот, используемых при электроимпульсной обработке, заключен в пределах $50\text{—}2\cdot 10^5$ *имп/сек*. Этот диапазон, как указывалось выше, разбивается на три поддиапазона: низкочастотная электроимпульсная обработка — до 300 *имп/сек*; среднечастотная — от 300 до 1000 и высокочастотная — свыше 1000 *имп/сек*.

Соответственно поддиапазнам частот распределяются области применения генераторов различного типа: в низкочастотном — магнитонасыщенные генераторы преимущественно на большие мощности (до 100—150 *квт*); в среднечастотном — машинные коммутаторные на средние мощности (до 15—20 *квт*); в высокочастотном — электронно-полупроводниковые на малые мощности (до 5 *квт*), индукторные — на средние мощности. Тиристорно-транзисторные широкодиапазонные генераторы перекрывают несколько диапазонов от десятков импульсов в секунду до примерно $2\cdot 10^5$ *имп/сек*.

Во всех диапазонах скважности импульсов не превышают 5 с тенденцией отклонения в меньшую сторону (1,05—3). Амплитуды импульсов напряжения колеблются от 60 до примерно 250 в, причем верхние значения соответствуют большим мощностям и более высоким частотам.

МАГНИТОНАСЫЩЕННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Как показано в гл. II, для предварительной, высокопроизводительной обработки целесообразно использование импульсов больших энергий и низких частот.

Униполярные импульсы низкой частоты могут быть получены различными способами (машинными генераторами униполярных импульсов, ионно-электронными и полупроводниковыми генераторами).

Наиболее простым способом является однополупериодное выпрямление однофазного напряжения промышленной частоты (50 гц). Для получения требуемой величины напряжения, обычно отличающейся от стандартной, необходимо включение согласующего трансформатора или автотрансформатора. Для получения частоты выше 50 имп/сек может быть применено двухполупериодное выпрямление однофазного напряжения, а также одно- или двухполупериодное выпрямление многофазного напряжения. Однако при этом для придания импульсного характера выпрямляемому напряжению необходимо введение нелинейных элементов (нелинейных сопротивлений или емкостей, пик-трансформаторов, дросселей насыщения, магнитных усилителей и др.).

Магнитонасыщенные генераторы на базе пик-трансформаторов.

Пик-трансформаторы до сих пор находили практические применения для управления тиратронами и ртутными выпрямителями в различных схемах автоматики, в некоторых радиоустройствах и ряде других установок и применяются для преобразования синусоидальных напряжений и токов в импульсные. Для всех перечисленных применений используются маломощные пик-трансформаторы.

Принцип получения пиковой формы кривой напряжения в трансформаторе основывается на уплощении кривой потока в его сердечнике во времени. Известно, что при последовательном соединении первичной обмотки трансформатора с индуктивностью неизменной величины и при синусоидальном общем напряжении кривая потока в сердечнике трансформатора уплощается во времени, а кривые первичного и вторичного напряжений трансформатора, как производные от потока во времени, заостряются. Этот принцип и лежит в основе работы пик-трансформаторов. По конструкции сердечника однофазные пик-трансформаторы могут быть следующих типов.

1. Трансформаторы с последовательно включенной в первичную цепь индуктивной катушкой (рис. 29, а). Индуктивность катушки должна быть постоянной, поэтому катушка может быть либо вообще без стального сердечника, либо иметь ненасыщенный сердечник. Насыщающийся трансформатор 1 может быть либо

стержневого типа, набранный из штампованных листов, либо тороидальный витой.

2. Трансформаторы стержневого и броневые типов с магнитными шунтами 2 (рис. 29, б). Роль внешней индуктивности здесь играет индуктивность рассеяния первичной обмотки, увеличенная за счет магнитных шунтов.

Для насыщающихся сердечников пик-трансформаторов целесообразно применять специальные магнитные сплавы, которые

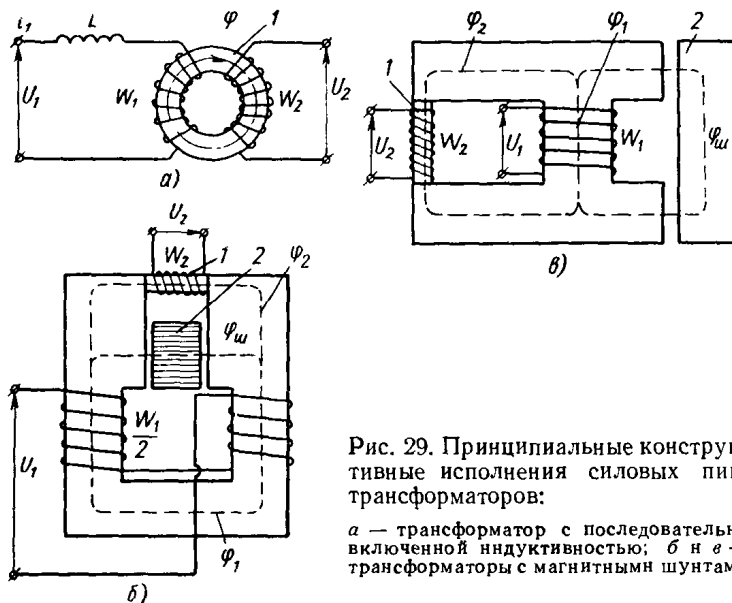


Рис. 29. Принципиальные конструктивные исполнения силовых пик-трансформаторов:

а — трансформатор с последовательно включенной индуктивностью; б и в — трансформаторы с магнитным шунтом

быстро насыщаются при превышении определенного значения намагничивающей силы обмотки. Это значительно улучшает форму импульса э. д. с., делая ее более резковыраженной. Пик-трансформаторы для питания станков электроимпульсной обработки металлов являются в отличие от обычно применяемых пик-трансформаторов силовыми трансформаторами относительно большой мощности, и на их работу существенное влияние оказывает вторичный ток нагрузки.

Для проверки основных расчетных соотношений исследовали два образца силовых пик-трансформаторов на средние токи 50 а и 400 а. Оба образца были выполнены с тороидальными сердечниками из холоднокатаной ленточной стали марки Э310. Первый образец имел сердечник из стали толщиной 0,1 мм с секционированной обмоткой, что позволило получать различные соотношения витков первичной и вторичной обмоток. На этом образце были выполнены экспериментальные исследования влияния величины индуктивности, включаемой последовательно с пик-транс-

форматором, числа витков первичной и вторичной обмоток и величины первичного напряжения на величины максимального и среднего напряжений вторичной обмотки и тока первичной обмотки.

Второй образец имел сердечник из ленточной холоднокатаной стали толщиной 0,35 мм марки Э310 и обмотку, выполненную из голой полосовой меди. Конструкция обмотки позволяла разбивать имеющееся количество витков практически в любом отношении между первичной и вторичной обмотками, а также включать пик-трансформатор по схеме автотрансформатора с довольно широкими пределами регулирования коэффициента трансформации. На этом образце были проведены опыты нагрузки при различных соотношениях витков первичной и вторичной обмоток и нескольких величинах внешней индуктивности при неизменном первичном напряжении. Данные испытаний показали возможность получения вполне четких импульсов тока во вторичной цепи с достаточной величиной скважности (от 1,5 до 2,5) при средних токах до 400 а. Включение по автотрансформаторной схеме позволило получить существенную экономию меди и уменьшение габаритов пик-трансформатора.

Существенными недостатками пик-трансформаторов с тороидальными сердечниками является относительно большой расход холоднокатаной стали, из которой в этом случае выполняется весь сердечник трансформатора, большая трудоемкость обмотки и необходимость включения внешней индуктивности, выполняемой в виде отдельного ненасыщенного дросселя, что увеличивает расход активных материалов и повышает стоимость всей установки. Кроме того, пик-трансформаторы забирают из питающей сети большую реактивную мощность, что снижает $\cos \varphi$ установки до 0,25—0,30, а также (в целях ограничения возможного тока короткого замыкания во вторичной цепи, вызываемого металлическим замыканием электрода и инструмента) требуют включения в рабочий контур балластного токоограничивающего безындуктивного сопротивления, что снижает к. п. д. Изменять ток нагрузки можно главным образом изменением величины балластного сопротивления и частично — напряжения вторичной обмотки, что может производиться только ступенчато.

Образцы силовых пик-трансформаторов стержневого типа с магнитными шунтами показали примерно те же результаты по производительности, что и при тороидальных сердечниках.

Магнитонасыщенные генераторы на базе пик-трансформаторов не получили широкого применения и используются только для питания специализированных многоконтурных установок.

Магнитонасыщенные генераторы на базе магнитных усилителей или дросселей насыщения. Идея такого источника униполярных импульсов заключается в том, что при подаче напряжения переменного тока через дроссель насыщения на нагрузку можно

соответствующим изменением величины подмагничивания получить в нагрузке импульсы тока. Длительность пауз между импульсами тока изменяется при изменении подмагничивания дросселя, что одновременно приводит к изменению величины среднего тока, проходящего через нагрузку. Таким образом, можно регулировать ток нагрузки простым и экономичным способом — изменением величины тока управления, что легко выполняется в связи с малой величиной тока и позволяет значительно проще осуществлять автоматическое поддержание заданного режима нагрузки. Ограничение тока короткого замыкания также осуществляется достаточно просто — введением обмотки обратной связи, которая при увеличении тока автоматически изменяет величину подмагничивания таким образом, чтобы ток короткого замыкания не превышал заданного предела. Отсутствие балластного токоограничивающего сопротивления существенно повышает к. п. д. источника и снижает удельный расход электроэнергии.

У «идеального» магнитного усилителя, т. е. магнитного усилителя с прямоугольной петлей гистерезиса и без потерь в обмотках, полное сопротивление в течение одной части полупериода питающего напряжения очень велико, а в течение остальной части этого же полупериода очень мало. Переход от одного значения полного сопротивления к другому совершается мгновенно. Величина фазового угла α (угол насыщения), при которой происходит изменение величины сопротивления, определяется величиной тока подмагничивания дросселя и может изменяться от нуля до π . Магнитный усилитель обычно имеет два дросселя насыщения, каждый из которых представляет собой трансформатор, в простейшем случае, с двумя обмотками — рабочей обмоткой, по которой протекает ток нагрузки, и обмоткой управления. Рабочие обмотки двух дросселей могут соединяться последовательно или параллельно, а обмотки управления соединяются последовательно. Возможны два крайних режима работы дросселей насыщения — работа со свободными четными гармониками и работа с подавленными четными гармониками. В дальнейшем была принята схема с параллельным соединением рабочих обмоток, которая практически обеспечивает работу со свободными четными гармониками тока независимо от величины сопротивления обмотки управления.

В связи с необходимостью получения на выходе магнитного усилителя униполярных импульсов напряжения рабочие обмотки включаются на сеть через выпрямительный мост. В этом случае получается магнитный усилитель с самонасыщением, дающий на выходе постоянный ток. Схема амплистата постоянного тока дана на рис. 30. Может быть применена также схема со средней точкой; при этом рабочая обмотка каждого дросселя включается между средней точкой и одним из концов вторичной обмотки питающего трансформатора (рис. 31). В этом случае число выпрямителей

уменьшается вдвое при одновременном увеличении вдвое обратного напряжения, что вследствие относительно небольшой требуемой величины напряжения питания для электроимпульсных установок не представляет затруднений и мало сказывается на стоимости выпрямителей. В схеме со средней точкой питающий трансформатор имеет в 2 раза большее число витков вторичной обмотки, но вторичная обмотка имеет действующее значение тока, а следовательно, и сечение меди в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем в мостовой схеме. В конечном счете, во вторичной обмотке расход меди увели-

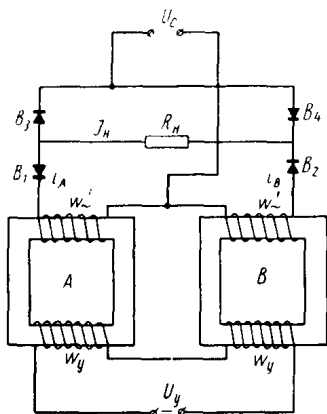


Рис. 30. Мостовая схема амплитата постоянного тока

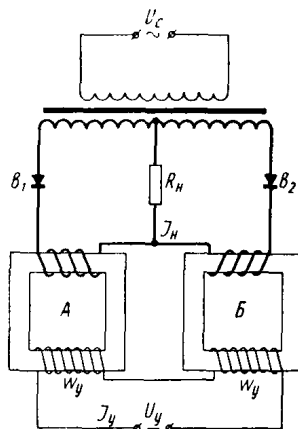


Рис. 31. Схема амплитата постоянного тока со средней точкой

чивается примерно в $\sqrt{2}$ раз и несколько увеличатся размеры магнитопровода, однако удорожание трансформатора, при относительно высокой стоимости полупроводниковых выпрямителей, будет меньше снижения стоимости выпрямителей.

Основными характеристиками магнитонасыщенных генераторов импульсов, выполненных на базе амплитата постоянного тока, являются: скважность тока нагрузки q , кратность регулирования тока нагрузки и кратность тока короткого замыкания по отношению к номинальному току. Магнитный усилитель в схеме генератора применяется как источник импульсов, и такие его характеристики, как коэффициент усиления и быстродействие, практически не имеют значения. Меняя ток подмагничивания (ток управления), изменяют угол насыщения α и тем самым изменяют величину среднего тока и скважность. Если напряжение питания синусоидальное, то средняя величина выходного напряжения на нагрузке

$$U_{ncp} = 0,45U (1 + \cos \alpha), \quad (IV. 1)$$

где U — действующее значение напряжения питающего трансформатора.

Из этого выражения найдем, что

$$\alpha = \arccos \left[2,22 \frac{U_{н\text{ср}}}{U} - 1 \right] \quad (\text{IV. 2})$$

и скважность

$$q = \frac{\pi}{\pi - \alpha}. \quad (\text{IV. 3})$$

Напряжение питания является заданной величиной и определяется величиной зазора, необходимого для устойчивой работы при данном токе и частоте. Обычно для питания магнитонасыщенных генераторов применяются трансформаторы с двумя-тремя ступенями напряжения, что достаточно для перекрытия требуемого диапазона токов. Падение напряжения на промежутке является определенной величиной для заданных материалов электродов и рабочей среды и колеблется в пределах 25—35 в. Кратность регулирования тока нагрузки для генератора равна отношению номинального тока нагрузки к минимальному току и определяется из характеристики управления генератора, т. е. из зависимости тока нагрузки от тока управления. Минимальный ток протекает в усилителе при отсутствии подмагничивания постоянным током и определяется магнитным состоянием сердечника, обусловленного действием переменного питающего напряжения. При питании рабочей обмотки усилителя переменным током имеем (при пренебрежении падением напряжения в обмотке)

$$U = 4,44 B_{m0} f \omega F, \quad (\text{IV. 4})$$

где B_{m0} — индукция холостого хода;

f — частота питающей сети;

ω — число витков рабочей обмотки;

F — сечение магнитопровода усилителя.

Чем больше B_{m0} , тем больше значение минимального тока. При этом для заданного U уменьшается произведение ωF , а следовательно, габариты усилителя. Требования к кратности регулирования в магнитонасыщенных генераторах не являются жесткими, и последняя находится в пределах 8—10. Третьей характеристикой генератора является кратность тока короткого замыкания, возникающего при замыкании накоротко эрозионного промежутка, по отношению к его номинальному значению. Необходимая кратность тока обеспечивается подбором отрицательной обратной связи по току и может быть получена любой величины, вплоть до единицы.

Один из разработанных и исследованных образцов магнитного усилителя с тороидальным сердечником был рассчитан на средний ток 75 а и состоял из двух одинаковых сердечников, каждый из которых собран из двух галет холоднокатаной ленточной стали марки Э310 толщиной 0,35 мм. Рабочая обмотка усилителя выполнена из изолированного провода марки ПСДК и размещена

в пазах стеклотекстолитовых гребенок, уложенных на торцовые поверхности сердечников. Обмотка управления была выполнена из круглого провода марки ПСДК и уложена в большой паз гребенки. Внешний вид этого образца усилителя показан на рис. 32.

Исследования показали, что форма импульсов тока нагрузки является вполне удовлетворительной. При любых токах имеется четко выраженная площадка нулевого тока и вполне достаточная

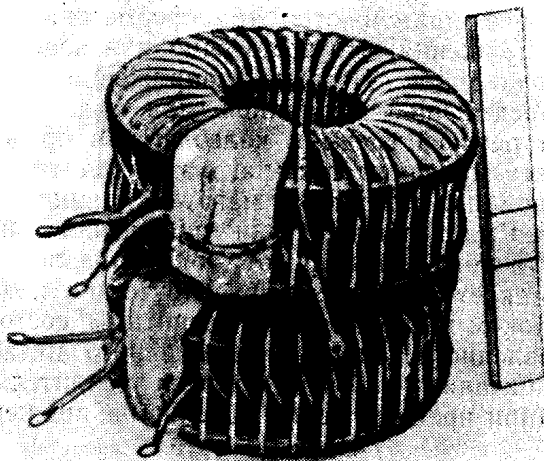


Рис. 32. Внешний вид магнитного усилителя на 75 а среднего тока

скважность импульсов. На рис. 33, а, б, в приведены осциллограммы тока при различной величине чисто активной нагрузки. Испытания, проведенные при работе на эрозионный промежуток, показали достаточную устойчивость работы и широкий диапазон регулирования (свыше 15). С целью ограничения тока короткого замыкания, возникающего при замыкании эрозионного промежутка, была использована обмотка обратной связи, включаемая на шунт в цепи тока нагрузки, которая ограничила величину тока короткого замыкания 150 а. Это позволило исключить токоограничивающее сопротивление, существенно снизить потери в контуре и уменьшить удельный расход электроэнергии. На базе испытаний образца генератора на 75 а был спроектирован трехфазный генератор ГМТ-630 по типу амплистата постоянного тока на 100 имп/сек, предназначенный для работы на три отдельных поста со средним током на каждый пост 250 а и при работе на один пост 630 а. Генератор состоит из трех секций, питаемых

от отдельных фаз трансформатора по схеме с нулевой точкой. При работе на один пост, т. е. на 630 а, секции генератора должны включаться параллельно и питаться от отдельного трансформатора. Каждая секция генератора состоит из двух тороидальных сердечников, выполненных из стали Э310 толщиной 0,35 мм и подвергнутых термической обработке. На каждом сердечнике расположена рабочая обмотка, спаянная из полувитков голой шинной меди. Обмотки обратной связи и управления охватывают оба

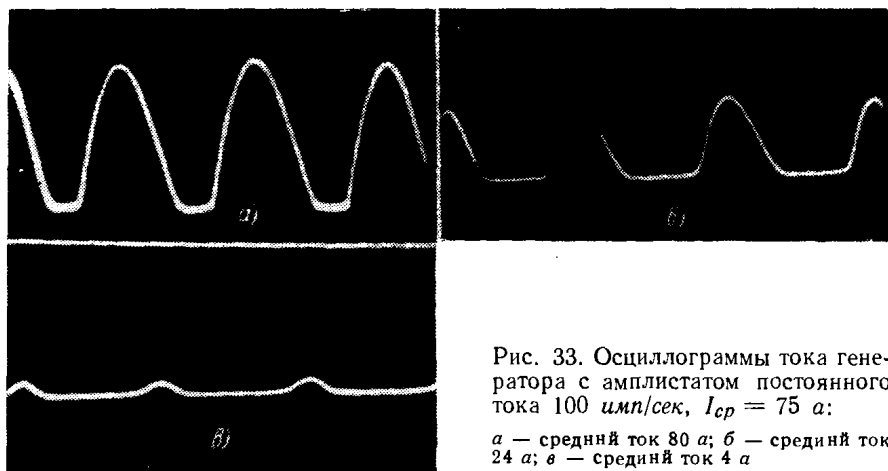


Рис. 33. Осциллограммы тока генератора с амплистатом постоянного тока 100 $\mu\text{м/сек}$, $I_{\text{ср}} = 75 \text{ а}$:

а — средний ток 80 а; б — средний ток 24 а; в — средний ток 4 а

сердечника во избежание наводки переменного напряжения. Генератор имеет шестигранный наружный металлический корпус.

В связи со сложностью изготовления силовых дросселей насыщения с тороидальным сердечником были исследованы возможности применения дросселей насыщения со стержневыми сердечниками, выполненных на базе серийных магнитных усилителей типа УСО.

Применение в этих усилителях пластин из стали Э330 с косыми срезами в местах стыков, а также увеличенного сечения ярма позволило значительно уменьшить влияние воздушных зазоров на магнитные качества сердечников и приблизить усилители со стержневыми сердечниками по своим характеристикам к усилителям с тороидальными сердечниками. В связи с этим на базе магнитного усилителя УСО-40 был разработан и выполнен промышленный образец генератора типа ГМС-630 на 100 $\mu\text{м/сек}$, 630 а, состоящий так же, как и генератор типа ГМТ-630, из трех секций по 250 а, работающих от трехфазного трансформатора, имеющего на вторичной стороне фазные обмотки со средней точкой. На базе магнитного усилителя типа УСО-56 разработан и выполнен генератор типа ГМС-1200 на 100 $\mu\text{м/сек}$, состоящий из трех секций по 400 а, также работающий от трехфазного

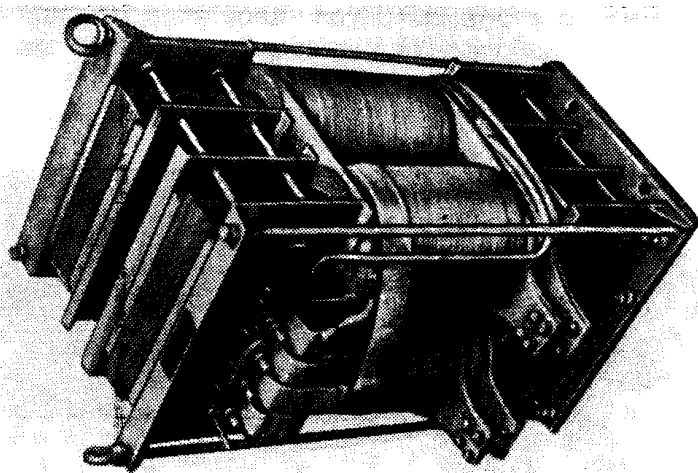


Рис. 35. Внешний вид магнитного усилителя со стержневым магнитопроводом (секция генератора ГМС-630)

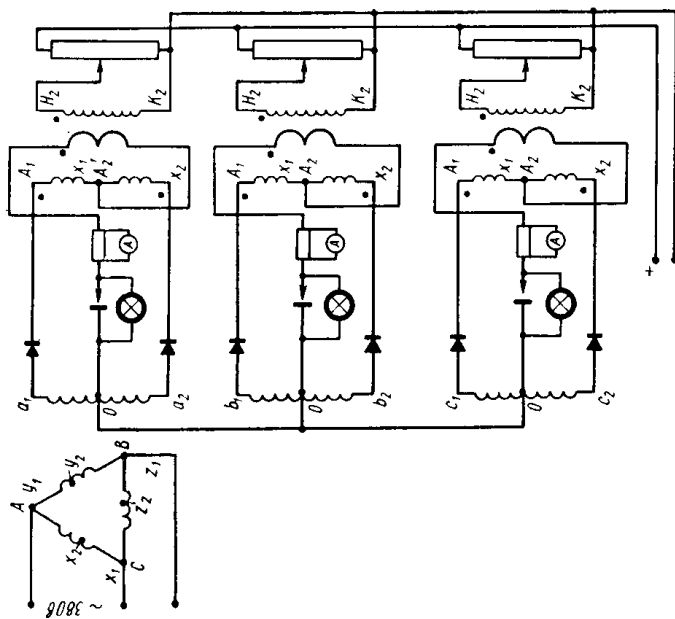


Рис. 34. Принципиальная схема низкочастотных магнитонасыщенных генераторов ГМ4-630 и ГМС-1200

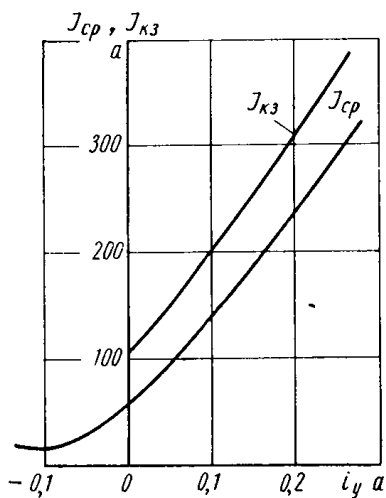


Рис. 36. Характеристика управления генератора типа ГМС-630 (J_{cp} — рабочий ток; $J_{кз}$ — ток короткого замыкания; i_y — ток управления)

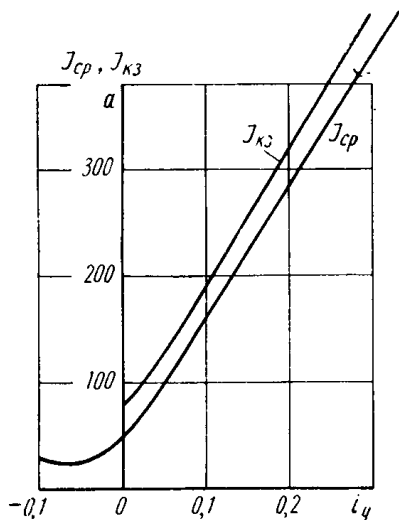


Рис. 37. Характеристика управления генератора типа ГМС-1200 (J_{cp} — рабочий ток; $J_{кз}$ — ток короткого замыкания; i_y — ток управления)

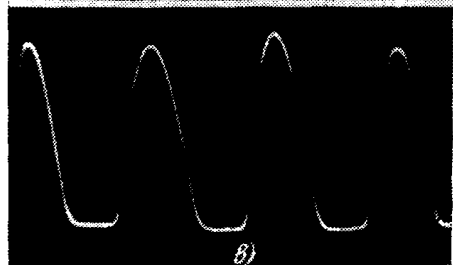
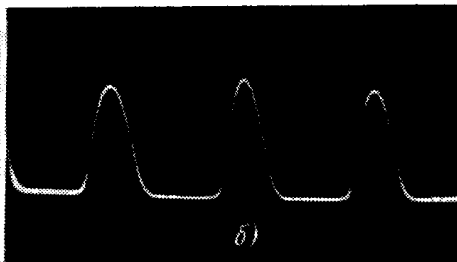
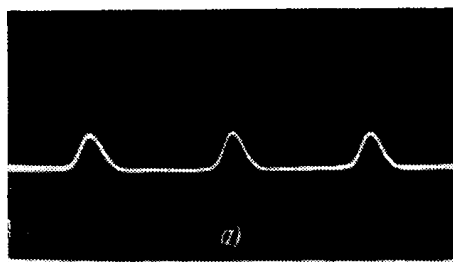


Рис. 38. Осциллограммы тока генератора с амплитатом постоянного тока типа ГМС-630, 100 имп/сек, 630 а:

a — средний ток 20 а; b — средний ток 100 а; $в$ — средний ток 250 а

трансформатора с нулевыми точками во вторичных фазных обмотках. На рис. 34 показана принципиальная схема этих генераторов, включающая питающий трансформатор с отпайками на первичной обмотке для ступенчатого регулирования величины питающего напряжения. Каждая секция представляет собой магнитный усилитель с внутренней обратной связью (амплистат) с выходом на постоянном токе, включенный на отдельную фазу вторичной обмотки трансформатора по схеме со средней точкой. Регулирование тока нагрузки осуществляется изменением тока в обмотке управления амплистата. Для ограничения тока при коротких замыканиях промежуток применена отрицательная обратная связь по току нагрузки. Для создания пути току намагничивания в моменты разрыва промежутка, а также для защиты полупроводниковых вентилях от перенапряжений промежутков шунтируется сопротивлением в виде осветительной лампы. Она одновременно может служить своеобразным указателем режима работы станка.

Каждая секция генератора состоит из двух однотипных блоков (полуфаз), спаренных вместе. Полуфаза представляет собой замкнутый двухстержневой магнитопровод прямоугольной формы, на каждом стержне которого насажены по одной рабочей катушке, одной катушке обратной связи и катушке управления (рис. 35). Катушки каждой обмотки обоих стержней соединены параллельно. На рис. 36 приведена характеристика управления, т. е. зависимость рабочего тока от тока управления, для генератора ГМС-630. Там же приведена зависимость тока короткого замыкания от тока управления, характеризующая кратность тока короткого замыкания. На рис. 37 приведены аналогичные характеристики для генератора ГМС-1200, на рис. 38 даны осциллограммы тока генератора ГМС-630 при нагрузке на активное сопротивление, по величине эквивалентное падению напряжения при номинальном токе на эрозийном промежутке. Форма импульсов тока в значительной мере зависит от индуктивности питающего трансформатора, ухудшаясь при ее увеличении.

КОММУТАТОРНЫЕ МАШИННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

· ДЛЯ СРЕДНЕЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Одним из способов получения униполярных импульсов является выпрямление знакопеременного импульсного напряжения, получаемого от машинного генератора, с помощью механического выпрямителя коммутаторного типа, встроенного в машину. Такие генераторы были названы коммутаторными. В связи с тем, что число сегментов коммутатора жестко связано со скоростью вращения, такие генераторы практически могут быть выполнены на относительно небольших частотах — не выше 800—1000 *имп/сек*. В качестве исходного генератора знакопеременных импульсов для коммутаторных генераторов применены синхронные генераторы.

Однофазный коммутаторный генератор унipoлярных импульсов состоит из переменнопoлюсной магнитной системы с пoлюсами, находящимися на статоре, и однофазной обмотки якоря, расположенной на роторе (рис. 39). Концы обмотки якоря выведены на коммутатор, состоящий из двух систем сегментов, расположенных поочередно и изолированных одна от другой. Число сегментов при однофазной обмотке равно числу пoлюсов. Сегменты каждой системы электрически соединены между собой, и к каждой системе подводится один конец обмотки якоря. На коммутатор наложены две системы щеток, расположенных таким образом, что щетки каждой полярности одновременно находятся только на одной системе сегментов и сдвинуты одна относительно другой на ширину

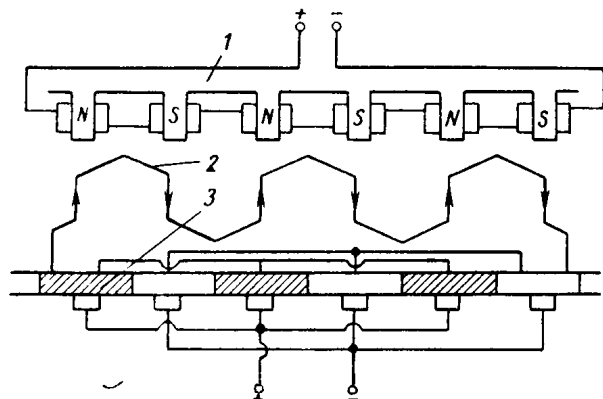


Рис. 39. Принципиальная схема коммутаторного генератора импульсов с двухполупериодным выпрямлением:

1 — магнитная система; 2 — обмотка якоря; 3 — коммутатор

сегментов (полюсное деление). Полюсное перекрытие, т. е. отношение ширины полюса к полюсному делению, выбирается значительно меньшим, чем в обычных синхронных машинах, обмотка якоря расположена под полюсами на узких участках. Такое выполнение полюсов и обмотки якоря позволяет получить кривую э. д. с., имеющую резко выраженный импульсный характер. Коммутатор, являющийся по существу двухполупериодным механическим выпрямителем, работает надежно, так как переход щеток с одной системы сегментов на другую происходит в то время, когда э. д. с. и ток проходят через нуль, что достигается соответствующим расположением щеток на коммутаторе, выбором их размеров и подбором соответствующих параметров машины и нагрузки. Коммутатор позволяет, при наличии дополнительных контактных колец, осуществлять также однополупериодное выпрямление (рис. 40). Однополупериодное выпрямление дает возможность получать от одного и того же генератора импульсы с вдвое большей скважностью и вдвое меньшей частотой, а также

позволяет осуществить одновременное питание двух независимых постов нагрузки. Частота импульсов при двухполупериодном выпрямлении

$$f_u = \frac{pn}{30}, \quad (\text{IV. 5})$$

где p — число пар полюсов;

n — скорость вращения в об/мин.

При однополупериодном выпрямлении частота

$$f_u = \frac{pn}{60}. \quad (\text{IV. 6})$$

Количество щеток определяется рабочим током и не связано с числом сегментов коммутатора.

Так как обмотка якоря занимает небольшую часть окружности якоря, то на нем могут быть выполнены дополнительные системы

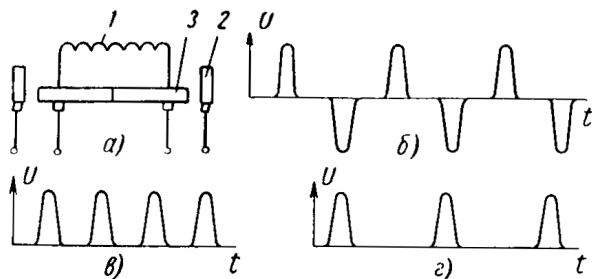


Рис. 40. Коммутаторный генератор импульсов с дополнительными контактными кольцами:

a — схема генератора (1 — обмотка якоря; 2 — контактные кольца; 3 — коммутатор); b — напряжение на кольцах; $в$ — напряжение на щетках коммутатора; $г$ — напряжение между кольцом и щеткой коммутатора

пазов, в которых в зависимости от числа дополнительных систем пазов укладываются две или несколько обмоток; каждая из них, будучи выведена на свой коммутатор, включается на отдельную нагрузку. Такие генераторы являются многофазными, многопостовыми.

Частота импульсов, снимаемых с коммутатора однофазного однопостового генератора,

$$f_u = \frac{mpn}{30}, \quad (\text{IV. 7})$$

т. е. при том же числе полюсов и неизменной скорости вращения частота увеличивается в m раз. Аналогично однофазному коммутаторному генератору многофазный генератор также может быть выполнен с однополупериодным выпрямлением. Частота получаемых импульсов напряжения при этом

$$f_u = \frac{mpn}{60}, \quad (\text{IV. 8})$$

т. е. уменьшается вдвое.

Э. д. с., индуктируемая в обмотке коммутаторных генераторов, определяется числом витков катушек обмотки и числом последовательно соединенных катушек и может быть получена любой практически требуемой величины за счет увеличения числа витков отдельных катушек обмотки. В однофазных коммутаторных генераторах импульсов, имеющих один паз на полюс и фазу и обмотку с диаметральной шагом, максимальная и средняя э. д. с. определяются следующими выражениями:

$$E_{\max} = B_{\delta \max} l v \frac{s_n}{a} 2p, \quad (\text{IV. 9})$$

где s_n — число витков катушки;
 a — число параллельных ветвей обмотки;
 $2p$ — число полюсов генератора;

$$E_{cp} = B_{\delta cp} l v \frac{s_n}{a} 2p = \Phi \frac{n}{60} 2p \frac{s_n}{a}, \quad (\text{IV. 10})$$

где Φ — полный поток машины.

Форма импульсов э. д. с. или напряжения холостого хода определяется формой кривой распределения поля в воздушном зазоре.

Относительная длительность импульсов приближенно пропорциональна отношению $\frac{b_p}{\tau}$, где b_p — ширина полюсного наконечника и τ — полюсное деление. Форма кривой распределения поля под полюсом практически не зависит от размеров междуполюсного пространства, а для одних и тех же значений отношения $\frac{x}{\delta}$ не зависят и от величины воздушного зазора. Форма же кривой в междуполюсном пространстве полностью определяется параметром ϵ :

$$\epsilon = \frac{\tau - b_p}{2\delta}. \quad (\text{IV. 11})$$

Минимальное значение индукции, а следовательно, и э. д. с. всегда равны нулю в нейтрали и не зависят от значения ϵ . Чем выше ϵ , тем лучше форма кривой распределения индукции между полюсами, т. е. тем меньше индукция между полюсами и более резко выражен импульс. Величина ϵ при заданной величине полюсного деления и скважности импульсов обратно пропорциональна величине воздушного зазора и, следовательно, воздушный зазор должен выбираться минимальным, исходя только из соображений механической прочности машины. Применение магнитных междуполюсных экранов позволяет получить значение индукции по окружности якоря между полюсами, практически равное нулю на расстоянии пяти-шести зазоров от полюса, т. е. значительно улучшить форму импульса э. д. с., что очень важно для коммутации генератора.

Индуктивное сопротивление генератора, являющееся для коммутаторного генератора импульсов особенно важным параметром, определяется так же, как и для обычного однофазного синхронного генератора:

$$X = 15,8 f \omega^2 \frac{\sum \lambda_i}{pq} \cdot 10^{-6} [\text{ом}], \quad (\text{IV. } 12)$$

или для $q = 1$ можно представить в виде

$$X = 7,9 f \left(\frac{s_n}{a} \right)^2 2 p l_i \sum \lambda \cdot 10^{-6} [\text{ом}], \quad (\text{IV. } 13)$$

где s_n — число проводников в одном пазу;

$\sum \lambda$ — суммарная удельная проводимость обмотки;

f — частота знакопеременных импульсов, имеющих место в обмотке якоря коммутаторного генератора;

l_i — расчетная длина машины в м.

При двухполупериодном выпрямлении $f = \frac{f_u}{2}$. Выразим индуктивное сопротивление обмотки якоря через максимальное напряжение:

$$X = 3,95 \frac{E_{\max}}{B_{\delta \max}} \cdot \frac{s_n}{a} \cdot \frac{\sum \lambda}{\tau}, \quad (\text{IV. } 14)$$

т. е. индуктивное сопротивление обмотки якоря генератора при всех прочих равных условиях пропорционально максимальному или среднему значению э. д. с. в квадрате, так как при неизменных τ и $B_{\delta \max}$ или $B_{\delta \text{ ср}}$ величина $\frac{s_n}{a}$ пропорциональна $E_{\max}$ или $E_{\text{ср}}$.

Форма импульса тока при питании цепи, имеющей, кроме активного R , также и индуктивное X сопротивление, отличается от формы импульса питающего напряжения. В коммутаторном генераторе импульсов даже при чисто активной нагрузке имеется индуктивное сопротивление обмотки генератора, что сказывается на форме импульса напряжения генератора при нагрузке и на форме импульса тока. Форма импульса тока очень важна как с точки зрения получения требуемых импульсов в нагрузке, так и для надежности работы самого генератора. Если пауза в кривой тока будет недостаточно велика, то получить хорошую коммутацию генератора будет очень трудно. Были найдены величины пауз, имеющих место при прямоугольной форме импульсов в зависимости от отношения $\frac{R}{X}$ при различных значениях длитель-

ности импульса. По кривым можно определить величину $\frac{R}{X}$ исходя из заданных величин тока и паузы. Для получения более высоких значений среднего тока необходимо увеличивать среднюю индукцию, окружную скорость генератора, размеры машины (D и l) и уменьшать величины $\frac{R}{X}$, $\sum \lambda$, $E_{\text{ср}}$.

При заданных скважности импульсов, среднем напряжении, коэффициенте формы и отношении $\frac{R}{X}$, определяющем условия коммутации, предельный ток может быть увеличен путем применения в наконечниках полюсов магнитных материалов, допускающих высокие индукции, материалов ротора, допускающих более высокие окружные скорости v , увеличение размеров машины (D и l), а также применения мероприятий по снижению удельных проводимостей потоков рассеяния обмотки якоря (применение низких и широких пазов, уменьшение длины лобовых частей, применение открытых пазов в якоре, уменьшение проводимости по коронкам зубцов).

Расчеты показывают, что основным фактором, определяющим предельную величину тока, является надежный токосъем. Размеры якоря позволяют выполнить машины на средние токи 1000—1500 а.

Качество коммутации в значительной степени определяет работоспособность и надежность эксплуатации коммутаторного генератора импульсов. Коммутатор в рассматриваемом генераторе импульсов представляет собой по существу механический выпрямитель. Как известно, для нормальной работы механического выпрямителя необходимо создать в моменты переключения с одной системы сегментов на другую площадки с малыми значениями тока. В коммутаторном генераторе импульсов также необходимо образовать в момент коммутации площадку нулевого тока, что обеспечивается прежде всего импульсным характером э. д. с. и наличием вследствие этого паузы в кривой тока. Паузы в кривой э. д. с. определяются магнитной цепью машины и обеспечиваются соответствующим выбором размеров и конфигурации полюсов, воздушного зазора, применением магнитных экранов и т. п. Паузы в кривой тока определяются формой кривой э. д. с., параметрами обмотки якоря и характером нагрузки (ее индуктивностью). Роль индуктивности якоря и нагрузки для коммутации важна именно с точки зрения обеспечения такой формы кривой, которая обеспечивала бы требуемую площадку нулевого тока во времени, достаточную для перехода щеток с одной системы на другую. Минимальная величина нулевой площадки тока должна обеспечить переход щетки с одного сегмента на другой, т. е. щетка должна сойти с первого сегмента, пройти изоляционный промежуток и полностью войти на второй сегмент. Для получения максимального запаса необходимо делать как можно меньше и ширину изоляционного промежутка, и ширину щетки. Минимальные допустимые значения изоляционного промежутка определяются величиной напряжения между соседними сегментами и возможностью перекрытия промежутка проходящей металлической и угольной пылью. Минимальные размеры щетки определяются величиной рабочего тока и допустимой длиной коммутатора.

В общем случае в начале коммутации через щетки проходит ток нагрузки. До начала коммутации в цепи якоря и цепи нагрузки проходит один и тот же ток ($i_{\text{я}} = i_{\text{н}}$). К моменту начала коммутации, т. е. к моменту схода щеток с сегмента (при $b_{\text{щ}} < \Delta$) или началу переключения щетками двух сегментов (при $b_{\text{щ}} > \Delta$), в цепи якоря будет протекать ток $i_{\text{я0}}$, равный току в цепи нагрузки $i_{\text{н0}}$. Процесс коммутации может проходить при ширине щетки $b_{\text{щ}}$, большей ширины Δ изоляционного промежутка, и ширине щетки, меньшей ширины изоляционного промежутка ($b_{\text{щ}} < \Delta$). Анализ показывает, что если параметры генератора и цепи нагрузки позволяют получить в кривой тока паузу нулевых или близких к нулю значений тока при максимальной нагрузке и нагрузка более или менее стабильна, то целесообразно применять щетки, ширина которых меньше ширины изоляционного промежутка между сегментами. Если нельзя обеспечить площадку нулевых значений тока или когда нагрузка нестабильна и возможны кратковременные перегрузки, более надежная коммутация будет обеспечиваться при ширине щетки большей, чем ширина изоляционного промежутка. В этом случае при том же значении тока i_0 искрение будет больше при одновременном и полном разрыве цепи якоря и нагрузки, т. е. при $b_{\text{щ}} < \Delta$; при $b_{\text{щ}} > \Delta$ цепь якоря размыкается с уменьшенным током i_0 к моменту разрыва при одновременном включении параллельно месту разрыва цепи нагрузки.

Исходя из этих общих соображений в коммутаторных генераторах, характеризующихся резкими толчками нагрузки, были применены щетки шире изоляционного промежутка между сегментами. Ширина изоляционного промежутка выбиралась минимально возможной по конструктивным соображениям и из условий предупреждения перекрытий между смежными сегментами через проводящую металлическую и угольную пыль.

Для улучшения коммутации необходимо прежде всего уменьшать индуктивность обмотки якоря путем максимального повышения индукции в воздушном зазоре, увеличения длины машины и получения формы импульса напряжения, максимально приближающейся к прямоугольной. Последнее достигается выбором величины и конфигурации полюсов и воздушного зазора, применением магнитных межполюсных экранов, применением наконечников полюсов из материалов с высокой магнитной индукцией.

Коммутаторные генераторы импульсов типа МГИ-2, МГИ-2М и МГИ-2МС выполнены на базе машин постоянного тока типа ПН-85. Внешний вид генератора МГИ-2М показан на рис. 41. Внутри станины расположено восемь явно выраженных полюсов, на которых с помощью болтов и стальных планок укреплены катушки возбуждения. В якоре имеется восемь (по числу полюсов) полужакрытых пазов, в которых уложена катушечная обмотка. Концы обмотки присоединены к коммутатору, представляющему собой коллектор с перепаянными между собой пластинами, разде-

ленными на восемь групп и соединенными через одну в две системы сегментов. Между сегментами имеется по одной холостой пластине, которые создают вместе с межламельной изоляцией требуемые изоляционные промежутки. На специальной траверсе помещены четыре brackets щеткодержателей, расположенных таким образом, что обеспечивается требуемый сдвиг между щетками различной полярности на 45° и 135° . На каждом brackete помещены три щеткодержателя. Генератор имеет аксиальную систему вентиляции, осуществляемую вентилятором, помещенным под щитом со стороны свободного конца вала, и защищен от попадания капель и посторонних предметов внутрь машины.

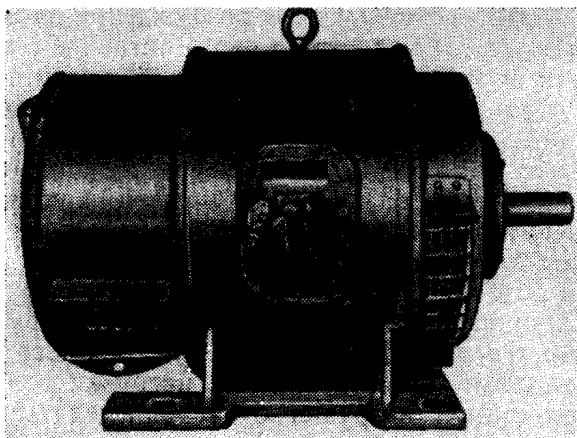


Рис. 41. Внешний вид коммутаторного генератора МГИ-2М

В связи с возможностью коротких замыканий в цепи нагрузки при работе на эрозионный промежуток, приводящих к резкому увеличению тока, а главное — искажению формы импульсов из-за резкого уменьшения активного сопротивления при малом изменении индуктивного, в цепь якоря должны включаться невыключаемые токоограничивающие и безындуктивные сопротивления порядка $0,06\text{--}0,11\text{ ом}$. Необходимо обращать внимание на максимальное уменьшение индуктивности в цепи нагрузки, для чего прямой и обратный провода сети должны идти рядом или быть свиты вместе, либо выполнены коаксиальным кабелем; токоограничивающее сопротивление должно быть выполнено как можно ближе к бифиляру, без применения в его конструкции магнитных материалов. Нельзя применять в качестве токоограничивающих сопротивлений чугунные поля, так как они обладают даже при стандартной частоте 50 пер/сек заметной индуктивностью, а при частотах 400 имп/сек , имеющих место в генераторе, индуктивность таких полей весьма велика.

Эксплуатация генератора имеет некоторые особенности. Перед пуском необходимо проверить правильность положения щеток на коммутаторе. В новой машине это определяется метками на траверсе и в щите. Если машина устанавливается после ремонта, правильность положения щеток необходимо проверить по осциллографу, для чего генератор разворачивается до номинальной скорости, на зажимы якоря включается катодный осциллограф и в обмотку возбуждения подается небольшое напряжение. При правильном положении щеток импульс напряжения на экране осциллографа получается симметричным и зона коммутации, характеризующаяся на осциллограмме перегибом в кривой импульса, находится посередине паузы или несколько сдвинута по направлению вращения. После этого доводят ток возбуждения до номинального значения и нагружают машину на чисто активное сопротивление. Если при этом возникает искрение и зона коммутации выходит за пределы паузы, необходимо щетки сдвинуть таким образом, чтобы коммутация происходила в момент минимального значения тока. В машинах типа МГИ-2, не имеющих межполюсных магнитных экранов, сдвиг щеток в сторону вращения улучшает коммутацию при нагрузке, но при этом возникает искрение при холостом ходе. Щетки можно устанавливать, сдвигая их по вращению при холостом ходе на максимально допустимую по условиям коммутации величину. Тогда при постепенной нагрузке машины искрение начнет ослабевать, при определенной нагрузке исчезнет совсем, а при дальнейшем увеличении нагрузки появится снова. Величина допустимой нагрузки будет определяться искрением при данном положении щеток. При отсутствии осциллографа щетки могут быть выставлены приближенно, для чего устанавливают их таким образом, чтобы при нахождении щели паза якоря под серединой полюса щетки находились посередине сегмента или были слегка сдвинуты по вращению (на одну-две коллекторные пластины). После этого устанавливают щетки согласно предыдущему. Установка нейтрали при помощи нулевого вольтметра здесь невозможна вследствие значительной величины паузы и зависимости напряжения от положения якоря относительно полюсов.

Уход за генератором такой же, как и за обычной машиной постоянного тока. Необходимо следить за тем, чтобы изоляционные промежутки между сегментами и соединительными кольцами на коммутаторе не загрязнялись во избежание перекрытий между сегментами, максимальное напряжение между которыми достигает 120—150 в. При выполнении указанных рекомендаций генератор имеет хорошую коммутацию — либо совершенно темную, либо с весьма небольшим искрением и не требует специального ухода.

При ремонте машины, связанном с разборкой или снятием полюсов, необходимо следить за правильной разбивкой полюсов по окружности и установкой одинакового воздушного зазора между

полюсами и якорем, который не должен отклоняться более чем на $\pm 10\%$ от своего номинального значения. Отклонение величины воздушного зазора в сторону его увеличения, так же как и неправильная разбивка полюсов, ухудшает форму импульса, делая его шире и уменьшая величину паузы.

Коммутаторные генераторы импульсов типа МГИ-3 и МГИ-3М выполнены на базе машин постоянного тока типа ПН-290. Внутри станины расположено восемь узких явно выраженных полюсов из мягкой стали, на которых при помощи медных угольников укреплены катушки возбуждения. В шихтованном якоре имеется восемь полужакрытых пазов с уложенной в них стержневой обмоткой, концы которой присоединены к коммутатору, выполненному на базе коллектора машины постоянного тока аналогично машине МГИ-2.

В отличие от генератора МГИ-2 в описываемом генераторе с целью улучшения формы импульса э. д. с. или напряжения холостого хода применены межполюсные магнитные экраны. Эти экраны выполнены из стали и укреплены между полюсами при помощи медных угольников, обеспечивающих одновременно правильное распо-

ложение экранов относительно полюсов и якоря. Применение межполюсных магнитных экранов значительно улучшает форму импульса э. д. с. или напряжения холостого хода. Это видно из осциллограммы напряжения холостого хода (рис. 42). Кривая напряжения имеет значительную нулевую площадку, т. е. промежутки, на котором напряжение холостого хода равно нулю. Такая форма импульса напряжения холостого хода, при всех прочих равных условиях, улучшает форму импульса тока, делая ее более четкой, вследствие чего улучшается коммутация. Кроме того, большая нулевая площадка в кривой напряжения холостого хода делает машину малочувствительной к сдвигу щеток в сторону вращения якоря. Это позволяет больше сдвигать щетки по направлению вращения для улучшения коммутации и таким образом существенно повышать надежность работы генераторов. На рис. 43, дана характеристика холостого хода, а на рис. 44 — внешние характеристики генератора МГИ-3М. На рис. 45 показана осциллограмма тока и напряжения генератора МГИ-3 при работе на эрозионную нагрузку.

В связи с наличием в генераторе МГИ-3 межполюсных магнитных экранов имеются некоторые особенности в нахождении пра-



Рис. 42. Осциллограмма холостого хода генератора МГИ-3 с экранами ($U_{cp} = 28,8$ в; $U = 58,0$ в; $U_{max} = 128$ в)

вильного положения щеток. Если после ремонта либо по каким-либо причинам отметка на траверсе, определяющая ее положение, исчезла, то правильное положение ее определяется по осцил-

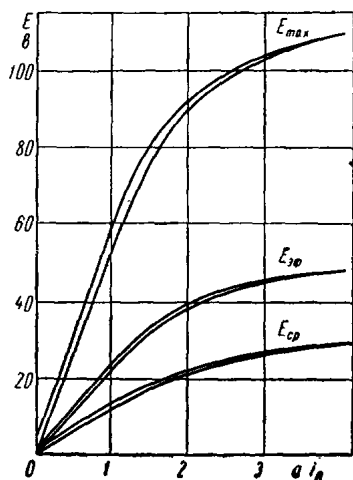


Рис. 43. Характеристики холостого хода коммутаторного генератора МГИ-3М

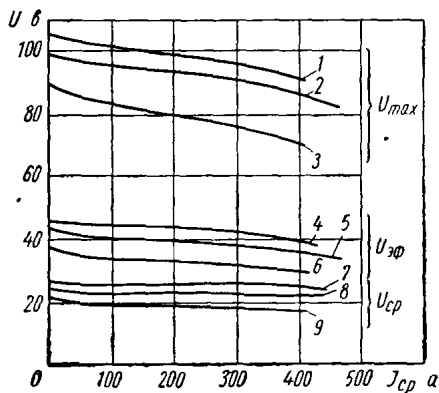


Рис. 44. Внешние характеристики коммутаторного генератора МГИ-3М:

1 — $I_0 = 4$ а; 2 — $I_0 = 3$ а; 3 — $I_0 = 2$ а;
4 — $I_0 = 4$ а; 5 — $I_0 = 3$ а; 6 — $I_0 = 2$ а;
7 — $I_0 = 4$ а; 8 — $I_0 = 3$ а; 9 — $I_0 = 2$ а

лографу или приближенно по взаимному положению траверсы и сегментов при нахождении щели паза якоря под серединой по-

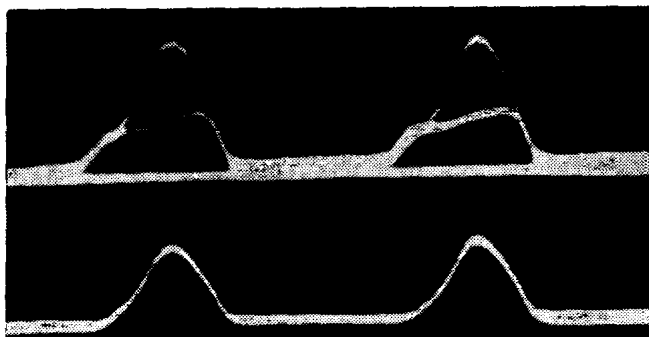


Рис. 45. Осциллограммы тока и напряжения генератора МГИ-3 при эрозионной нагрузке:

1 — напряжение генератора ($U = 46,7$ в, $U_m = 100$ в); 2 — напряжение на промежутке ($U_{ср} = 15,5$ в); 3 — ток ($I_{ср} = 220$ а, $I = 380$ а, $I_m = 1085$ а);

люса, как это описано выше. Однако, хотя перемещение траверсы в довольно широких пределах не вызывает искрения на холостом

ходу, чрезмерное перемещение ее сразу может вызвать весьма интенсивное искрение, переходящее в некоторых случаях даже в круговой огонь. Это объясняется тем, что из-за наличия экранов форма импульсов э. д. с. очерчена довольно резко и при вхождении под край импульса короткозамкнутой обмотки в ней при коммутации наводится значительная э. д. с., которая и может вызвать в режиме холостого хода интенсивное искрение, а при резком изменении положения траверсы — даже круговой огонь на коммутаторе.

Если положение щеток устанавливается по искрению при нагрузке, которое при сдвиге щеток по вращению будет уменьшаться, то при чрезмерном сдвиге щеток может возникать интенсивное искрение и даже круговой огонь при полном сбросе нагрузки, хотя при нагрузке искрение может быть и невелико. Объясняется это тем, что при сбросе нагрузки снимается реакция якоря, и если траверса сдвинута чрезмерно, то при холостом ходе возникает искрение по указанным выше причинам. Поэтому определение положения траверсы должно вестись следующим образом. Приблизительно устанавливают траверсу в нейтраль и проверяют искрение при холостом ходе, доводя ток возбуждения от небольшой величины до его максимального значения. Затем постепенно сдвигают траверсу по вращению, проверяя в каждом новом положении траверсы искрение при холостом ходе. Когда достигается положение траверсы, при котором возникает интенсивное искрение при максимальном токе возбуждения, траверсу сдвигают против вращения на $1/2$ —1 коллекторную пластину и в этом положении закрепляют. Это и будет ее рабочим положением.

Исследования показали, что величину максимального напряжения можно снизить примерно до 110 в. Это, в свою очередь, позволяет значительно уменьшить величину балластного сопротивления и, следовательно, повысить к. п. д. контура. Снижение максимального напряжения улучшает коммутацию генератора и позволяет повысить средний ток, т. е. повысить производительность обработки. Выполненные экспериментальные исследования и расчеты позволили в тех же габаритах при снижении максимального напряжения со 150 до 100 в увеличить средний ток генератора МГИ-2 с 80 до 100 а, а генератора МГИ-3 — с 300 до 360 а, т. е. повысить производительность обработки, пропорциональную величине среднего тока, на 20—25% при снижении удельного расхода электроэнергии на 15—20%.

В связи с этим были внедрены в производство модернизированные генераторы МГИ-2М и МГИ-3М. Кроме указанных генераторов, был изготовлен пробный образец генератора МГИ-4 на средний ток 600 а с максимальным напряжением так же, как МГИ-2М и МГИ-3М, около 100 в, на базе серийной машины постоянного тока П102. В табл. 22 приведена краткая техническая характеристика коммутаторных генераторов импульсов, описанных

выше. Параметры импульсов тока и напряжения даны в табл. 23, а энергетические характеристики импульсов тока при работе на эрозийный промежуток с номинальным возбуждением — в табл. 24.

В связи с переходом электротехнической промышленности на новую серию П машин постоянного тока в промышленность переданы генераторы МГИ-П9, выполненные на базе этой серии с максимальным напряжением 105—108 в, и соответствующие по остальным данным генератору МГИ-3М.

Разработан также образец генератора импульсов на базе коммутаторного генератора МГИ-3М, в котором коммутатор заменен полупроводниковыми выпрямителями. При снижении стоимости полупроводниковых выпрямителей этот вариант имеет некоторые преимущества перед коммутаторным генератором, так как в нем снимается проблема коммутации, а следовательно, повышается эксплуатационная надежность, упрощается обслуживание и несколько увеличивается мощность при тех же габаритных размерах. При существующих же пока ценах выпрямительный мост по стои-

Т а б л и ц а 22

Краткая техническая характеристика коммутаторных генераторов импульсов

Параметры	Типы генераторов				
	МГИ-2	МГИ-2М	МГИ-3	МГИ-3М	МГИ-4
Частота в <i>имп/сек</i> . . .	400	400	400	400	400
Номинальный средний ток в <i>а</i>	80	100	300	360	600
Среднее напряжение холостого хода в <i>в</i>	26	25	31	25	30
Мощность приводного электродвигателя в <i>квт</i>	6	7	29,5	28	40
Максимальное токоограничивающее сопротивление в <i>ом</i> . . .	0,11	0,06	0,045	0,025	0,015
Напряжение возбуждения	220	220	220	220	110
Скважность на холостом ходу	2,6	2,8	3,0	3,2	2,8
Номинальная скорость вращения в <i>об/мин</i>	3000	3000	3000	3000	3000

мости приближается к полной стоимости коммутаторного генератора, что сдерживает их внедрение.

На базе коммутаторного генератора МГИ-П9 был разработан и изготовлен двухпостовой генератор с внешним выпрямлением на 400 *имп/сек*, 2×250 *а* при максимальном напряжении 100 *в*. При тех же габаритных размерах мощность генератора почти удвоена.

В диапазоне средних частот униполярные импульсы можно получить, не прибегая вообще к выпрямлению тока коммутатором

Таблица 23

Параметры импульсов тока и напряжения коммутаторных генераторов при эрозийной нагрузке (возбуждение номинальное)

Тип генератора	Средний ток в а									
	50					150				
	I_m	U_s	t_u	q		I_m	U_s	t_u	q	
МГИ-2М	200	31	1040	2,5	584	32	1200	2,1	1200	2,1
МГИ-3М	256	27	950	2,7	568	30	1100	2,34	1100	2,35
МГИ-4	302	30	1089	2,2	642	30,5	1197	2,08	1590	1,57
Примечание. I_m — амплитудное значение тока в а; U_s — падение напряжения на эрозийном промежутке в в; t_u — длительность импульса тока в мксек; q — скважность импульсов тока.										

Таблица 24

Энергетические характеристики импульсов на эрозийном промежутке для коммутаторных генераторов при номинальном возбуждении

Тип генератора	Средний ток в а									
	50					150				
	W_s	P_{sm}	P_{scp}	W_s	P_{scp}	P_{scp}	P_{sm}	P_{scp}	W_s	P_{scp}
МГИ-2М	3,96	6	3,95	12	13,2	8,5	4,5	12,7	48,8	32,5
МГИ-3М	3,35	5,5	3,2	11,2	18,9	10,2	4,3	13,1	67	23,7
МГИ-4	4,44	7,5	3,79	12,1	19,8	10,1	5,0	13,1	67	23,7
Примечание. W_s — энергия импульса в дж; P_{sm} — максимальная мощность в промежутке в кат; P_{scp} — средняя мощность импульса в промежутке в кат; P_{scp} — средняя мощность в промежутке в кат.										

или внешним выпрямителем. Единственным типом электрической машины, допускающим эту возможность, является генератор, действующий по принципу униполярной индукции.

Бесколлекторные машины постоянного тока осуществимы лишь в случае изменения во времени контура электрической цепи машины, что достигается введением в состав цепи скользящих контактов, позволяющих вводить все новые и новые элементы цепи. На этом принципе основана униполярная машина постоянного тока. Этот же принцип использован для получения униполярных импульсов напряжения.

Униполярный генератор является первым машинным генератором импульсов, предназначенным для питания электроимпульсных станков. Однако он был впоследствии заменен коммутаторными генераторами. Причинами этого послужили низкое напряжение (60—80 в), приходящееся на пару колец, большие габаритные размеры и потери энергии в униполярных генераторах. Вместе с тем возможен снова возврат к таким генераторам в связи с наметившимися новыми методами работы с поджигающим импульсом повышенного напряжения, необходимостью иметь весьма большие токи, а также для использования, где это существенно важно, возможностей генерирования пульсирующих токов, вместо чисто импульсных токов.

ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Чистовая электроимпульсная обработка охватывает диапазон частот примерно от 1000 до $2 \cdot 10^5$ *имп/сек* с тенденцией постепенного повышения верхнего предела при соответствующем снижении мощности генератора. Этот диапазон частот перекрывается известными типами генераторов униполярных импульсов (табл. 25).

Т а б л и ц а 25

Тип генератора	Диапазон частот в <i>имп/сек</i>		Наибольшая выходная мощность генератора в <i>квт</i> (на нижней частоте)
	освоенный	в перспективе до	
Машинный индукторный	8000—16 000	44 000	До 5
Электронно-полупроводниковый	8000—66 000	100 000 (1—2 мгц)	» 3

Предельные частоты тиристорного генератора лимитируются паспортными данными приборов: даже частота 10 *кГц* пока возможна при некотором снижении допустимой мощности прибора.

Однако быстрый прогресс в этой области позволит в ближайшие годы перейти к частотам до 22 кгц, а с учетом схемных решений — возможно и выше. Транзисторный генератор в смысле частоты технически более подготовлен и обеспечен соответствующими приборами. Оба варианта обладают важным преимуществом — возможностью в одном исполнении генератора (или путем соединения нескольких унифицированных блоков) добиться широкого диапазона изменения частот и осуществлять наиболее экономичное регулирование режимов по частоте. Особенно эффективным является сочетание магнитонасыщенных генераторов на самых низких частотах с широкодиапазонными тиристорно-транзисторными генераторами в диапазоне средних и высоких частот. Мощности генераторов на различных частотах определяются исходя из разумного сочетания различных систем генерирования и частотной характеристики процесса. В табл. 25 мощности определены ориентировочно для нижнего предела частоты при однопостовой работе.

Ниже будут рассмотрены только два первых типа генераторов.

Общим у индукторных и электронно-полупроводниковых генераторов является принцип или блочная схема для получения униполярных импульсов: блок генерирования знакопеременных синусоидальных или импульсных э. д. с. (собственно генератор) и блок выпрямления (вне или внутри генератора).

В тех случаях, когда напряжение синусоидальное, для получения импульсного напряжения применяют однополупериодное выпрямление либо двухполупериодное выпрямление с последующим формированием. При несимметричном напряжении можно применять однополупериодное выпрямление (что дает увеличенную скважность униполярных импульсов), либо подавать напряжение без выпрямления на эрозионный промежуток, что при достаточно малом напряжении обратной полуволны позволит получать в узком диапазоне режимов униполярные импульсы тока, так как обратная полуволна напряжения не сможет создать импульсы тока обратной полярности.

В качестве вентилях могут быть применены ионные приборы, кремниевые, германиевые или селеновые выпрямители. Ионные приборы имеют значительное внутреннее падение напряжения, сравнимое с падением напряжения на эрозионном промежутке. Поэтому с энергетической точки зрения их применение в этих случаях нежелательно и почти не встречается. Германиевые и кремниевые выпрямители обладают наиболее подходящими характеристиками для получения импульсного т. в. ч., имеют малое падение напряжения, небольшие габариты и способны выпрямлять токи в достаточно большем диапазоне частот.

Обычные источники тока повышенной частоты (индукторные или синхронные генераторы) выпускаются в однофазном и трехфазном исполнениях. В случае использования однофазного пре-

образователя с вентилем обратная полуволна тока не пропускается и от источника питания нельзя получить полную его номинальную мощность. Еще большее недоиспользование мощности источника будет при трехфазном генераторе и включении в цепь нагрузки только одной или двух фаз. Этого можно избежать, если применять специальные многопостовые схемы включения генератора.

На рис. 46, а показана принципиальная схема двухпостового генератора, применяемая в тех случаях, когда источник питания

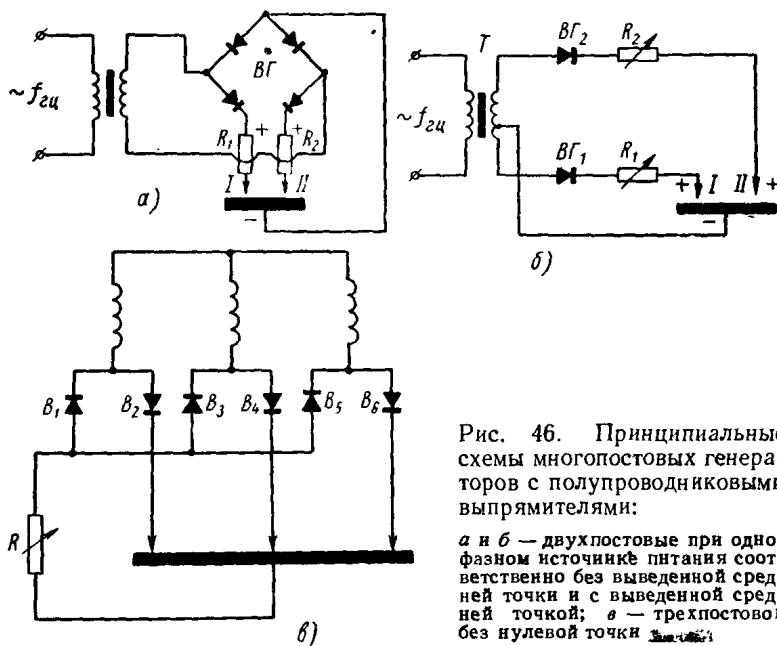


Рис. 46. Принципиальные схемы многопостовых генераторов с полупроводниковыми выпрямителями:

а и б — двухпостовые при однофазном источнике питания соответственно без выведенной средней точки и с выведенной средней точкой; в — трехфазной без нулевой точки

т. в. ч. однофазный и не имеет выведенной средней точки. Вентили образуют мостик, два плеча I и II которого замыкаются через два эрозионных промежутка с деталью. На рис. 46, б изображена схема двухпостового генератора для случая, когда источник т. в. ч. имеет выведенную среднюю точку. Если источник т. в. ч. трехфазный с выведенной нулевой точкой, то можно осуществить подобным же образом трехпостовую схему генератора (рис. 46, в). В этой схеме не требуется вывод нулевой точки источника питания и использование мощности преобразователя частоты выше, чем в схеме на рис. 46, б. Схема может быть преобразована в шестипостовую для обработки трех изолированных друг от друга деталей. Описанные варианты многопостовых схем генераторов с полупроводниками целесообразны для осуществления большого количества однотипных операций, например изготовления щелей, сит и для других видов многопозиционной обработки.

Применение однополупериодного выпрямления к обычному однофазному синусоидальному напряжению позволяет получить импульсное напряжение со скважностью, равной 2, и с формой импульса напряжения, изменяющейся по синусоиде. При необходимости получить скважность импульсов выше 2, а также с целью повышения частоты импульсов в качестве источников питания схем с полупроводниковыми вентилями целесообразно применять машинные генераторы импульсов.

Использование для выпрямления импульсных э. д. с. вместо синусоидальных позволяет применять схемы двухполупериодного выпрямления при работе на один пост, причем скважность импульсов может быть получена требуемой величины, а частота импульсов в однофазных схемах удваивается. Выпрямление многофазных знакопеременных импульсных напряжений позволяет увеличить частоту получаемых унipoлярных импульсов в m раз (m — число фаз) по сравнению с выпрямлением знакопеременных однофазных импульсных напряжений. Если f — частота знакопеременного импульсного напряжения, то при однополупериодном выпрямлении однофазного напряжения частота унipoлярных импульсов равна $f_u = f$, при двухполупериодном выпрямлении того же напряжения $f_u = 2f$, при однополупериодном выпрямлении m -фазного импульсного напряжения $f_u = mf$ и, наконец, при двухполупериодном выпрямлении того же m -фазного напряжения $f_u = 2mf$.

Таким образом, выпрямление знакопеременных импульсных напряжений является одним из весьма удобных способов получения унipoлярных импульсных напряжений. Двухполупериодное выпрямление может быть использовано только при применении генераторов симметричных знакопеременных импульсных э. д. с. Генераторы несимметричных знакопеременных э. д. с. не могут быть использованы в схемах двухполупериодного выпрямления, так как получающиеся в этом случае унipoлярные выпрямленные э. д. с. будут состоять из полуволн различных амплитуд, не разделенных паузами.

Высокочастотные машинные индукторные генераторы импульсов. Индукторные генераторы позволяют получать синусоидальные и импульсные знакопеременные напряжения повышенной и высокой частоты. В последнем случае изменение потока в катушках обмотки статора должно соответствовать форме импульса э. д. с.

Если рассматривать только э. д. с., наводимую полезным потоком, и считать, что все витки катушек полностью сцепляются с потоками зубцов, то

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}, \quad (\text{IV. 15})$$

где ω — полное число витков обмотки; Φ — полезный поток зубцов статора.

Отсюда получаем, что кривая изменения полезного потока зубцов во времени представляет интегральную кривую по отношению к кривой э. д. с.:

$$\Phi_x = -\frac{1}{\omega} \int_0^x e dt. \quad (\text{IV. } 16)$$

Для получения э. д. с. в виде прямоугольных симметричных импульсов, разделенных паузами, необходимо, чтобы полезный поток

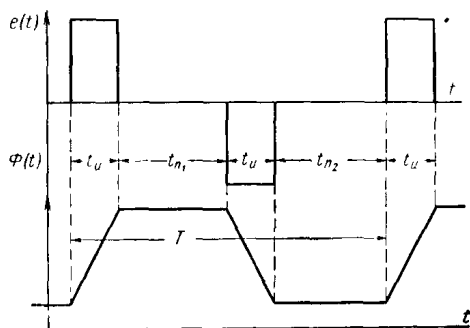


Рис. 47. Принцип получения симметричных знакопеременных импульсов э. д. с. в индукторных генераторах (необходимый характер изменения потока зубцов)

зубцов статора изменялся по закону трапеции (рис. 47). Требуемый характер изменения потока может быть достигнут соответствующим выбором конфигурации и размеров зубцовой зоны.

Одним из наиболее подходящих источников импульсных знакопеременных э. д. с. повышенной частоты является индукторный генератор с узкими зубцами. Генератор на 8000 имп/сек, 100 а вращается асинхронным двигателем со скоростью 8000 об/мин через ременную передачу. Для ком-

пенсации индуктивности обмотки статора генератора в цепь нагрузки включается конденсатор емкостью порядка 60—70 мкФ. Генератор имеет водяное охлаждение и выполнен в одно пакетном

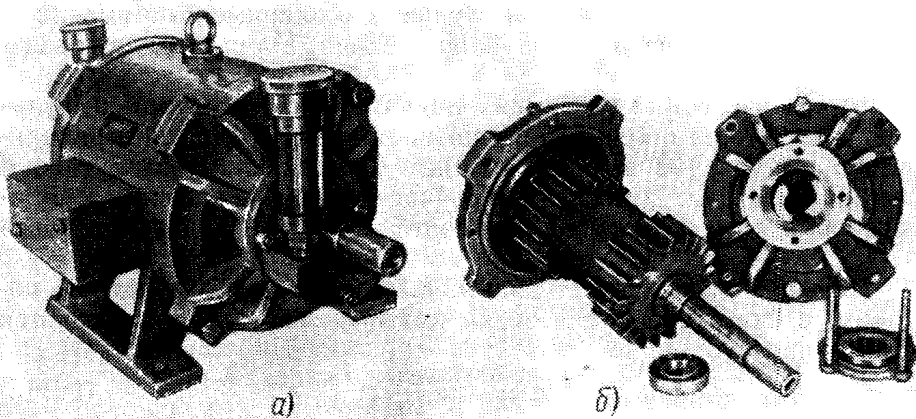


Рис. 48. Внешний вид (а) и детали (б) индукторного генератора импульсов

одноименно-полюсном исполнении с «классической» зубцовой зоной. На рис. 48, *а* показан внешний вид, а на рис. 48, *б* — детали этого генератора.

Для уменьшения скорости вращения генератора, требующей ременной передачи, разработан образец индукторного генератора импульсов на 8000 *имп/сек*, 100 *а* для скорости вращения около 8000 *об/мин*, что позволяет непосредственно соединять генератор с приводным асинхронным двигателем, питаемым от промышленной сети переменного тока. Габаритные размеры генератора при этом увеличились не намного, а к. п. д. вследствие снижения механических потерь повысился. Генератор выполнен с зубцовой зоной, имеющей втрое уменьшенное число зубцов статора по сравнению с «классической» зоной. Увеличение числа зубцов ротора, вызванное снижением скорости вращения, несколько ухудшило форму импульса э. д. с., что потребовало применения на выходе формирующего устройства из емкостей и дросселей насыщения.

Для получения более высоких частот используется другая конструкция индукторного генератора, идея которой заключается в том, что пакеты статора поворачиваются относительно друг друга на $1/2$ зубцового деления статора. Вследствие этого получается двухфазная система э. д. с., и, при последовательном включении обмоток обоих пакетов, импульсы э. д. с. одного пакета попадают в промежутки между импульсами э. д. с. второго пакета и частота импульсов удваивается. Для получения результирующей импульсной э. д. с. с достаточной скважностью необходимо значительно увеличить скважность импульсов э. д. с., индуктируемых каждым пакетом в отдельности.

Индукторные генераторы импульсов с узкими зубцами ротора имеют существенные преимущества перед другими типами индукторных генераторов, так как рабочий поток машины, пропорциональный ширине зубцов, значительно уменьшается, что облегчает конструкцию машины и снижает ее вес и стоимость. В этих генераторах применяется двухполупериодное выпрямление, что позволяет повысить верхний предел частоты импульсов по сравнению с частотой других генераторов. Формирующие устройства для генераторов с узкими зубцами также меньше по размерам, чем при применении их в других системах генераторов.

Высокочастотные индукторные генераторы на частоты 8000 *имп/сек* являются источниками питания тяжелых электроимпульсных станков моделей 4725, 4726 и некоторых специальных. Они работают в паре с магнитонасыщенными генераторами, обеспечивая получение чистовой обработки больших поверхностей.

Электронно-полупроводниковые генераторы импульсов. Работа генераторов типа ВГ-3В основана на генерировании переменного напряжения с последующим выпрямлением вентильным устройством для получения униполярных импульсов.

Принципиальная схема генератора показана на рис. 49.

Генератор состоит из возбудителя колебаний, усилителя напряжения, предоконечного и оконечного усилителей и блока выпрямителя. Блоки, кроме последнего, представляют собой собственно электронный генератор высокой частоты.

Возбудитель колебаний представляет собой генератор самовозбуждения, собранный по схеме *RC* на двух лампах — пентоде 6Ж4 (15Л) и двойном триоде 6Н8С (14Л).

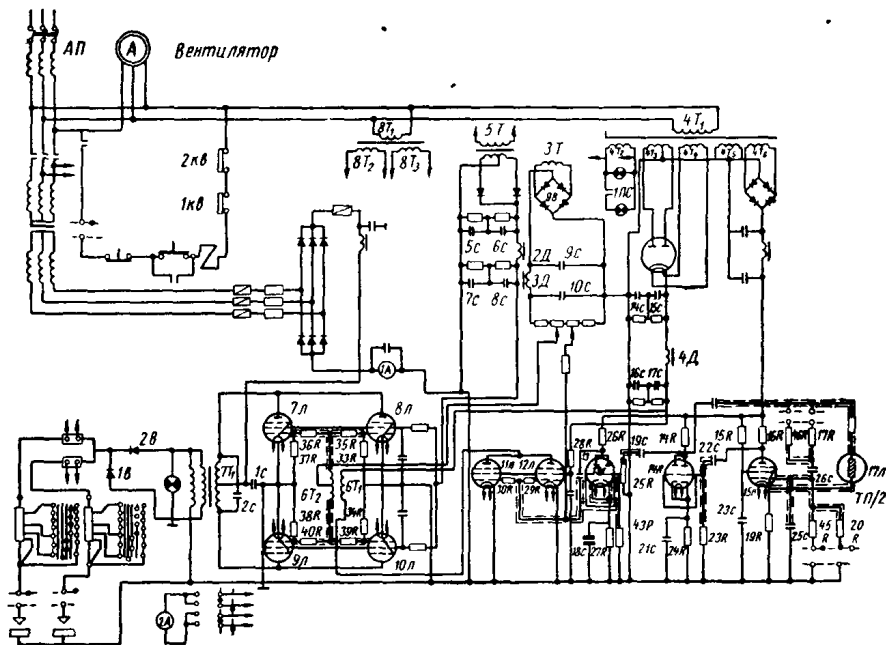


Рис. 49. Принципиальная схема электронно-полупроводникового генератора типа ВГ-3В

Частота колебаний устанавливается при помощи конденсаторов 25С и 26С и сопротивлений 17R, 20R, 45R и 46R. В цепь катода лампы 6Ж4 с целью стабилизации амплитуды импульсов включен нелинейный элемент — термистер типа ТП6/2 (17Л). Анодной нагрузкой возбудителя служат сопротивления 14R и 16R; напряжение смещения на сетках ламп возбуждения осуществляется автоматически за счет анодного тока, проходящего через сопротивления 19R и 24R. Питание экранной сетки 6Ж4 (15Л) подается через сопротивление 15R, конденсатор 23С служит развязкой экранной сетки, конденсатор 21С является блокировочным элементом, конденсатор 22С проходной, связывающий анод лампы 6Ж4 (15Л) с сеткой лампы 6Н8С (14Л), сопротивление 23R — утечка для лампы 14Л. Напряжение от возбудителя через проходной конденсатор 19С и при помощи потенциометра 25R, регулирующего уровень сигнала от нуля до максимума, подается

непосредственно на сетку лампы $13Л$ — усилителя напряжения, собранного на двойном триоде $6Н8С$. Этот каскад усиливает первоначальные колебания до номинального значения.

Анодной нагрузкой усилителя напряжения служит сопротивление $26R$. Напряжение смещения подается за счет падения напряжения на катодном сопротивлении $27R$, конденсатор $18C$ является блокировочным элементом, сопротивление $43R$ — утечка для лампы $13Л$. Усиленные колебания при помощи проходного конденсатора $13C$ подаются на предоконечный усилитель мощности, собранный на двух пентодах ($11Л$, $12Л$) типа ГУ-50 и работающий с сеточными токами в режиме AB . Сетки лампы развязаны между собой сопротивлениями $29R$, $30R$. Напряжение смещения осуществляется от отдельного источника питания. Роль предоконечного усилителя мощности состоит в том, чтобы усилить уровень и мощность сигнала, необходимого для раскачки оконечного (выходного) усилителя мощности. Связь с оконечным усилителем мощности осуществляется при помощи междуплампового трансформатора $6T$.

С двух вторичных обмоток трансформатора $6T$ напряжение в противоположных фазах подается на оконечный усилитель мощности. Оконечный усилитель мощности собран на четырех пентодах типа ГУ-80 ($7Л$ - $10Л$) по двухтактной схеме — по две лампы в плече. Оконечный каскад работает в режиме AB с сеточными токами. Сетки ламп развязаны между собой сопротивлениями $35R$, $36R$, $39R$, $40R$ во избежание самовозбуждения мощного каскада.

В качестве утечки ламп использованы сопротивления $33R$, $34R$, $37R$, $38R$. Передача выходного напряжения генератора на нагрузку (эрозионный промежуток) осуществляется через выходной трансформатор $7T$.

Выходной трансформатор собран из пластин высокочастотной стали толщиной $0,1$ мм с высокой магнитной проницаемостью. В трансформаторе применяется ступенчатое сечение шихтованного сердечника. Сердечник трансформатора выполнен с зазором.

Блок выпрямителя собран по однополупериодной схеме на двух высокочастотных (типа ВКЧ-50) кремниевых диодах $1В$, $2В$ и преобразует переменное напряжение в унipoлярные импульсы. При холостом ходе вся нагрузка падает на анодах ламп, которые из-за этого могут выйти из строя. Для их защиты параллельно вторичной обмотке выходного трансформатора включается нелинейное сопротивление — электрические лампы накаливания $Л$.

Защита от короткого замыкания осуществляется токоограничивающими сопротивлениями $27R$ и $28R$, включенными последовательно с эрозионным промежутком. Для питания экранных сеток мощных ламп ГУ-80 собран выпрямитель по однополупериодной схеме на диодах типа Д205 с П-образным индуктивно-емкостным фильтром ($2Д$, $5С$, $6С$, $7С$ и $8С$).

Переменное напряжение на выпрямитель подается от трансформатора (8Т). Питание анодных ламп предоконечного каскада (ГУ-50) осуществляется от выпрямителя, собранного на лампе 5Ц8С. Выпрямительная лампа питается от трансформатора 4Т. Для уменьшения пульсации тока используется П-образный фильтр, состоящий из дросселя 4Д и конденсаторов 14С, 15С, 16С, 17С.

Анодное напряжение на лампы возбуждителя (6Ж4) и (6Н8С) 15Л и 14Л и на лампу усилителя подается от того же выпрямителя.

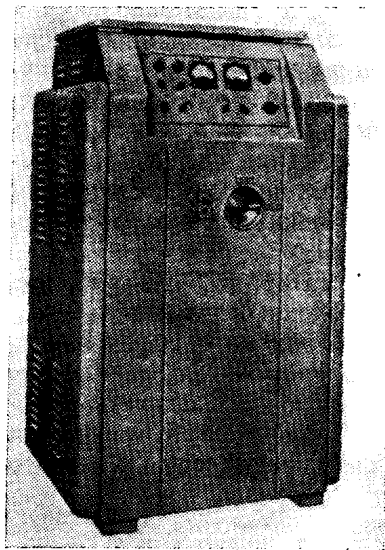


Рис. 50. Внешний вид генератора ВГ-3В

Напряжение смещения на сетки ламп ГУ-80 и ГУ-50 подается от выпрямителя, собранного по мостовой схеме с использованием в качестве вентилей кремниевых диодов Д-205 с П-образным индуктивно-емкостным фильтром (3Д, 9С, 10С).

Переменное напряжение на мостовую схему подается от трансформатора 3Т. Напряжение смещения на сетках ламп Л14, Л13 и Л12 образуется за счет падения напряжения на сопротивлениях (соответственно 19R, 24R и 27R), включенных в катодные цепи этих ламп.

Включение генератора в сеть осуществляется автоматическим выключателем АП. При нажатии кнопки автоматического выключателя загорается зеленая лампочка (1ЛС), сигнализирующая о включении накала всех ламп.

При нажатии кнопки «Стоп» генератор отключается от сети.

При нажатии кнопки «Пуск» срабатывает магнитный пускатель, загорается красная лампочка, что свидетельствует о том, что на аноды выходных ламп подано высокое напряжение. Генератор готов к работе. Нажатием кнопки «Стоп» снимается высокое напряжение.

Электроблокировка осуществляется при помощи конечных выключателей 1КВ, 2КВ, которые размыкают цепь питания высоковольтного блока в том случае, когда дверцы генератора открыты.

Генератор смонтирован в двухсекционном металлическом каркасе с двумя боковыми дверцами (рис. 50). На передней стенке каркаса расположены коммутационная аппаратура и панель управления. На нижней панели размещены выпрямители.

В левой секции расположены три панели. На верхней панели левой секции смонтированы мощные выходные лампы ГУ-80 (7Л-10Л), на средней панели расположен выходной трансформа-

тор (7Т) с двумя конденсаторами (1С-2С), на третьей панели смонтирован выпрямитель на диодах Д-205 и трансформатор 5Т к нему для питания экранирующих сеток ламп ГУ-80. Здесь также установлен накальный трансформатор 8Т для ламп ГУ-80. Изменение тока в пределах одной частоты осуществляется переключением четырех степеней токоограничивающих сопротивлений.

Так как токопровод от генератора к станку является дополнительным сопротивлением и может оказывать существенное влияние на величину тока, то токоограничивающие сопротивления устанавливаются при подключении генератора к станку в соответствии с фактически получаемыми токами.

Изменение величины токоограничивающих сопротивлений осуществляется путем изменения их активной длины с помощью передвижных контактов. После установки величин токоограничивающих сопротивлений положение контактов надежно фиксируется винтами.

Величина токоограничивающих сопротивлений устанавливается при частоте 8 кГц таким образом, чтобы при стабильной работе на эрозионную нагрузку были следующие ступени тока: 5, 10, 15 и 25—30 а.

Генератор ВГ-3В является основным источником импульсов высокой частоты для универсальных электроимпульсных станков моделей 4Б722, 4723 и ряда специальных. Генераторы используются на чистовых операциях после обработки на машинных коммутаторных генераторах типа МГИ.

Электроимпульсный станок, как объект автоматизации, может иметь следующие тесно взаимосвязанные между собой системы регулирования:

а) систему автоматического регулирования зазора (АРЗ) или скорости подачи электрода при ручном, неавтоматическом задании эталонной скорости оператором, ориентирующимся по показаниям приборов и внешним признакам течения процесса;

б) систему автоматического определения и поддержания оптимальной скорости подачи, т. е. экстремального регулирования (ЭР), исключающего участие оператора в п. а);

в) систему автоматического регулирования электрических режимов обработки в соответствии с диаграммой «ток—площадь—производительность» в функции изменяющейся площади. Эта система может быть создана в двух вариантах: регулирование режимов по жесткой программе (ПРР), предварительно рассчитанной технологом и исключающей участие оператора во время процесса, и регулирование режимов с автоматическим заданием программы (АПРР), исключающим участие на предварительном этапе технолога и во время процесса обработки — оператора;

г) систему автоматического регулирования частоты и тока для получения заданной чистоты поверхности в минимальное время. Эта система также может быть создана в двух видах: регулирование по жесткой программе и с автоматическим заданием последовательности смены режимов по частоте, току и параметрам орбитального движения.

Из этих систем первые две находятся на стадии промышленного применения, вторая — частично на стадии промышленного применения (системы с ПРР) и экспериментального опробования (системы АПРР) и, наконец, последняя система — на стадии исследования, в связи с чем мы на ней здесь не останавливаемся.

Из возможных и перспективных объектов автоматизации и оптимизации в электроимпульсном станке следует еще отметить: авторегулирование амплитуды и частоты вибрации и орбиталь-

ного движения; давления, температуры, вязкости и степени очистки рабочей жидкости, частоты релаксаций шпинделя и др.

Все указанные системы представляют по существу единую систему многосвязанного автоматического управления электроимпульсным станком, превращающую его, в конечном итоге, в автомат.

Не рассматривая здесь элементы и электрические схемы электроимпульсных станков, имеющиеся также и в обычных металлорежущих станках (схемы автоматизации установочных перемещений, управления вспомогательными механизмами, путевого контроля, блокировки, защиты, измерения и т. п.), остановимся ниже на схемах управления, специфических только для этого типа станков.

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЙ СТАНОК КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Физический процесс съема металла и эвакуации продуктов эрозии происходит в эрозионном промежутке — зазоре, образованном взаимодействующими поверхностями электродов. Одна из этих поверхностей, чаще всего принадлежащая электроду-инструменту, перемещается механизмом, связанным с исполнительным двигателем автоматического регулятора, таким образом, чтобы поддерживать в изменяющихся условиях обработки наивыгоднейшую величину зазора. Эта величина, являясь сложной функцией многих переменных, должна во время установившегося режима одновременно удовлетворять, по крайней мере, двум обязательным требованиям, без которых вообще теряется работоспособность станка, и одному требованию, рассматриваемому как желательное и определяющему степень эффективности процесса. Эти требования следующие:

а) Величина зазора S должна быть такой, чтобы обеспечить беспрепятственную эвакуацию продуктов эрозии, т. е. сохранить неравенство (II. 31) $M_0 \leq M_v$. С этой точки зрения выгодно увеличивать как можно больше S , чтобы усилить неравенство (II. 31) и этим создать запас устойчивости против случайных нарушений процесса.

б) Величина зазора не должна превосходить определенную величину, при которой может возникнуть, а если возник, то устойчиво поддерживаться импульсный дуговой разряд, т. е. единичная функция $\bar{\varphi}(S)$ [см. выражение (II. 11)] должна сохранять всегда в заданном интервале значения, большие нуля. Второе требование, таким образом, определяет крайние границы изменения зазора:

$$S_k \leq S \leq S_0 \quad (V. 1)$$

и этим ограничивает верхний предел усиления неравенства (II. 13) за счет увеличения зазора. Второе требование определяет устойчивость процесса в «малом», т. е. в пределах одного импульса.

в) Величину зазора желательно поддерживать такой, чтобы скорость съема имела максимально возможное для данных условий обработки значение. Это требование сокращает диапазон изменения зазора до оптимального значения

$$S_k < S = S_{opt} < S_0. \quad (V. 2)$$

Процесс обработки с кинематической и геометрической точки зрения заключается в поступательном перемещении в пространстве

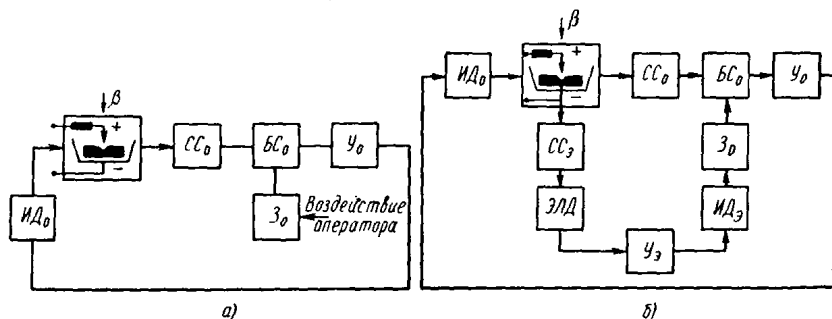


Рис. 51. Блок-схемы автоматических регуляторов зазора:

а — основной, неэкстремальный регулятор; б — основной регулятор с блоком оптимизации

(по оси движения параллельно самому себе) поверхностей, образующих зазор. Поскольку перемещается обычно один из электродов-инструментов, то задача поддержания постоянства или требуемого значения регулируемой величины зазора сводится к изменению или регулированию косвенной величины скорости перемещения этого электрода, или величины подачи v_n .

Таким образом, даже в установившемся состоянии исполнительный орган должен иметь отличную от нуля скорость; это сближает автоматические регуляторы эрозионных станков с классом регуляторов дуговых печей и т. п. систем.

На рис. 51 показаны в общем виде блок-схемы автоматического регулятора электроимпульсного станка — основного и с оптимизирующим устройством. Сигнал СС₀, характеризующий состояние системы, сравнивается в блоке сравнения БС₀ с эталонной величиной, соответствующей требуемой величине зазора, и через усилитель У₀ подается на исполнительный двигатель ИД₀, управляющий перемещением электрода. Главная обратная связь осуществляется через эрозионный промежуток. Если скорость ИД₀ и соответствующий ей зазор окажутся отличными от заданных, то возникнет сигнал рассогласования (разность между снимаемым

и эталонным сигналами), направление которого и величина таковы, чтобы привести фактический зазор к задаваемой эталонной величине. Система оптимизации представляет собой вторую систему регулирования, у которой на вход поступают сигналы, характеризующие степень отклонения фактического зазора от оптимального (блок $СС_2$), а на выходе установлен второй исполнительный двигатель $ИД_2$, перемещающий устройство (например, движок автопотенциометра), устанавливающее величину эталонного сигнала в блоке задатчика Z_0 . Отличия блок-схемы на рис. 5б, а и б в том, что в первом случае эталонный сигнал находит, устанавливает и поддерживает оператор, а во втором — автоматическая система оптимизации.

Автоматическое регулирование имеет смысл тогда, когда значение регулируемой величины непрерывно или периодически изменяется и нельзя расчетом или по показаниям приборов определять, какие она примет значения. В противном случае можно было бы заранее задавать постоянную скорость исполнительному двигателю и ограничиваться простейшей разомкнутой системой регулирования подачи. Оптимизация также имеет смысл только в том случае, если, во-первых, функция имеет экстремум при изменении регулируемой величины в допускаемых пределах и, во-вторых, если положение экстремума в плоскости «показатель экстремума — регулирующее воздействие» смещается в направлении переменной координаты «регулирующее воздействие» (если эта координата неизменна, то достаточно один раз найти ее значение и дальше следить уже не за ее нахождением, установлением и поддержанием, а только за стабилизацией).

Характеристика регулируемого объекта определяет его поведение как объекта автоматического регулирования и устанавливает на основании физического анализа качественные и количественные характеристики, необходимые для выбора систем и схем автоматических регуляторов. В качестве такого объекта рассмотрим электроимпульсный станок в присущем для него диапазоне изменения режимов, площадей и при питании от независимых генераторов. Некоторые из выводов можно будет распространять на станки других типов, также питающихся от независимых генераторов.

Электроимпульсный станок как объект регулирования подвергается внешним возмущающим воздействиям — закономерным и случайным, непрерывно нарушающим неизменность установившегося хода процесса.

Рассмотрим эти воздействия, обозначив их соответствующими индексами:

β_F — закономерное изменение в процессе обработки площади, требующее для сохранения заданного зазора соответствующего изменения скорости перемещения V_{ni} , поскольку

$$V_{ni} = \frac{M_k + M_a}{F_i}, \quad (V. 3)$$

где F_i — проекция площади обработки в i -том сечении детали, а M_k и M_a — соответственно скорость съема с катода (детали) и износ анода (инструмента). β_F может быть приближенно определено по сечениям обрабатываемой детали при проектировании технологического процесса и, следовательно, запрограммировано. Однако при переходе к более сложным условиям обработки величину эталонного сигнала практически нельзя предусмотреть; только экспериментально, в строго повторяющихся условиях, на одних и тех же деталях можно составить программу изменения эталонного сигнала;

β_p — закономерные возмущения, вызванные переключениями электрических режимов и приводящие к изменениям числителя (главным образом M_k) в формуле (V. 3). Поскольку M_k и F_i связаны единой зависимостью, их отношение изменяется не очень сильно: скорость будет меняться при одновременном и соответствующем изменении и площади режима значительно меньше, чем при действии F_i и M_k порознь;

β_h — возмущающее воздействие, вызванное углублением инструмента в деталь. При этом закономерно изменяются условия эвакуации, скорость съема, а следовательно, и уставка регулятора. β_h может быть запрограммировано так же только экспериментально, для одних и тех же условий и деталей;

β_0 — возмущающее воздействие, вызванное изменением условий эвакуации, зависящих от площади обработки и коэффициента формы или горизонтального радиуса эвакуации;

$\beta_{ж} = \beta_{ж0} + \beta_{жз}$ — возмущение, вызванное изменением состава и качества рабочей жидкости как в общей ванне ($\beta_{ж0}$), так и непосредственно в зоне обработки ($\beta_{жз}$). Если $\beta_{ж0}$ изменяется медленно, в течение всего периода эксплуатации залитого объема жидкости, то $\beta_{жз}$ зависит от уровня расположения зоны обработки и может сильно измениться в течение одной операции;

β_n — возмущения, вызванные действием системы прокачки, зависящие от давления, вязкости жидкости, размеров и расположения отверстий для прокачки, глубины обработки и др.;

β_k — возмущения, вызванные короткими замыканиями электродов, приводящими к местным нарушениям геометрических и физических свойств поверхностей электродов;

$\beta_u, \beta_t, \beta_{эж}, \beta_{тр}$ — соответственно возмущения, вызванные случайными колебаниями питающего напряжения, температуры окружающей среды, температуры жидкости; изменением со временем и при нагреве или охлаждении параметров электрической и механической частей станка. Особенно влияют изменения трения в системах передачи движения от исполнительного двигателя к шпинделю;

β_v — возмущения, вызванные введением вибраций электрода и изменением амплитуды вибрации, связанные нелинейной зависимостью со скоростью подачи (при чрезмерной скорости по-

дачи амплитуда вибрации уменьшается, что приводит к короткому замыканию, последующему реверсу и увеличению вибрации);

β_0 — возмущения, вызванные орбитальным движением электрода в плоскости, перпендикулярной к направлению подачи.

Помимо указанных, можно выделить, по-видимому, еще ряд внешних воздействий, связанных, например, с неоднородностью материала электрода-инструмента и заготовки, со случайными попаданиями ниток и других загрязнений, становящихся очагами шлакований, и многие другие. Поскольку функциональные связи между этими воздействиями и реакцией на них процесса (независимо от того, случайны эти воздействия или закономерны) весьма сложны и существенно нелинейны, расчетное определение реакций и контрвоздействий, локализующих эти реакции, не представляется пока возможным. Это обстоятельство делает необходимым введение замкнутой системы авторегулирования.

Основной характеристикой регулируемого объекта является зависимость «з а з о р — с к о р о с т ь с ъ е м а», хотя имеется еще ряд зависимостей, так или иначе связанных или вытекающих из основной. Эти зависимости будут также рассмотрены ниже. Съем материала с той или иной скоростью, или основной рабочий процесс, является постоянно действующей причиной изменения зазора. Все виды возмущений также воздействуют закономерно или случайно, непосредственно или косвенно, на скорость съема или на величину зазора. Например, β_p , β_F , частично $\beta_{ж}$ и другие непосредственно изменяют скорость съема, а β_h , β_ϕ , β_n , β_σ , β_ω воздействуют на зазор и уже через него изменяют скорость съема. Таким образом, в характеристике регулируемого объекта обе переменные могут быть то аргументом, то функцией.

Непосредственное измерение зазора и скорости съема представляет большие трудности, усугубляемые неопределенностью нахождения точек электродов, между которыми нужно измерять зазор. Действительно, разряд между двумя точками, расстояние между которыми равно или меньше S_0 , вызовет внутри промежутка ударную волну, перемещающую частицы и газы; следующий разряд произойдет там, где будет наименьшее напряжение пробоя, которое будет зависеть не только от расстояния между очередной парой точек, но и от ситуации, созданной «эвакуационными» течениями или вихрями. В таких условиях само понятие «зазор» теряет ясный геометрический смысл, и он может рассматриваться как некоторая физическая величина, характеризующая состояние и свойства пространства, в котором разыгрываются подчиняющиеся статистическим законам процессы съема и эвакуации продуктов эрозии. Подобно тому, как основная физико-технологическая зависимость «ток—площадь—скорость съема» имеет смысл только при массовом воздействии разрядов на поверхность и лишена физического содержания при единичном разряде (если, конечно, поверхность заготовки больше площади, занимаемой лун-

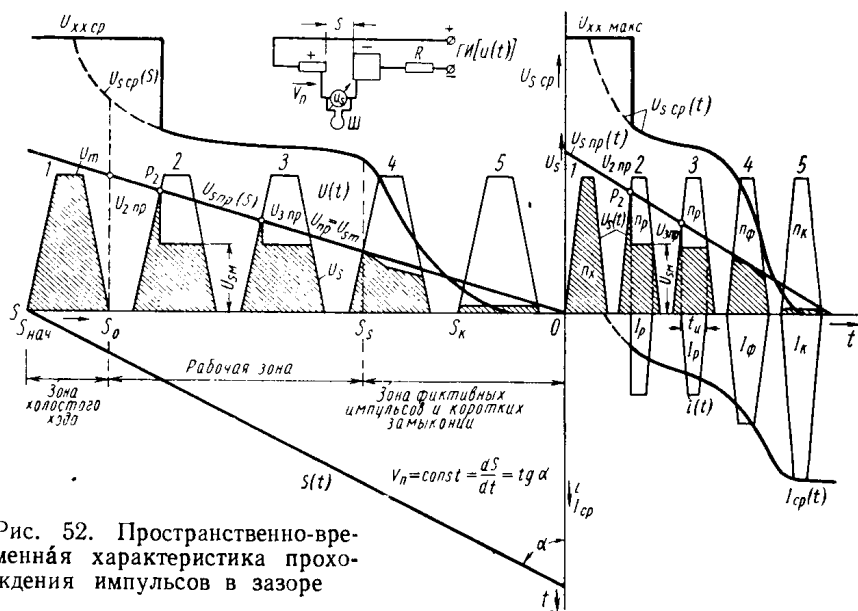
кой), так и характеристика регулируемого объекта приобретает физический смысл в тех же условиях, что и упомянутая зависимость. Регулируемые смещения электрода, восстанавливающие заданный зазор, должны следовать не за единичным разрядом, а определяться и отрабатываться после снятия некоторого слоя материала в результате воздействия на него серий разрядов (вплоть до сотен и тысяч разрядов в зависимости от режима, площади, частоты и других условий), выступающих уже не индивидуально, а как «статистический коллектив» со своими особыми характеристиками, позволяющими по «прошлому» определять «будущее», что, собственно, и должно являться основой автоматического регулирования процесса. Следовательно, регулирование по «каждому импульсу» физически неопределенно, наоборот, только анализ ситуации, созданной многими импульсами в «прошлом», позволит определить необходимое поведение регулятора в будущем.

Рассмотрим, каким же образом можно получить информацию о состоянии зазора для подачи ее на вход регулятора. Зависимость (II. 13) определяет практически линейную связь между зазором S и напряжением пробоя U_{snp} . Эта характеристика, снятая при постоянном напряжении, статическая: каждому расстоянию соответствует определенное напряжение, при котором формируется канал сквозной проводимости. Последующий разряд производится в таких же точно условиях невозмущенной и незагрязненной (либо, наоборот, имеющей ту же степень возмущения и загрязнения) жидкости при одинаковом микрорельефе поверхностей электродов: каждому новому зазору соответствуют одинаковые внешние и внутренние условия. Допустим, что предварительно разведенные электроды, к которым приложено импульсное напряжение $U(t)$, начинают сближаться с некоторой равномерной скоростью $V_n = \text{const}$ (рис. 52). Для простоты приняты импульсы трапецеидальной формы.

В осях U_S-S нанесена статическая характеристика $U_{snp}(S)$. В момент времени $t = 0$ электроды разведены на расстояние $S_{нач} > S_0$, соответствующее максимальному напряжению импульса U_m ; разряд не может возникнуть, так как не хватает напряжения источника $\Gamma И$ для пробоя столь большого зазора. Шлейф осциллографа $Ш$, подключенный к промежутку, фиксирует проходные импульсы № 1 холостого хода, ток через электроды при этом равен нулю (зона холостого хода $S_{нач} - S_0$). При напряжении U_{2np} на фронте импульса № 2 произойдет пробой (точка P_2), напряжение скачком упадет до напряжения горения дуги U_{sm} и далее, несмотря на продолжающееся сближение электродов, сохранит постоянную величину.

Ток I_{p2} , начавшись одновременно с пробоем, будет изменяться в соответствии с формой импульса напряжения и величиной токоограничивающего сопротивления; если нет в цепи реактивных элементов, ток оборвется в момент погасания дуги. Импульс № 3

начнется уже при меньшем напряжении $U_{3np} < U_{2np}$, соответственно его длительность будет больше у импульса № 2, а амплитуда примерно такая же, поскольку U_{sm} снизилось незначительно. При напряжении пробоя, близком к U_{sm} , кончается рабочая зона, простирающаяся от S_0 до зазора примерно S_s , соответствующего U_{sm} . У импульса № 4 напряжение пробоя равно или немного меньше U_{sm} : создаются условия для возникновения так называемых фиктивных импульсов, характеризующихся меньшим, чем на



дуге, падением напряжения, большим током, наличием в зоне прохождения замыкающих зазор металлических или графитовых частиц и отсутствием полезного съема металла. Фиктивные импульсы предшествуют обычно короткому замыканию. Дальнейшее сближение электродов приведет при зазоре S_k к короткому замыканию и резкому возрастанию тока. Вольтметр, или измерительное устройство на входе в регулятор, зафиксирует среднее за время движения от $S_{нач}$ до $S = 0$ напряжение на электродах, складывающееся из напряжения на фронте импульса до пробоя — оно характеризует напряжение пробоя и соответствующий ему зазор по статической характеристике $U_{np}(S)$, далее идет участок U_{sm} , не зависящий от зазора; при фиктивном импульсе напряжение несколько ниже U_{sm} и также не является прямой функцией зазора. Наконец, напряжение становится близким к нулю и соответствующим некоторому зазору, при котором не возникает разряд, а вероятно наступает короткое замыкание через наиболее крупную частицу. В области холостого хода среднее напряжение резко возрастает и при $S > S_0$ уже не зависит от зазора.

Таким образом, среднее напряжение можно представить как сумму трех слагаемых, из которых лишь одно дает информацию о величине зазора $U_{сп}$, а два других — о крайних состояниях зазора — коротком замыкании и холостом ходе. В течение времени $0 - t_{хх}$, соответствующего прохождению пути от $S_{нач}$ до S_0 , среднее напряжение на электродах будет равно среднему значению э. д. с. холостого хода генератора на установленной ступени режима. Поскольку амплитуда импульса э. д. с. соответствует S_0 , движение в сторону разведения электродов, т. е. увеличения S_0 , не будет определять среднее значение напряжения на электродах, и на вход регулятора не поступит информация о величинах зазора, больших S_0 . В самом начале рабочей зоны с точностью до одного импульса резко, скачком падает мгновенное значение напряжения и соответственно среднее значение. При этом в период горения дуги напряжение (как и в зоне $S_{нач} - S_0$) функционально не связано с зазором: по мере уменьшения зазора сокращается постепенно напряжение зажигания, но среднее значение (соответствующее заштрихованной части импульсов), измеряемое и подаваемое на вход регулятора, изменяется мало, так как практически не зависит от зазора. Поэтому кривая в рабочей зоне идет очень полого и мало похожа на линейную статическую характеристику. Ход кривой $I_{cp}(t)$ примерно таков, как и $U_{сп}(t)$, поскольку он определяется уравнением

$$I_{cp} = \frac{U_{cp} - U_{сп}}{R}, \quad (V. 4)$$

в которое входит $U_{сп}$. Трем участкам на кривой $U_{сп}(S)$: холостого хода, рабочего и зоны короткого замыкания с предшествующей ей зоной фиктивных импульсов соответствует резко отличающаяся крутизна кривой; для двух крайних участков большая крутизна и для рабочего среднего — малая. Следовательно, вводимая в регулятор информация — среднее напряжение на электродах — должна далее перерабатываться с разными коэффициентами усиления, что специфично для рассматриваемого процесса.

Зависимости, построенные на рис. 56, не связаны со второй переменной, определяющей наряду с зазором (и косвенно его измеряющим средним напряжением) характеристику регулируемого объекта со скоростью съема. Не учтена также статистика процесса¹. Измерить непосредственно скорость эрозии, т. е. явления, служащего первопричиной изменения зазора, трудно. Поэтому и здесь приходится прибегать к косвенным измерителям. На рис. 56 видно, что через зазор проходит четыре вида импульсов: импульсы

¹ На рис. 52 для простоты показано всего пять импульсов разных сортов. В действительности при частоте генератора 400 имп/сек, зазоре 0,2 мм и скорости холостого хода порядка 0,2 мм/сек через зазор успеет пройти всего 400 импульсов. При больших частотах, хотя зазор и уменьшается, количество импульсов еще больше возрастает (при частоте 22 кгц примерно 4000—5000 импульсов).

холостого хода n_x , не потребляющие энергии и не производящие съема металла; импульсы рабочие n_p , производящие полезный съем металла, вредное разрушение электрода-инструмента и пиролиз рабочей жидкости; импульсы фиктивные n_f , потребляющие энергию, разрушающие часто электрод-инструмент (шлакование), нагревающие и разлагающие рабочую жидкость, но не производящие полезной работы, и, наконец, импульсы короткого замыкания n_k , также потребляющие энергию, нагревающие и разлагающие в зоне замыкания рабочую жидкость (что является иногда причиной шлакования), но не производящие полезной работы по съему металла. Очевидно,

$$n = n_x + n_p + n_f + n_k, \quad (V. 5)$$

где n — количество импульсов, выработанных генератором. Если отнести n_x , n_p , n_f , n_k к единице времени-секунде, то n будет частотой генератора.

Полагая, что каждый рабочий импульс, возникший в одинаковых условиях, снимает одинаковое количество металла с электродов и производит одно и то же количество продуктов пиролиза.

Таким образом, можно полагать, в первом приближении, что скорость съема пропорциональна количеству рабочих импульсов. Это справедливо для определения общего съема, пропорционального интегральному количеству прошедших за это же время импульсов, и в отношении мгновенной скорости, пропорциональной частоте рабочих импульсов:

$$M \approx K n_p. \quad (V. 6)$$

Следовательно, характеристика регулируемого объекта может быть представлена функцией $n_p = f(S)$. Вид этой характеристики зависит, как показывает опыт, не только от абсолютных значений зазора, но и от скорости его изменения, что является следствием нелинейности и статистики процесса.

Отметим два крайних случая, соответствующих понятиям о динамической и статической характеристиках процесса. Назовем динамической характеристику $n_p = f(S)_d$, снятую при соблюдении условия

$$\frac{dS}{dt} \gg \frac{M_k + M_a}{F}, \quad (V. 7)$$

т. е. при скорости изменения зазора, несоизмеримо большей линейной скорости V_n эрозии (при заданном режиме) в направлении изменения зазора. Физически это означает исключение влияния условий эвакуации, поскольку емкость системы значительно больше, чем объем поступающих за время изменения зазора продуктов эрозии. Фактически перестает действовать зависимость «ток—площадь—производительность», так как она справедлива только при массовом воздействии на поверхность разрядов в те-

переходящих в импульсы короткого замыкания. Этот переход наступает при изменении зазора всего на несколько микрон, после чего количество рабочих импульсов падает до нуля, а количество импульсов короткого замыкания — возрастает до 100%. В этом положении электрический зазор равен нулю, а геометрический зазор, понимая под этим расстояние в свету между поверхностями электродов, становится равным диаметру $d_{\max}$ наибольшей частицы, оставшейся в зазоре. Действительно, при обработке на определенном электрическом режиме образуются частицы металла, имеющие разные размеры, соответствующие кривой распределения. Такая картина имеет место даже при единичном разряде. Диаметры частиц отличаются в десятки раз, причем встречаются размеры, большие номинального значения рабочего зазора, т. е. S_p . Эти частицы как большие, так и малые должны быть удалены из зазора. Следовательно, зазор в свету или геометрический зазор S_g должен быть больше номинального рабочего S_p , так как в противном случае, т. е. при $S_g \leq S_p$, крупные частицы заклинивались бы в зазоре (а этого не может быть, так как при $S = S_p$ $n_k = 0$), либо повторно диспергировались. Последнее означало бы отсутствие (среди эвакуированных частиц) с размером, большим S_p , что противоречит данным опыта. Следовательно, можно полагать, что

$$\text{и} \quad \left. \begin{aligned} S_g &\geq S_p + d_{\max} \\ S_k &= d_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (\text{V. 9})$$

Характеристики на рис. 52 тоже по существу относятся к семейству динамических, но они построены в других координатах и для удобства анализа — для чрезмерно малого числа импульсов и соответственно большей, по крайней мере, на два порядка, скорости сближения.

Статическая характеристика процесса определяет поведение системы в установившемся состоянии, когда закончились при данном положении электродов переходные процессы организации эвакуационных течений и определилось динамическое равновесие между образующимися и эвакуируемыми продуктами эрозии. Методика снятия этой характеристики следующая. При каждом положении электрода специальным анализатором импульсов с интегратором (в течение 30—60 сек в зависимости от режима и площади обработки) подсчитывается число рабочих импульсов. Величина зазора определяется в относительных единицах, соответствующих положениям потенциометра задатчика регулятора, поддерживающего заданный зазор.

На рис. 54 показано семейство статических характеристик для разных режимов и площадей обработки. Ход левой части характеристики от холостого хода до максимума внешне подобен динамической характеристике на участке S_0 — S_p , хотя количественные

показатели отличаются. Это можно объяснить тем, что на этом участке вероятность возникновения импульсов n_n и n_ϕ близка к нулю, условия эвакуации благоприятны или, точнее, возможная скорость эвакуации M_e равна или больше M_o , продолжительность переходного процесса согласно формуле (II. 35) будет бесконечно большая, что равносильно совпадению переходного и установившегося режимов.

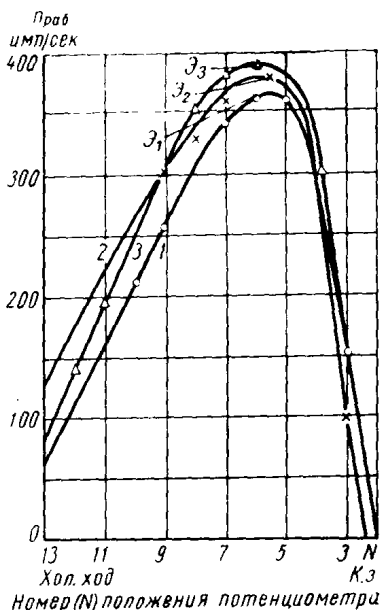


Рис. 54. Статическая (экстремальная) характеристика зазора:

1 — $F_2 = 6000 \text{ мм}^2$; 2 — $F_2 = 1500 \text{ мм}^2$; 3 — $F_2 = 700 \text{ мм}^2$

что зазор больше S_k или даже S_p) возникновение повторного разряда, но уже не на поверхности электродов, а на частицах. У границы прелятствия возникает ударная волна, выбрасывающая частицы из застойной зоны. Этот механизм особенно проявляется при эвакуации с границ «колодца» и переходе их на вертикальную трассу — вектор скорости частицы здесь должен изменять направление максимум на 90° , что невозможно при любых вариантах соударений под любыми углами частиц между собой или со стенками щели. Следовательно, для такого поворота частицы на границе «колодца» и перевода ее на вертикальную трассу, т. е. в боковой зазор, должны обязательно образовываться эвакуационные вихри и течения, вызванные повторными разрядами. На интенсивность, направление, характер этих течений и вихрей и частоту ударных волн оказывает влияние множество факторов, важнейшие из которых — амплитуда импульса напряжения, скважность,

Отличия же в ходе второй ветви кривой, включая максимум, объясняются исключительно влиянием процесса эвакуации, развивающегося в узком и протяженном междуэлектродном зазоре. Рассмотрим протекающие здесь физические процессы в связи с характеристикой регулируемого объекта. Как указывалось в гл. II, прямолинейный полет частицы в зазоре, за редкими, не имеющими практического значения, случаями, невозможен.

Следовательно, неизбежны соударения частиц друг с другом, со стенками щели, торможение и полная остановка их в зоне прелятствия. Здесь возможны два случая: после воздействия ряда ударных волн частица будет выброшена из этой зоны, либо в совокупности с другими застрявшими частицами образует у прелятствия местное заполнение емкости и инициирует (несмотря на то,

энергия, частота и форма порождающих импульсов, микрорельеф, форма и размеры обрабатываемой поверхности, вид и характеристики рабочей жидкости, воспринимающей и передающей ударную волну. В частности, вероятность интерференции двух или нескольких прямых и отраженных волн зависит также и от скважности импульсов: чем меньше скважность, тем больше при прочих равных условиях вероятность интерференции.

Итак, частица, прежде чем покинуть зону обработки, проделывает сложный путь, напоминающий внешне броуновское движение, но отличающийся некоторым детерминизмом, обусловленным наличием «постоянной составляющей», направленной к какому-либо участку «выхода», где меньше сопротивление движению ударной волны. Очевидно, в зазоре имеются частицы, порожденные «своим» импульсом и больше не подвергавшиеся разрядам, их движение к «выходу» осуществлялось энергией ударных волн от других частиц; имеются частицы, на которые воздействовали не только «свой» импульс, но и повторные разряды, диспергировавшие эту частицу и отдавшие избыток своей энергии на транспортирование других частиц. Высокая частота импульсов, статистический вероятностный характер движения громадного количества частиц разного размера позволяют рассматривать в каждом данном случае непрерывно циркулирующие в зазоре вихри и течения, как некоторую характерную для каждой технологической операции или одной из фаз этой операции картину, определяющую скорость эвакуации M_0 , степень повторного диспергирования и, в конечном счете, устойчивость и производительность процесса.

Рассмотрение механизма эвакуации продуктов эрозии из зазора показало, что существует два крайних вида рабочих импульсов: первичные n_{p1} , поражающие непосредственно металл заготовки, и вторичные n_{p2} , поражающие частицы, «рожденные» первичными импульсами n_{p1} .

Очевидно, имеются промежуточные между n_{p1} и n_{p2} виды разрядов на частицы. Здесь возможны различные ситуации: однократное или многократное поражение уже диспергированных импульсами серии n_{p1} частиц, вылет частиц из зоны, не подвергшихся ни разу воздействию импульсов серии n_{p2} . Это зависит от рельефа «местности»: частицы, образованные вблизи «зон накопления», т. е. там, где резко изменяется кривизна участка, или у границ, где гасятся ударные волны, будут в большей степени подвергаться воздействию повторных разрядов. Поскольку от каждого импульса рождается много частиц, вероятность повторного диспергирования будет также тем выше, чем больше частиц в зазоре и чем крупнее эти частицы. Последнее соображение позволяет сделать вывод о закономерной «эвакуации мелких частиц более крупными». Для данного электрического режима уменьшение зазора также увеличивает вероятность повторных разрядов.

Величина съема на один импульс серии n_{p1} и n_{p2} , очевидно, должна быть разная, хотя энергии импульсов в пределах естественного разброса, судя по осциллограммам, мало отличаются. Это объясняется различием теплофизических и геометрических характеристик поражаемой цели: в одном случае это участок в глубине, окруженный массой металла, в другом — частица или группа металлических и графитовых частиц, лежащая на металле и окруженная жидкостью. Избыток энергии (поскольку на повторное диспергирование расходуется меньше энергии), выделяющейся на частицах второй группы, идет на образование ударных волн.

На многократную переброску частицы до полной эвакуации ее из зоны обработки необходимо некоторое время, средняя величина t_{cp} которого является характеристикой конкретных условий процесса. Это время пропорционально, в первом приближении, времени заполнения емкости:

$$t_{cp} = KT = \frac{KL}{M_o - M_s}, \quad (V. 10)$$

где $K < 1$ — коэффициент пропорциональности. Если бы t_{cp} было больше T , т. е. $K > 1$, то емкость L системы была бы всегда заполнена и процесс обработки прекратился. Можно также полагать t_{cp} находящимся в функциональной связи со средним интервалом времени t_{crk} между двумя короткими замыканиями, поскольку t_{crk} характеризует продолжительность устойчивой работы при балансе M_o и M_s : увеличение t_{cp} при прочих равных условиях вызывает уменьшение t_{crk} . Снижение зазора приводит к резкому (более чем обратно пропорциональному) снижению T и уменьшению в той же мере допустимого значения t_{cpd} , в течение которого частица, во избежание нарушения процесса, должна быть выброшена за пределы зоны. Фактическое же значение t_{crf} больше допустимого, поэтому создается ситуация, благоприятная для роста вероятности появления n_k за счет снижения n_p (несмотря на то, что зазор не достиг S_k). Скорость съема упадет сильнее, чем пропорционально снижению n_p , так как с уменьшением зазора и ростом остатка неэвакуированных частиц возрастет вероятность повторных разрядов n_{p2} и система будет стремиться к саморегулированию, т. е. к увеличению скорости эвакуации за счет дополнительных разрядов. Это в некоторой степени уменьшит фактическое значение t_{crf} (и увеличит t_{crk}), количество оставшихся неэвакуированных частиц и т. д. до некоторого нового установившегося состояния с увеличенным процентом n_k . Так будет продолжаться и при дальнейшем уменьшении зазора, но со все возрастающей скоростью увеличения вероятности появления n_k и соответствующего уменьшения n_p и составляющей n_{p1} за счет роста n_{p2} . В конце концов система приходит к длительному короткому замыканию, т. е. к замыканию, превы-

шающему время срабатывания автоматического регулятора; произойдет реверсирование, зазор возрастет до значений S_0 , а в случае обычно имеющих место перерегулирований — даже до значений, больших S_0 . Поршневое действие быстро расходящихся электродов приведет к замене рабочей жидкости и вымыванию некоторого количества осевших частиц. Если снова восстановится работа при зазорах, не обеспечивающих полную эвакуацию продуктов эрозии, то в зависимости от степени отклонения от оптимального зазора произойдет пропорционально этому отклонению ускорение наступления момента реверсирования электрода.

Здесь важно рассмотреть особенности поведения системы при коротком замыкании. Как правило, короткое замыкание происходит через частицу, съем металла отсутствует, следовательно, нет эвакуационных вихрей и течений. Частица, или группа частиц, находится под током и интенсивно нагревается теплом Джоуля-Ленца, поскольку эффективный ток короткого замыкания обычно в 2—3 раза больше среднего. Нагретая частица вызывает местный пиролиз рабочей жидкости и образование очага шлакования. Наступающее реверсирование может растянуть шлаковый мостик до величины, большей S_p . Идет как бы «цепная реакция» шлакования: растянутый и нагревающийся мостик вызывает ускоренный пиролиз и рост размеров моста. Положение ухудшается еще тем, что регулятор «чувствует» уже не короткое замыкание, а «работу», поскольку мост имеет сопротивление и характеристику, близкие к фиктивному импульсу. Если вовремя не прерван процесс, то произойдет порча детали и электрода.

Мы рассмотрели худший, аварийный механизм шлакования. Чаще всего реверсирование происходит достаточно быстро и предотвращает возникновение очага шлакования. Однако частые короткие замыкания свидетельствуют либо о работе с недопустимо малым зазором (т. е. о неправильной настройке регулятора), либо о неправильном построении технологического процесса (недостаточная прокачка, несоответствующий режим и т. п.) и его неустойчивости «в общем». Но независимо от того, перейдет ли короткое замыкание в шлакование или нет, разрыв короткого замыкания вследствие местного пиролиза или скопления «приклеившихся» нагретых частиц произойдет не при том зазоре, при котором оно возникло, а при несколько большем. Поэтому статическая характеристика, полученная при сближении электродов, будет несколько сдвинута по отношению к характеристике, снятой при разведении электродов.

Статическая характеристика свидетельствует о наличии экстремума в зависимости от величины зазора, изменяемого в течение времени, соизмеримого со временем заполнения емкости системы. Чем меньше емкость системы или больше скорость M_0 и меньше скорость M_s , тем больше вероятность нарушения процесса и появления в рабочем интервале короткозамкнутых импуль-

сов, следующих обычно группами по два-пять импульсов с небольшой частотой повторения. Обычно имеет место цикл $\sum n_p \rightarrow \sum n_k \rightarrow \sum n_p$, аналогичный циклу при работе с большими зазорами $\sum n_p \rightarrow \sum n_x \rightarrow \sum n_p$. При длительных нарушениях процесса имеет место цикл $\sum n_p \rightarrow \sum n_x \rightarrow \sum n_p \rightarrow \sum n_x \rightarrow \sum n_p$. В этих условиях оптимуму соответствует минимум холостых, короткозамкнутых и фиктивных импульсов, причем количество рабочих импульсов уже не равно частоте генератора, а составляет максимально возможное для данных условий число. Как видно из статической характеристики, при изменении площади

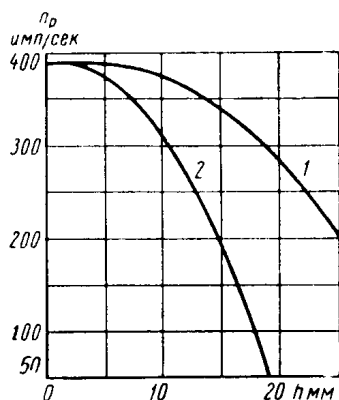


Рис. 55. Изменение частоты рабочих импульсов при глубоком прошивании:

1 — $F=350 \text{ мм}^2$; 2 — $F=100 \text{ мм}^2$

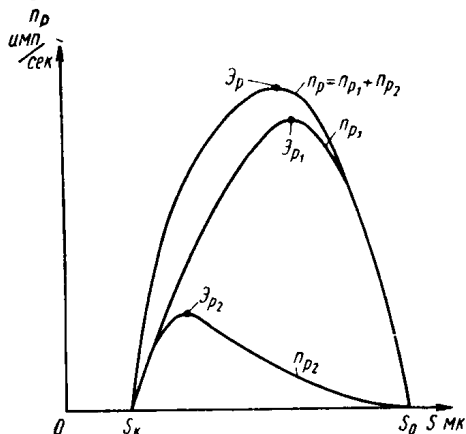


Рис. 56. Зависимость первичных, вторичных и общего количества рабочих импульсов от зазора

обработки изменяется и абсолютная величина, и положение оптимума. Изменяется также оптимум с глубиной (рис. 55) и под влиянием внешних воздействий типа β .

При выборе критерия оптимизации и построении статической характеристики фигурировали рабочие импульсы без разделения на первичные, являющиеся, собственно, рабочими и эвакуирующими, и вторичные, обеспечивающие только эвакуацию продуктов эрозии. Из простых соображений следует, что на границах интервала S_k-S_0 обе функции $n_{p1} = f(S)$ и $n_{p2} = f(S)$ должны быть равны нулю. Далее, максимум n_{p2} должен возрастать при уменьшении зазора, а максимум функции n_{p1} — при приближении к S_0 . С учетом такого хода кривых и удельного веса повторных разрядов на рис. 56 дан примерный график трех функций и расположения их максимумов. С известным приближением можно считать совпадающими максимумы n_p и n_{p1} , имея при этом также в виду, что реальный максимум n_p не очень критичен (см. рис. 54).

Представляет интерес определение абсолютных значений или

соотношения первичных и вторичных рабочих импульсов. Приближенные значения n_{p1} и n_{p2} можно найти, пользуясь обычным анализатором рабочих импульсов при одновременном измерении времени прошивания цилиндрическим электродом отрезков пути¹. В результате этих измерений строятся соответствующие кривые $n_p = f(h)$ и $M = f(h)$. Далее, расчетом по простым формулам определяют искомые n_{p1} и n_{p2} для каждого значения h :

$$(n_{p1})_i = \frac{M_i}{M_0} n_{p0}, \quad (V. 11)$$

где n_{p0} , M_0 — частота рабочих импульсов и производительность на поверхности, а $(n_{p1})_i$ — искомая частота первичных рабочих импульсов и производительность на i -том участке глубины h . Частота вторичных рабочих импульсов на том же участке

$$(n_{p2})_i = (n_p)_i - (n_{p1})_i. \quad (V. 12)$$

Приближенность методики заключается в допущении, что на поверхности все рабочие импульсы первичные. Если отбросить эти допущения, то формула (V. 11) даст относительное изменение соотношения первичных и вторичных импульсов по глубине прошивания.

На рис. 57 (на основе данных рис. 55 для $F = 350 \text{ мм}^2$) построены по описанной методике искомые зависимости первичных, вторичных и общего числа рабочих импульсов от глубины прошивания. Если на поверхности примерно из 390 возможных (учитывая скольжение приводного двигателя) импульсов 380 рабочих (мы полагаем, что они все первичные), то уже на глубине 10 мм первичных 325 и вторичных 38 (10,5%). Далее количество повторных импульсов, увеличиваясь обратно пропорционально падению производительности, достигает при глубине 30 мм 170 *имп/сек*; процесс, проходивший в условиях естественной устойчивости, резко снизил свою эффективность.

Вторая методика определения основана на том, что участки электрода-инструмента, где возникают повторные разряды, должны иметь повышенный износ, поскольку для электрода с точки зрения

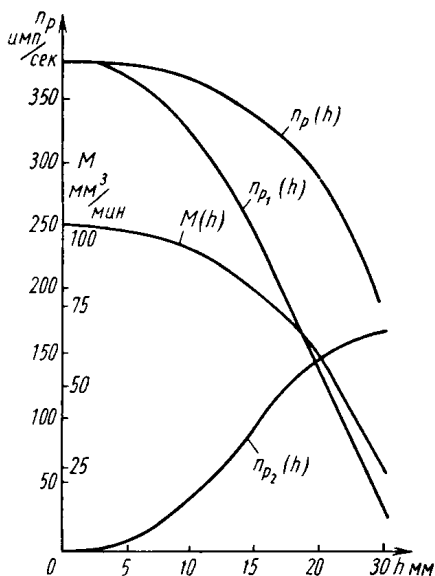


Рис. 57. Зависимость частоты первичных, вторичных импульсов и их суммы от глубины прошивания

¹ Эту методику можно распространить на любые формы электродов и условия работы.

износа нет разницы между первичными и вторичными разрядами. Участки с повышенным износом располагаются преимущественно в зонах препятствий, резкого изменения кривизны, а при обработке плоскостей достаточно больших размеров — в зонах затухания ударных волн, на промежуточных «транзитных» станциях, где частицы пополняют израсходованную кинетическую энергию. Отношение избыточного износа к общему износу будет характеризовать долю вторичных импульсов по отношению к общему числу рабочих импульсов.

Процесс обработки обладает свойством саморегулирования благодаря наличию внутренней обратной связи между производством и эвакуацией частиц двумя совершенно различными по своей природе физическими процессами, хотя процесс эвакуации и порожден процессом эрозии и они имеют общий источник энергии — электрический разряд. Поскольку первый процесс не может быть непрерывным без второго и выходные характеристики метода определяются совокупностью обоих физических процессов, они должны одновременно удовлетворять иногда совпадающим, иногда различным требованиям. Следовательно, при более глубоком анализе, вероятно, все экстремальные ситуации, а также в целом и частотная характеристика процесса эрозионной обработки могут быть объяснены взаимодействием физических процессов производства и эвакуации продуктов эрозии.

Рассмотренная статическая характеристика является примером возникновения экстремальной ситуации именно в результате наложения этих двух процессов. Главной чертой частотной характеристики является снижение производительности и рост энергоемкости процесса с ростом частоты. Если рост энергоемкости определяется в основном процессом эрозии, то снижение производительности уже зависит главным образом от процесса эвакуации: снижение энергии импульса с ростом частоты уменьшает эвакуационную способность импульсов, т. е. энергию ударных волн и в то же время вследствие резкого снижения зазора увеличивает сопротивление на пути эвакуации, что приводит к росту числа повторных разрядов и увеличению энергоемкости за счет второго процесса. Если не уменьшать площадь обработки с ростом частоты, то сопротивление эвакуации станет настолько большим, что процесс сможет идти только в области искусственной устойчивости, а при некоторой критической для данной частоты и скважности площади обработки вовсе прекратится.

Такие же соображения могут быть высказаны в отношении области предельно низких и предельно высоких для данной частоты режимов по току, амплитуды импульса напряжения, глубины и других параметров.

В реальных условиях площадь обработки является независимой переменной, определяемой заданной деталью. Поскольку после черновой обработки необходимо осуществить на той же пло-

щади чистовую обработку, то лимитирующей будет именно чистовая операция на высокой частоте. Поэтому более правильно говорить о предельной, экономически еще выгодной частоте для каждой величины площади. При этом, конечно, следует учитывать совокупность всех предельных характеристик и условий обработки (предельно возможные амплитуды импульса напряжения, оптимальные условия регулирования, прокачки, вибрации, релаксации, продувки или нагнетания жидкости, газов и др.).

Еще одним примером экстремальной ситуации, вызванной взаимодействием двух различных процессов, является зависимость производительности от импульсов холостого хода. Обычно считалось очевидным, что пропуск импульса или серии импульсов пропорционально уменьшает съем. В свете изложенного это утверждение нуждается в поправке. Всякое увеличение зазора улучшает эвакуацию и снижает необходимое для саморегулируемого процесса число «эвакуационных» импульсов. Следовательно, налицо экстремальная ситуация, т. е. существует оптимальное для данных условий процесса количество импульсов холостого хода, при котором будет минимум импульсов, затрачиваемых на повторное диспергирование, и, следовательно, максимум для этих же условий производительности: потери времени на холостой ход компенсируются выигрышем в числе первичных рабочих импульсов за счет вторичных. Такие же экстремальные ситуации складываются для любых мероприятий по улучшению эвакуации, связанных с прерыванием процесса. Например, периодическое разведение электродов (релаксация) для освежения рабочей жидкости и вымывания продуктов эрозии должно производиться в течение такого времени, чтобы эффект от увеличения n_{p1} перекрыл потери производительности от вынужденного холостого хода. Этими же соображениями нужно руководствоваться при использовании вибрации, орбитального движения, принудительного нагнетания или отсоса жидкости, или сжатого воздуха в зазоре, а также при выборе уставки в регуляторах без оптимизации. В последнем случае практически часто работают с «отставанием», т. е. настраивают при существенной неустойчивости регулятор таким образом, чтобы подача отставала от линейной скорости эрозии и зазор был несколько больше, чем S_p . При этом возникают периодические колебания зазора: зазор постепенно достигает значений, при которых наступает полный холостой ход, регулятор резко увеличивает скорость сближения электродов, зазор снова уменьшается, и так далее с периодичностью, определяемой формулой (V. 10), соответствующей данным условиям значения M_e .

Условия эвакуации являются главными для определения требований к системам автоматического регулирования: быстродействия и чувствительности. Можно утверждать, что если бы частицы беспрепятственно эвакуировались независимо от механизма основного процесса съема, то, во-первых,

проблема быстрогодействия потеряла бы значение, так как изменения в величинах подачи соответствовали бы весьма медленным изменениям площади обработки по мере углубления, во-вторых, снялась бы вообще проблема оптимизации, поскольку статическая характеристика совпала бы с динамической и экстремум сохранялся на всем протяжении зазора S_p и, наконец, производительность процесса существенно выросла бы вследствие исключения повторного диспергирования.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРАМ ЗАЗОРА

Требования к системам АРЗ сводятся к определению необходимых диапазона регулирования, быстрогодействия и чувствительности. При удовлетворении этих требований регулятор не должен вносить неустойчивость в сам по себе устойчивый процесс и должен расширять возможности работы в области искусственной устойчивости при процессе ограниченно устойчивом.

Диапазон регулирования определяется отношением крайних значений линейной скорости подачи для возможных сочетаний скоростей съема и площадей обработки. В табл. 26 указаны линейные скорости подачи для самого жесткого режима Ж на номинальной площади, мягкого режима М на минимальной площади и доводочного режима Д на максимальной площади при минимальном режиме. Все режимы, а также диапазон регулирования относятся к конкретным станкам гаммы, причем для станков 4725 и 4726 данные относятся к одной головке.

Т а б л и ц а 26

Модель станка	Линейная скорость подачи в мм/мин			Диапазон регулирования
	Ж	М	Д	
4Б722	0,15	0,10	$1 \cdot 10^{-3}$	150
4723	0,10	0,10	$0,3 \cdot 10^{-3}$	300
4А724	0,10	0,40	$0,6 \cdot 10^{-3}$	150
4725	0,10	0,30	$1,2 \cdot 10^{-3}$	80
4726	0,10	0,30	$0,6 \cdot 10^{-3}$	160

Быстродействие регулятора определяет продолжительность переходных процессов, возникающих при любых отклонениях от номинального режима работы, характеризует его способность поддерживать искусственную устойчивость, предотвращать возникновение очагов шлакования и в конечном счете реализовывать возможную производительность процесса.

Рассмотрим характерные переходные режимы, в которых участвует регулятор.

а) Холостой ход — установившийся режим. На электродах имеется импульсное напряжение, ток равен нулю. Сближение электродов происходит при некоторой скорости холостого хода $V_{нх}$. Подобный переходный процесс имеет место в начале процесса обработки и при сближении электродов после того, как они были разведены вследствие короткого замыкания. Переходный процесс заключается в изменении подачи от холостого хода $V_{нх}$ до номинальной $V_{нн}$. Это изменение скорости должно произойти на участках $S_{нач}—S_0—S_n—S_p$ (см. рис. 53). Продолжительность установления номинальной скорости в идеальном случае

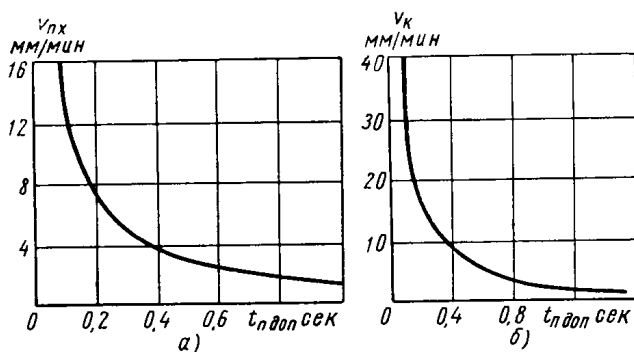


Рис. 58. Зависимость скоростей холостого хода (а) и реверсирования (б) от допустимого времени регулирования

должна быть такой, чтобы за это время электрод прошел путь не более $S_{нач}$ минус S_p , что является гарантией против перерегулирования, ведущего к короткому замыканию.

Наибольший перепад скоростей будет на мягких режимах, и для этих режимов следует выбирать скорости $V_{нх}$. Расчет и исследование показывают, что скорость $V_{нх}$ зависит от продолжительности переходного процесса t_n , определяемой быстродействием регулятора: чем выше быстродействие регулятора и меньше его постоянная времени, тем большей может быть принята скорость холостого хода. На рис. 58, а показана зависимость $V_{нх}$ от допустимого времени регулирования, построенная для станков средней мощности, рассчитанных на скорость съема металла 1200—2500 мм³/мин. В переходном режиме «холостой ход — установившаяся работа» требования к быстродействию регулятора могут быть удовлетворены при выборе соответствующей скорости холостого хода. Так как $V_{нх}$ выбирается по наиболее трудному минимальному режиму обработки, то при работе на жестком режиме переходный процесс будет заканчиваться в начале зоны номинального зазора.

б) Переходный процесс «короткое замыкание — установившийся режим». Во время нормальной работы вследствие попадания в зазор крупных частиц,

ухудшения условий их эвакуации, резкого изменения величины обрабатываемой площади и ее формы и вызванного этим превышения допустимой плотности тока и шлакования, при неправильно установленной величине подачи и многих других причинах, вызванных внешними возмущениями типа β , номинальный зазор может внезапно стать равным нулю. Переходный процесс в этом случае заключается в изменении величины подачи от $V_n = +V_{n\kappa}$ (подачи вниз) до нуля и от нуля до $V_n = -V_{\kappa}$ — максимальной скорости реверсирования (ход вверх), затем от $V_n = -V_{\kappa}$ до нуля и от нуля до $V_n = +V_{n\kappa}$ — номинальной величины подачи вниз при новом установившемся режиме. Перепад скоростей от $+V_{n\kappa}$ до нуля должен произойти (во избежание передачи усилий на систему «шпиндель—редуктор—двигатель») на участке S_p (или части его). В благоприятном случае изменение скорости от нуля до $V_n = -V_{\kappa}$ и затем до $V_n = +V_{n\kappa}$ должно произойти на участках S_{κ} и S_p , не выходя за пределы номинального зазора, что обеспечивает вхождение электрода в работу без дополнительного холостого хода.

Поскольку перепады скоростей должны произойти на заданных отрезках пути, имеется связь между величинами перепадов и быстродействием регулятора: чем выше быстродействие, тем большие перепады скоростей могут быть осуществлены на тех же отрезках пути.

На рис. 58, б показана зависимость максимальной скорости реверсирования V_{κ} от допустимого времени переходного процесса, обуславливающего удовлетворение двух условий: а) отсутствие металлического касания электродов и усилий на шпинделе и б) вхождение в номинальный режим без дополнительного холостого хода. Кривая на рис. 58, б построена для расчетного случая работы на мягком режиме станка с максимальной скоростью съема металла 1200—2400 мм³/мин.

Сравнение величин максимальных скоростей холостого хода и реверсирования показывает, что последняя должна быть примерно в 2 раза выше $V_{n\kappa}$.

Скорости $V_{n\kappa}$ и V_{κ} являются важными параметрами системы авторегулирования, и их выбирают в зависимости от быстродействия выбранного типа регулятора.

Важным звеном в системе авторегулирования является редуктор. Величина подачи связана с передаточным отношением редуктора следующим соотношением:

$$V_n = \frac{n_d}{i} h \text{ мм/мин}, \quad (\text{V. } 13)$$

где n_d — число оборотов исполнительного двигателя в минуту; h — шаг винта в мм; i — передаточное отношение редуктора.

Расчетной скоростью для выбора передаточного отношения должна быть максимальная скорость реверса V_{κ} . Выбор соотношения между i и h при заданной выходной скорости должен произ-

водиться на основании анализа кинематической схемы редуктора и сравнения потерь по различным вариантам. Приемлемым является вариант с минимальными потерями, особенно при ползучих скоростях подачи, близких к нулю. При заданном шаге винта передаточное отношение будет зависеть от быстродействия регулятора: чем оно выше, тем меньшее передаточное отношение может быть допущено. Обычно передаточное отношение принимается для малых станков от 20 до 100, для средних и мощных станков до 200.

Чувствительность регулятора определяет возможную степень отклонения зазора от номинала. В установившемся режиме движущие силы в регуляторе уравниваются силами сопротивления. Если установившийся режим характеризуется тем, что скорость исполнительного органа равна нулю, т. е. он находится в покое, то необходимо увеличить движущие силы на величину, соответствующую усилиям, требующимся для преодоления трения покоя, большего, чем трение движения.

Таким образом, перемещение движущихся частей будет происходить не сразу после появления возмущения, а только в том случае, когда это возмущение достигнет определенной величины. Зона нечувствительности определяется диапазоном изменения регулируемой величины, в пределах которого электрод-инструмент остается неподвижным.

В формировании зоны нечувствительности, помимо сил трения, участвует люфт в механической системе передачи движения от исполнительного двигателя через редуктор и винт-гайку. Особенно сильное влияние оказывает люфт на последних звеньях, близких к электроду-инструменту. При некачественном выполнении механической системы или непринятии должных конструктивных мер величина люфта становится сравнимой с зазором. При поступлении сигнала на изменение направления движения сначала осуществляется выборка люфта, затем только после истечения некоторого времени начнется регулирование зазора. Первым требованием к механической системе должно быть по возможности исключение или уменьшение люфта при сохранении достаточно малых потерь на трение.

Коэффициент нечувствительности b равен отношению разности между истинным значением регулируемой величины x' в момент начала воздействия на исполнительные устройства в одну сторону и ее значением x'' в момент начала воздействия в другую сторону к их среднему значению:

$$b = 2 \frac{x' - x''}{x' + x''} 100\%. \quad (V. 14)$$

Величины x' и x'' определяют границы зоны нечувствительности. На рис. 59 представлена характеристика регулятора при наличии зоны нечувствительности, включая и люфт. На оси ординат отложена скорость перемещения электрода, на оси абсцисс — те-

кущие значения регулируемой величины x_* в относительных единицах (например, среднее импульсное напряжение, приведенное к номинальному значению).

Важной особенностью регулирования в эрозионных станках является то, что в установившемся режиме электрод находится не в покое, а перемещается со скоростью $V_{пн}$, соответствующей скорости эрозии в данных условиях. Следовательно, влияние трения покоя на величину зоны нечувствительности будет отличаться от влияния систем регулирования, у которых установившийся режим имеет место при неподвижном

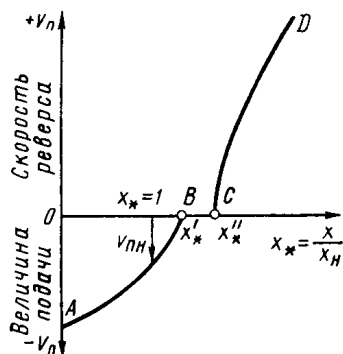


Рис. 59. Характеристика регулятора с зоной нечувствительности

исполнительном органе. Чем больше $V_{пн}$, тем при больших значениях x_* начинается зона нечувствительности и тем меньшее влияние она окажет на работу регулятора.

Номинальной скорости $V_{пн}$ соответствует номинальное значение регулируемой величины ($x_* = 1$). При уменьшении регулируемой величины ($x_* < 1$) соответственно возрастает подача по кривой BA . При увеличении x_* (т. е. при $x > 1$) скорость падает по кривой AB до точки B (в которой $x_* = x'_*$); если $x_* > x'_*$, то на участке BC скорость равна нулю, так

как при x'_* начинается зона нечувствительности BC .

Наиболее сильно отрицательное влияние зоны нечувствительности скажется на мягких режимах и больших площадях при линейной скорости эрозии, близкой к нулю. В этом случае исполнительный двигатель работает в зоне ползучих скоростей. Так как рабочая точка находится на самой границе зоны нечувствительности, то при малейшем увеличении регулируемой величины двигатель останавливается. Произойдет увеличение зазора, вызванное эрозией; регулируемая величина уменьшится, но двигатель придет в движение только после повышения на нем напряжения до величины напряжения трогания; однако процесс эрозии к этому моменту уже может прекратиться, и наступит холостой ход, напряжение на двигателе еще более возрастет, при этом скачком начнется движение со скоростью, большей, чем скорость эрозии: система приходит к короткому замыканию, последующему реверсированию и т. д. Из сказанного следует, что работа на мягких режимах и больших площадях, т. е. в условиях производства чистовых доводочных работ, вблизи зоны нечувствительности может привести к автоколебаниям шпинделя, период которых зависит от величины зоны нечувствительности, особенно люфта и характера нарушения процесса. В некоторой мере автоколебания шпинделя

могут быть полезны, если, помимо неустойчивости регулятора, имеется неустойчивость процесса, вызванная недостаточной скоростью эвакуации.

Одной из мер борьбы с автоколебаниями электрода на мягких режимах является введение вибрации электрода с большой частотой; при этом разрыв короткого замыкания и подача производятся электродом, вибрирующим с амплитудой, превышающей величину номинального зазора.

Наличие зоны нечувствительности практически не сказывается при большей скорости эрозии, т. е. на жестких режимах и малых площадях.

СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ЗАЗОРА

В зависимости от элементов, входящих в блок-схему АРЗ (см. рис. 51), различают регуляторы (по типу исполнительного двигателя) с выходом на двигатель постоянного тока, переменного тока, импульсного тока (шаговый двигатель), на гидродвигатель или гидроцилиндр; регуляторы (по типу усилителя) — электронно-ионные, магнитные, магнитополупроводниковые, транзисторные, тиристорные, электромашинные, гидравлические, релейные и, наконец, вообще без усилителей. По конструкции механической части регуляторы разделяются на две группы: с «плавающим» шпинделем и «с жесткой» подачей, т. е. с винтом-гайкой и редуктором. По типу входного сигнала различают регуляторы со съемом сигнала по амплитуде пробивного напряжения на промежутке, по среднему напряжению, или среднему значению импульсного тока.

Из всего многообразия схем и конструкций регуляторов, у которых имеются всевозможные сочетания указанных признаков, остановимся только на тех схемах, которые применяются в промышленных моделях электроимпульсных станков.

Регулятор типа «плавающий шпindel» является первым автоматическим регулятором, примененным в электроэрозионных станках, он широко известен и используется в настоящее время в некоторых электроискровых и электроимпульсных станках. В последние годы разработана новая конструкция гидросоленоидного регулятора с простейшим неререверсивным магнитным усилителем, отличающаяся тем, что для демпфирования колебаний шпинделя, подвешенного на сильфонах, во внутреннюю полость соленоида залито масло, дросселируемое и перекачиваемое при движении шпинделя из полости в полость. Этот регулятор, обладающий большой компактностью (диаметр головки 60 мм, длина 350 мм при ходе до 15 мм) и простой конструкцией, имеет высокое быстродействие и надежность, позволяет исключить из головки узел вибратора и разместить на одном станке большое количество параллельно работающих головок. Этот регулятор применен на одиннадцатшпиндельном станке для обработки валков периодического проката (модель МА-53).

Магнитополупроводниковый регулятор (МПР) состоит из двух каскадов усиления — на транзисторах и дифференциального магнитного усилителя с выходом на постоянном токе (рис. 60). Регулятор позволяет управлять процессом

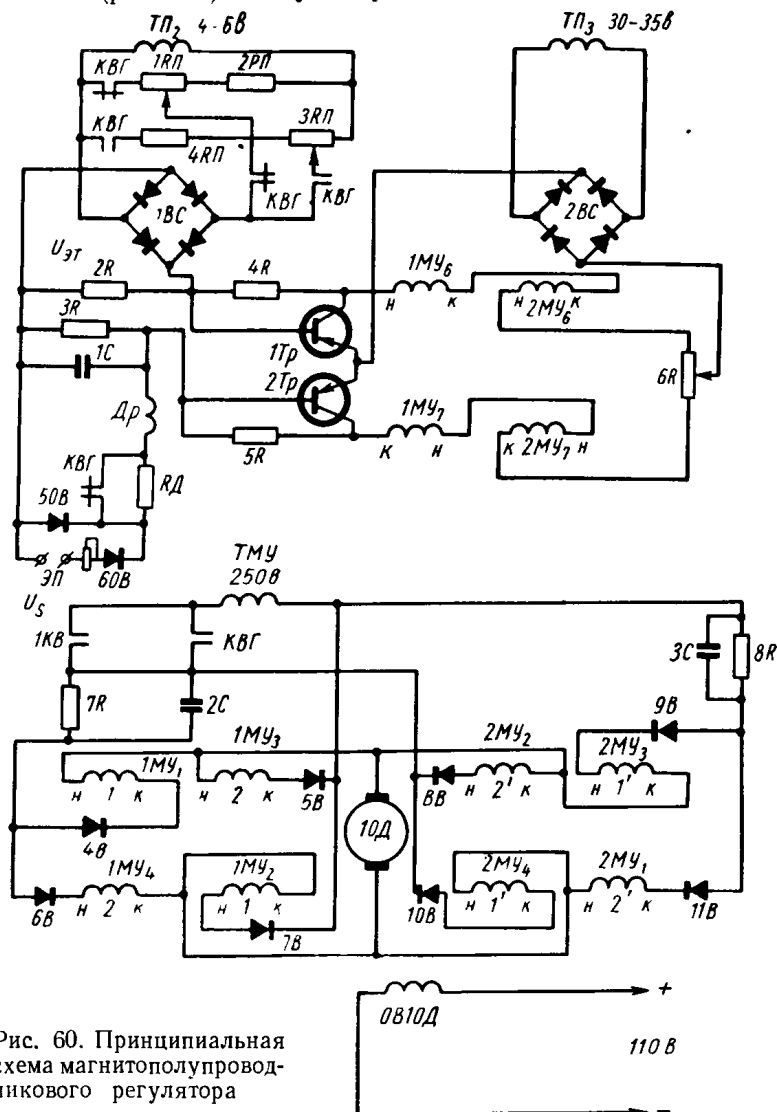


Рис. 60. Принципиальная схема магнитополупроводникового регулятора

при работе от машинного и высокочастотного электронно-полупроводникового генератора. Этот регулятор установлен на станках моделей 473, 4723, 4723Д.

На базы триодов 1Tr—2Tr подается сигнал, пропорциональный разности двух напряжений: напряжения $U_{эм}$ от независимого источника 1BC и напряжения U_S на эрозионном промежутке ЭП

(через сглаживающий дроссель Dp и емкость $1C$). Для работы станка от высокочастотного генератора введены диоды $50B$, $60B$ и гасящее сопротивление RD . Величина напряжения $U_{эм}$ регулируется потенциометром $1RP$ (при питании станка от машинных генераторов средней частоты типа MGI) или $3RP$ (при подключении станка к высокочастотному электронно-полупроводниковому генератору типа ВГ-3В). Величина и знак разности напряжений $\Delta U = U_{эм} - U_S$ регулируются при поддержании определенного зазора в зависимости от режима обработки. Для выравнивания коэффициентов усиления триодов используются сопротивления $4R$ и $5R$. Балансировка первого каскада усиления осуществляется при помощи сопротивления $6R$. Усиленный сигнал ΔU поступает в обмотки управления $1MU_6$, $2MU_6$ ($1MU_7$, $2MU_7$) дифференциального магнитного усилителя, включенные последовательно-встречно в каждое плечо усилителя первого каскада. Второй каскад усиления представляет собой двоянную мостовую двухполупериодную схему Бальяна. Обмотки $1MU$ относятся к первому магнитному усилителю, обмотки $2MU$ — к второму. Для повышения их коэффициента усиления применяется внутренняя положительная обратная связь, осуществляемая включением кремниевых диодов последовательно с каждой обмоткой переменного тока ($4B—11B$).

Дроссели магнитного усилителя, обозначенные индексами 1 ($1'$), 2 ($2'$), относятся к противоположным плечам моста. Если при подаче усиливаемого сигнала сердечник дросселя 1 ($1'$) насыщается, то сердечник дросселя 2 ($2'$) размагничивается, и наоборот. Индуктивное сопротивление обмоток переменного тока уменьшается у той пары сердечников, где магнитный поток от сигнала совпадает по направлению с постоянной составляющей потока, и увеличивается у двух других обмоток, где они действуют встречно. Вследствие того, что индуктивное сопротивление одной пары обмоток падает, а другой возрастает, нарушается равновесие моста. На нагрузке (двигатель $10D$) появится напряжение, и мост начнет вращаться — происходит подача электрода. При изменении полярности усиливаемого сигнала двигатель начнет вращаться в противоположную сторону. При отсутствии управляющего сигнала напряжение на двигателе равно нулю. Под действием среднего напряжения на нагрузке в системе возникает паразитный ток, действующий навстречу рабочему току. Для снижения величины этого тока в систему вводятся балластные сопротивления $7R$ и $8R$. Паразитный ток протекает по сопротивлениям $7R$ и $8R$, по которым проходит и рабочий ток. Для снижения потерь мощности в этих сопротивлениях их шунтируют емкостями $2C$, $3C$, снимая тем самым с сопротивлений переменную составляющую тока. Питание обмотки возбуждения двигателя осуществляется от выпрямителя $1BC$.

На рис. 61 показана зависимость выходного напряжения усилителя МПР от напряжения на обмотках управления.

Т и р а т р о н н ы й регулятор установлен на станке
мод. 4A722.

Сигнал на входе (рис. 62) снимается по напряжению ($3R$) и по току ($1R$) поступает соответственно на трансформаторы напряже-

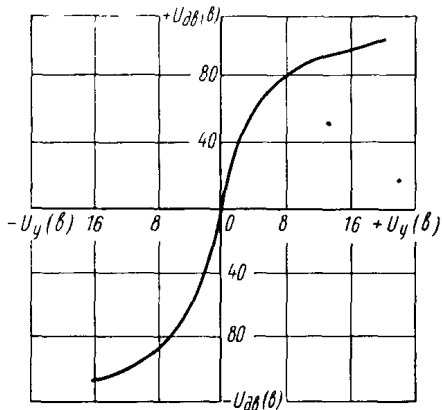


Рис. 61. Характеристика «вход—выход» регулятора МПР

ния $TН$ и тока $TТ$ для того, чтобы исключить гальваническую связь (землю) со станком. Выпрямленный ($1СВ$ и $2СВ$) сигнал алгебраически суммируется на сопротивлениях $5R$ и $13R$; разность напряжений поступает на балансный усилитель постоянного тока (двойной триод $6Н9$ — лампа $1Л$, $2Л$). С выхода балансного усилителя ($17R$, $15R$, $7R$) сигнал поступает на сетки тиратронов $1Т_{\kappa}$ и $2Т_{\kappa}$; сюда же подается переменное напряжение с анодов тиратронов (через $19R$, $3C$, $10R$, $4C$).

зывается два напряжения: постоянное от балансного усилителя, зависящее от состояния промежутка, и переменное, сдвинутое на 90° относительно анодного напряжения. При отсутствии сигнала

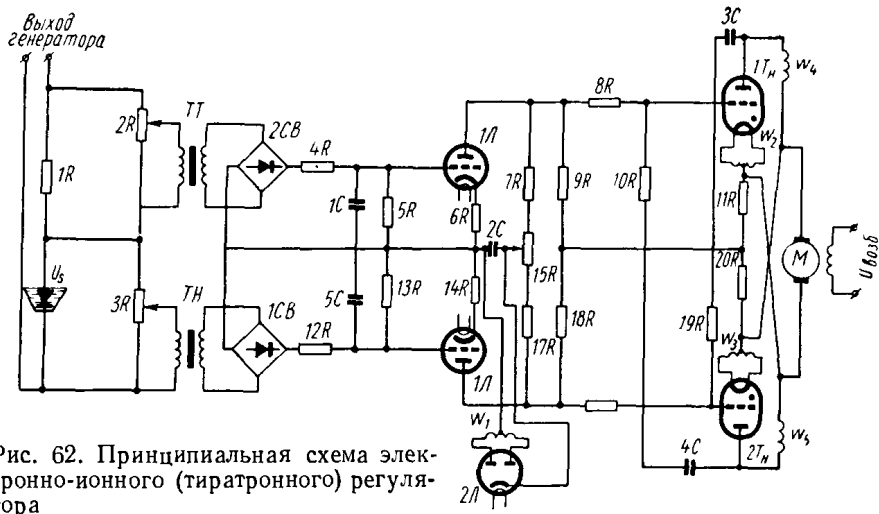


Рис. 62. Принципиальная схема электронно-ионного (тиратронного) регулятора

с промежутка тиратроны приоткрыты. Якорь двигателя M (СЛ-221. 24 *вт*, 110 *в*) включен в катодные цепи $1T_n$ и $2T_n$, и через него течет ток, пропорциональный разности анодных токов тиратронов. На холостом ходу станка открывается полностью тиратрон $1T_n$ и двигатель сближает электроды. При появлении рабочего тока

падает напряжение на промежутке и растет на $1R$: уменьшается постоянное смещение на тиратроне $2T_n$, вследствие чего растет ток через $1T_n$ и уменьшается через $2T_n$ — скорость двигателя снижается и при достижении заданного зазора станет равной номинальной скорости подачи. В случае, если зазор станет меньше заданного, разность токов тиратронов станет отрицательной, двигатель будет вращаться в сторону, соответствующую отводу шпинделя. При коротком замыкании полностью открывается тиратрон $1T_n$, а тиратрон $2T_n$ соответственно полностью закрывается. В результате начинается быстрый отвод шпинделя. Величину зазора можно устанавливать с помощью потенциометров $2R$ и $3R$. Потенциометр $15R$ служит для балансировки усилителя постоянного тока.

Гидравлические регуляторы получили применение в тяжелых универсальных (модели 4725, 4726), специальных и специализированных электроимпульсных станках с большим количеством инструментальных головок. Такие регуляторы использованы в автоматической линии ЛЛ-1 для электроимпульсного калибрования лопаток. Эти регуляторы содержат исполнительный гидроцилиндр и гидросистему со следящим вращающимся золотником, управляемым непосредственно напряжением с эрозионного промежутка.

На рис. 63 представлена принципиальная электросхема управления гидравлическим регулятором. В станке применена многоконтурная обработка с отдельными гидрофицированными инструментальными головками. Электроды-инструменты крепятся на штоках гидроцилиндров. Все контуры питаются технологическим током от одного общего источника. Каждый контур имеет свой независимый регулятор, роль которого выполняет электрогидравлический следящий золотник типа Г68-11а. Питание всех цилиндров осуществляется от общей гидростанции. Управляющим элементом каждого следящего золотника является катушка-соленоид с двумя независимыми обмотками C_1 и C_2 . На обмотку соленоиды C_1 подается разность двух сигналов: $\Delta U = U_S - U_{эт}$; когда $\Delta U > 0$, производится подвод электрода-инструмента к обрабатываемой детали; при $\Delta U < 0$ — отвод. Если $\Delta U = 0$, то электрод неподвижен. Сигнал U_S снимается с эрозионного промежутка через сопротивление $3R$; эталонный сигнал подается от независимого источника питания ($2T_{pz}$, $1B$). Обмотка соленоиды защищена от токовых перегрузок предохранителем $1П$. Напряжение на соленоиде указывается вольтметром с положением нулевой отметки посередине

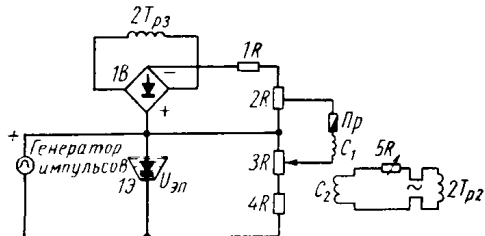


Рис. 63. Электрическая схема включения следящего золотника

шкалы. По отклонению стрелки вольтметра судят о работе регулятора. Вибрация электрода-инструмента обеспечивается гидросистемой. Для этого с обмотки трансформатора $2Tr_2$ подается переменное напряжение на вторую обмотку C_2 катушки следящего золотника. Возникающая при этом вибрация катушки передается через гидросистему на электрод. Величина тока через обмотку C_2 катушки регулируется сопротивлением $5R$. Гидросхема и электросхема станка, помимо поддержания требуемого зазора между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью, обеспечивают быстрый подвод и отвод электродов.

Достоинством электрогидравлических регуляторов является высокое быстродействие (отрабатывается сигнал 50 гц, вследствие чего можно отказаться от вибратора), меньшая зона нечувствительности, обусловленная тем, что игла следящего золотника практически не имеет трения покоя (непрерывные вибрации в состоянии покоя), отсутствие практически люфтов, компактность, большие усилия, развиваемые гидроцилиндром. Вследствие этого гидравлические регуляторы получили применение в первую очередь в тяжелых станках (большие веса электродов, большие хода и скорости установочных перемещений) при многошпиндельной обработке. Серьезным преимуществом также является возможность сборки регулятора из стандартных элементов, в частности использования унифицированных гидростанций и следящего золотника Г68-11а.

Разработан и находится в стадии освоения ряд новых типов регуляторов, обладающий повышенными показателями по чувствительности, быстродействию и устойчивости. Эти регуляторы предназначены для работы с широкодиапазонными генераторами и используют транзисторно-тиристорные элементы в цепях усиления, в некоторых случаях — шаговые двигатели и безлюфтовые передачи с шариковыми винтами.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Задача автоматической оптимизации сначала электроискровых, а затем электроимпульсных станков была поставлена и решалась в 1952—1960 гг. В предложенных тогда системах использовался принцип определения знака производной $\frac{\partial M}{\partial s}$, где вместо M измерялся косвенный показатель — скорость подачи. Однако такая система имела низкую помехоустойчивость, которая объяснялась, как было выяснено впоследствии, тем, что функция $M = f(s)$ имеет максимум не для мгновенных значений s , а для усредненных, причем интервал усреднения измеряется десятками секунд и определяется статической характеристикой зазора. По этой причине системы оптимизации с применением дифференцирующих цепочек, а также испытанная впоследствии схема с запоминающими устрой-

ствами обладали либо низкой помехоустойчивостью, либо большим временем действия. Косвенный измеритель производительности — непрерывно изменяемая скорость подачи — не обеспечивала создания надежной системы экстремального регулирования.

В последующих разработках был впервые применен изложенный выше принцип оптимизации, специфический для электроимпульсных станков и заключающийся в том, что оптимальная скорость подачи должна устанавливаться таким образом, чтобы в си-

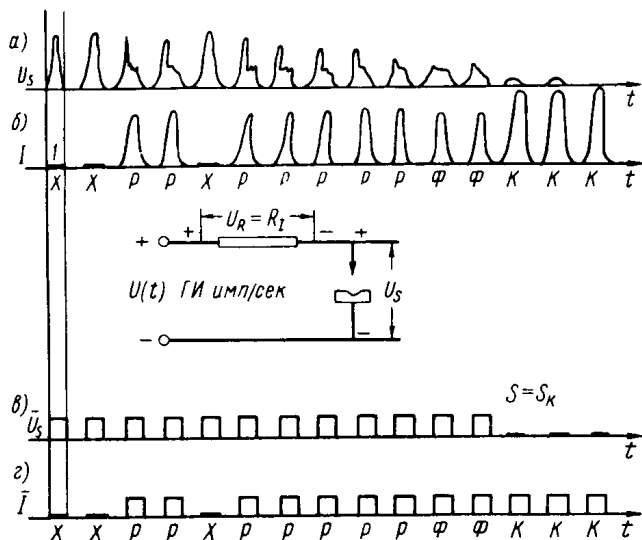


Рис. 64. Диаграмма состояний процесса и нормирования импульсов

стеме имел место возможный для данных условий минимум холостых», «короткозамкнутых» и «фиктивных» импульсов или, что то же, максимум рабочих импульсов (не выделяя в последнем случае первичные и вторичные рабочие импульсы).

Такая система оптимизации становится дискретной, более помехоустойчивой, с новым косвенным измерителем оптимума — числом «рабочих» импульсов.

Для того чтобы фиксировать показатель экстремума n_p , необходимо непрерывно анализировать состояние системы (рис. 64). По сочетанию сигналов напряжения и тока можно определить искомое состояние, если построить схему, которая будет реагировать не на абсолютную величину сигнала, а только на его наличие или отсутствие. В верхнем ряду (а) показаны все виды импульсов напряжения, а в нижнем (б) — соответствующие им импульсы тока. Состояние системы можно описать табл. 27.

Для того чтобы исключить влияние абсолютной величины амплитуды и длительности импульса, все импульсы ограничиваются до одного и того же уровня по амплитуде и ширине (хотя

возможен вариант ограничения только по амплитуде с усреднением импульсов во времени). Такие ограниченные импульсы представлены в последних двух рядах. При таком кодировании сигналов нельзя отличить фиктивные, рабочие первичные и вторичные

Т а б л и ц а 27

Состояние	Импульс напряжения	Импульс тока
Холостой ход (x)	Есть	Нет
Работа (p)	»	Есть
Короткое замыкание (k)	Нет	»
Фиктивный процесс (ϕ)	Есть	»
Повторный импульс (n_{p2})	»	»
Первичный импульс (n_{p1})	»	»

импульсы. Относительно последних уже было сказано о близком совпадении экстремумов n_p и n_{p1} . Фиктивные же импульсы ϕ , так же, как и рабочие, характеризуются одновременно присутствием напряжения на промежутке и на сопротивлении R . Однако при их прохождении напряжение на эрозийном промежутке понижено по сравнению с

нормальной работой, что может быть учтено отдельной схемой. В соответствии с этим принципом был разработан экстремальный регулятор (рис. 65), состоящий из блоков формирования импульсов тока (OAI , OTI) и импульсов напряжения (OAV , OTV) по амплитуде и ширине, логического устройства ($ЭЛД$) и выходного автоматического потенциометра ($ИД$, $АП$), входящего в состав основного регулятора ($ОР$, $ИД_0$).

Поиск оптимума по статической характеристике $n_p(S)$ осуществляется логической схемой и блоком автопотенциометра (автозадатчика эталонного сигнала). При наличии только импульсов напряжения (холостой ход, зазор велик) логическое устройство дает команду на включение двигателя автопотенциометра (рис. 66) в сторону увеличения скорости подачи или уменьшения зазора; при наличии только импульсов тока (короткое замыкание), наоборот, поступает команда на уменьшение скорости подачи. При одновременном поступлении импульсов тока и напряжения двигатель автопотенциометра отключается: система находится в оптимуме.

Если в системе возникали «фиктивные» импульсы, то специальная схема (блок $НЛ$ на рис. 65) корректировки зазора дает команду на разведение электродов и повторный поиск, начиная с холостого хода.

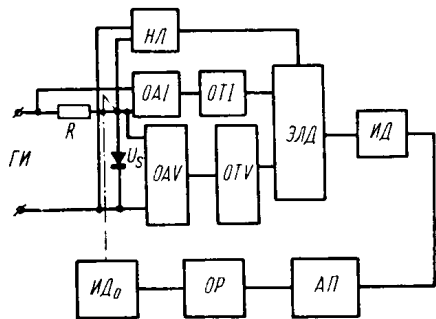


Рис. 65. Блок-схема экстремального регулятора

На вход блока формирования импульсов тока (рис. 67) подаются импульсы с токоограничивающего сопротивления (с точек 1, 2), которые поступают в формирователь импульсов тока (*ОА1*, *ОТ1*). Формирователь представляет собой ждущий мультивибратор (триггер с одним устойчивым состоянием), собранный на полупроводниковых кремниевых триодах (*1Т*, *2Т*). Ждущий мультивибратор ограничивает по ширине и амплитуде импульсы, поступающие на вход. На выходе ждущего мультивибратора получаются прямоугольные импульсы, амплитуда и ширина которых не зависят в заданных пределах от формы и амплитуды импульсов на входе. Потенциометрами *1R* и *4R* регулируется входной сигнал запуска. Триод *2Т* находится в открытом состоянии за счет смещения, подаваемого через *30R* и *4R*. При помощи потенциометра *4R* меняется смещение триода *2Т*. Триод *4Т* находится в закрытом состоянии, так как смещение на его базу не подается. Положительный запускающий импульс, подающийся на базу триода *1Т*, открывает триод. На коллекторе *1Т* появляется отрицательный сигнал, поступающий на базу триода *2Т* через ограничивающую по амплитуде цепочку *4В—12С*.

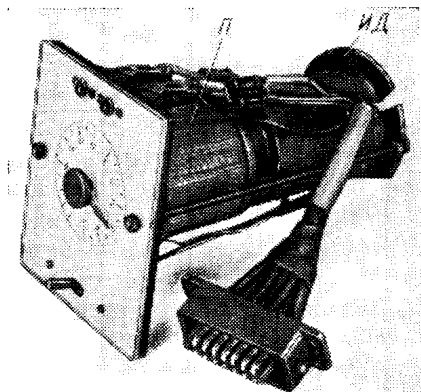
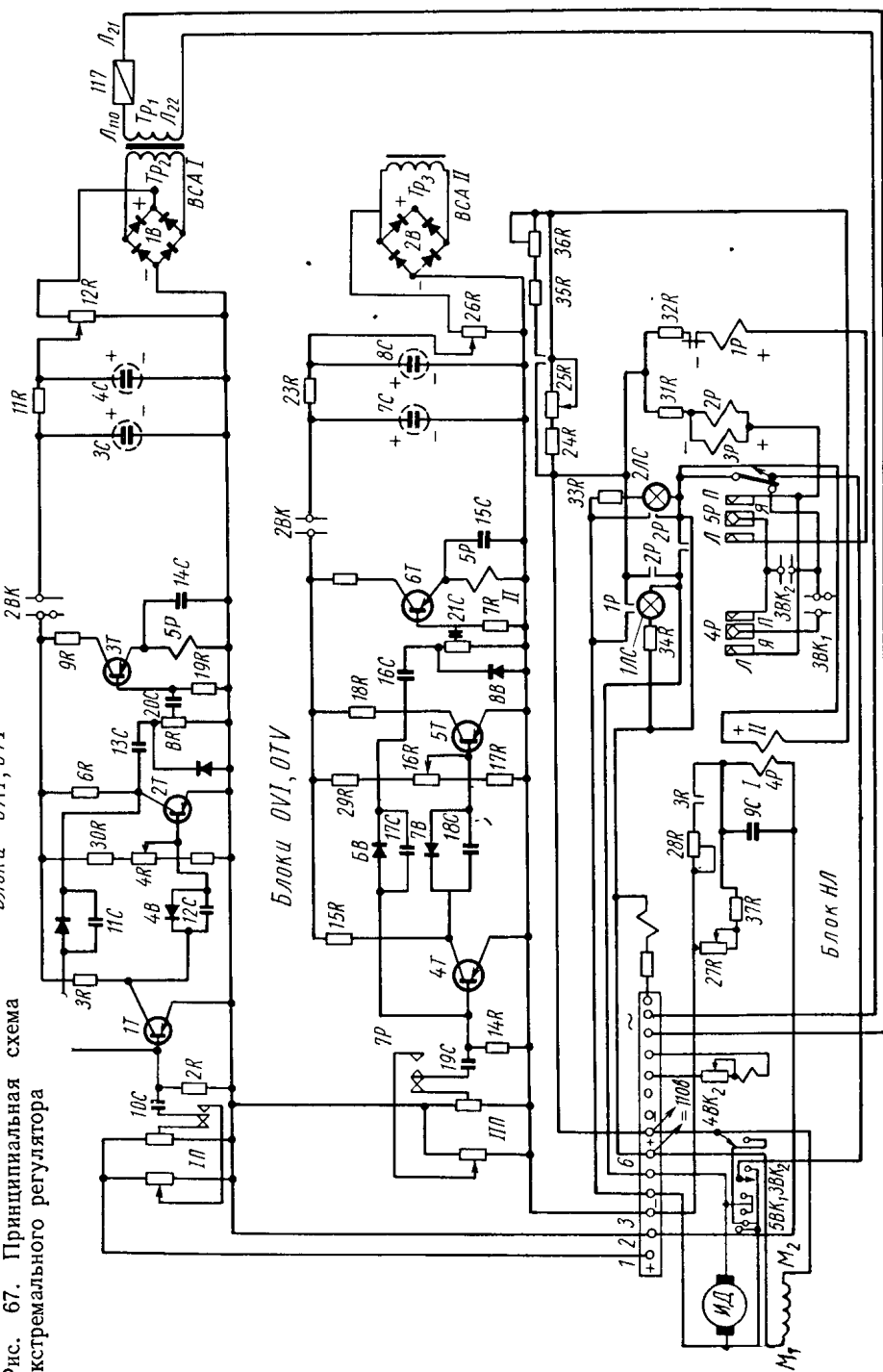


Рис. 66. Автоматический потенциометр

На коллекторе триода *2Т* появляется положительный сигнал, подаваемый через вторую ограничивающую цепочку *3В—11С* на базу триода *1Т*. Положительная обратная связь действует до тех пор, пока емкости *12С* и *11С* зарядятся, после чего схема приходит в исходное положение и ждет следующего запускающего импульса. Ширина импульса в основном определяется величинами переходных емкостей *12С*, *11С*, а амплитуда импульсов — кремниевыми стабилитронами *4В* и *3В*. Сигнал с ждущего мультивибратора подается на эмиттерный повторитель *3Т*. Диод *5В* отсекает отрицательный всплеск заднего фронта прямоугольного импульса, возникающего при переходных процессах в ждущем мультивибраторе. В цепь эмиттера триода *3Т* включена одна из обмоток поляризованного реле *5Р*, зашунтированная емкостью *14С*, сглаживающей пульсацию напряжения на обмотке реле.

Схема блока формирования импульсов напряжения (*ОАВ*, *ОТВ*) по параметрам и по назначению аналогична блоку формирования импульсов тока. Якорь поляризованного реле *5Р* может занимать одно из трех положений: среднее, левое и правое в зави-

Рис. 67. Принципиальная схема
экстремального регулятора



симости от напряжения, приложенного к обмотке реле. В обмотку реле 1 подается сигнал от формирующей цепи якоря, в обмотку 2 — от формирующей цепи напряжения.

Если подано напряжение только на обмотку реле 1, то якорь Я реле 5Р срабатывает в одну сторону (влево — Л). При этом подается напряжение на обмотку реле 1Р, которое своими нормально разомкнутыми контактами замыкает цепь питания исполнительного двигателя ИД. Это режим короткого замыкания: исполнительный двигатель ИД поворачивает ползунок автоматического потенциометра АП в сторону уменьшения эталонного сигнала основного регулятора. При этом уменьшается скорость подачи электрода-инструмента. Если подано напряжение в обмотку II реле, то якорь Я реле 5Р срабатывает в другую сторону (вправо — П), замыкает цепь катушки реле 2Р, которое своими нормально разомкнутыми контактами меняет полярность питания управления исполнительного двигателя. Это режим холостого хода: исполнительный двигатель поворачивает ползунок автоматического потенциометра в сторону увеличения подачи электрода-инструмента.

Если одновременно есть напряжение на обмотках реле 1 и 2, то якорь реле 5Р находится в нейтральном положении, на исполнительный двигатель напряжение не подается. Это соответствует нормальной работе на оптимальной скорости подачи.

Обмотка возбуждения исполнительного двигателя типа СЛ121 питается от независимого источника постоянного тока. Реле 1Р, 2Р типа РСМ-1 питаются через гасящие сопротивления 31Р, 32Р.

Работа блока корректировки зазора, т. е. защиты от фиктивных импульсов, основана на следующей особенности процесса. При работе с зазорами, меньшими оптимального, среднее напряжение на эрозионном промежутке снижается ниже 9—11 в. Этот уровень соответствует опасным режимам шлакования, в то время как нормальное среднее рабочее напряжение на промежутке колеблется в пределах 12—18 в. Схема (блок НЛ) работает следующим образом: с эрозионного промежутка через регулировочное сопротивление 27Р, 28Р и ограничивающее сопротивление 37Р подается напряжение на обмотку I поляризованного реле 4Р, якорь которого имеет только два устойчивых положения. Параллельно обмотке I включена емкость 9С, сглаживающая колебания напряжения от генератора и случайные изменения напряжения при неустойчивой работе станка. Вторая обмотка II реле 4Р включена на независимый источник постоянного напряжения через регулировочные сопротивления 25Р, 36Р и добавочные сопротивления 24Р, 35Р. Сопротивления 28Р, 36Р, 35Р включены через нормально разомкнутые контакты реле 3Р. Тумблером 3ВК включается схема корректировки зазора.

Напряжение на обмотках реле 4Р подобрано так, чтобы при напряжении 10—11 в (нижний предел) ампер-витки обмотки II реле РП4 были больше ампер-витков обмотки I и якорь Я реле 4Р

замкнулся с левым контактом L . Схема настраивается так, чтобы размыкание контактов реле $4P$ (якорь $Я$ и левый L) могло быть только в том случае, когда напряжение на эрозионном промежутке возрастает до величины (верхний предел), при которой ампер-витки обмотки I станут больше ампер-витков обмотки II . Нижний предел напряжения срабатывания реле $4P$ (~ 10 в) регулируется сопротивлениями $27R$ и $25R$. Верхний предел (12 в) регулируется с помощью переменных сопротивлений $36R$ и $28R$. При замыкании рабочих контактов реле $4P$ (якорь $Я$ и левый L) замыкается цепь питания реле $2P$, которое своими нормально разомкнутыми контактами включает исполнительный двигатель $ИД$. $ИД$ приводит

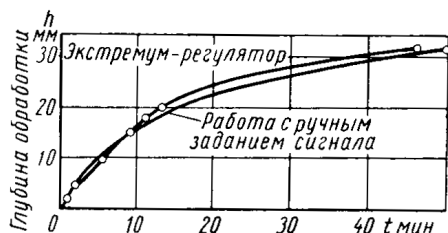


Рис. 68. Сравнительные результаты прошивки на глубину при ручном и автоматическом поиске оптимума

в движение ползунков автоматического потенциометра основного регулятора, который уменьшает скорость подачи электрода-инструмента. При этом процесс приближается к холостому ходу.

Исполнительный двигатель автоматического потенциометра коммутируется релейной схемой состоящей из реле $1P$ и $2P$, которые, поочередно срабатывая, изменяют полярность пи-

тания обмотки управления (якоря) двигателя, т. е. осуществляют реверсирование. Переключатели $3BK$, $4BK$ и $5BK$ производят необходимую коммутацию схемы (переход на наладку, включение—выключение отдельных блоков и т. д.). Сигнальные лампы, выведенные на пульт вместе со шкалой AT , наглядно показывают состояние схемы — короткие замыкания, холостой ход и оптимум, при котором лампы не горят. Стрелка шкалы AT показывает процесс поиска оптимума и его смещение (см. рис. 66).

Источником питания полупроводниковой схемы формирующих цепей тока и напряжения является трансформатор Tp , который подает напряжение порядка 19—20 в через селеновые выпрямители $1B$ и $2B$ в схему. Напряжение питания подается через потенциометры $12R$ и $26R$, которыми можно регулировать питающее напряжение на фильтре $11P$, $3C$, $4C$ и $23R$, $7C$, $8C$. На исполнительный двигатель и в цепь коммутации подается напряжение от основного регулятора ($МПР$).

На рис. 68 показано сравнение графика работы опытного оператора и экстремум-регулятора при прошивании глубокого отверстия. До глубины 14 мм ручное и автоматическое задания установки дают примерно те же результаты. На полной глубине выигрыш составил примерно 10%. Следует учесть, что оператору пришлось сделать в соревновании с экстремум-регулятором 20 перестановок движка потенциометра, что обычно вряд ли делается.

Главная эффективность оптимизации не в выигрыше производительности (поскольку опытный оператор по показаниям приборов, дымообразованию, характеру бурления жидкости и др. может довольно точно устанавливать оптимум), а в облегчении труда оператора и создании возможности многостаночного обслуживания и ускорения переходных процессов в регуляторе.

Следует отметить перспективность возврата (но на новой базе) к использованию в качестве критерия скорости подачи, пропорциональной только частоте первичных рабочих импульсов, определяемой как среднее значение скорости на отрезке пути, измеряемом при помощи дискретных, а не непрерывных отсчетных устройств.

СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ

В процессе подготовки и осуществления технологической операции вначале технолог, а затем оператор должны в соответствии с пространственной диаграммой «ток—площадь—производительность» ($I-F-M$) определить проекции площади фасонной фигуры на плоскость, перпендикулярную к направлению подачи, и для каждого сечения определить, а затем в процессе работы установить необходимый электрический режим (ток, напряжение).

Так строится технологический процесс, когда главным критерием является достижение максимально возможной производительности на ступенях предварительной обработки, без ограничений по чистоте поверхности и точности. После снятия основного припуска и перехода к чистовым операциям определяющим критерием уже является достижение в минимально возможное время заданных чистоты поверхности и точности.

Рассматриваемые ниже системы ПРР и АПРР имеют критерием производительность, т. е. они рассчитаны на предварительную обработку.

Регулирование режимов по жесткой программе (ПРР) применимо для специальных станков, настроенных на определенное изделие, и решается известным методом, например, установкой в фиксированных точках путевых выключателей (специальный двухшпиндельный станок модели 4723Д для электроимпульсной обработки рабочих колес газовых турбин).

Более точной и гибкой является фотоэлектрическая система ПРР со счетно-решающим устройством.

Величина и знак перемещений электрода-инструмента улавливается с помощью фотоэлектрического датчика, состоящего из диска, осветителя и фотодиодов. Сигнал подается на счетное устройство, которое состоит из трех кольцевых десятичных сумматоров с формирователями импульсов, отсчитывающих соответственно десятки доли миллиметра, миллиметры и десятки миллиметров. Сумматоры выполнены на полупроводниковых триодах с индика-

цией на цифровых неоновых лампах ИН-1. Схема имеет блоки задания величины перемещения шпинделя и исполнения команд. Перед началом работы станка с помощью переключателей на сумматорах устанавливаются соответствующие числовые значения согласно технологическому процессу. Сигналом для начала отсчета служит первый электрический разряд между электродом-инструментом и деталью. При работе на цифровом табло прибора в любой момент времени можно определить путь, который осталось пройти электроду до заданного размера.

Этот прибор впервые был разработан и установлен на станке модели 473, эксплуатировавшемся на ленинградском Кировском заводе, и в усовершенствованном виде применен в станке модели 4725 для отсчета перемещений, а также дискретного измерения скорости подачи.

Значительно сложнее и не имеет аналогов задача автоматического программного регулирования универсальных станков (АППР). В этом случае необходимо уметь автоматически измерять во время работы мгновенное значение проекции площади обработки в любом сечении. Ввиду отсутствия таких датчиков требуется использование косвенного измерителя, определяемого, например, из диаграммы « $I-F-M$ ». Зная $M = f(F)$ и $M = f(I)$, можно найти (имея в виду, что $V_n = \frac{M}{F}$) зависимость $V_n = f(I)$. Эта зависимость, справедливая для данного материала изделия, рабочей среды и частоты импульсов, задается в некотором масштабе на функциональный преобразователь. В процессе работы измеряются по схеме, подобно описанной выше — на фотодиодах, дискретные (во избежание помех) значения пути, пройденного шпинделем, и соответствующее время, т. е. определяется фактическое значение скорости подачи ($V_{n \text{ факт}}$) за данный интервал пути (например, 0,1 мм). Одновременно измеряются фактические значения тока $I_{ср \text{ факт}}$. Значение $V_{n \text{ факт}}$ сравнивается со значением $V_{n \text{ эт}}$, записанным на функциональном преобразователе. Если $V_{n \text{ факт}} < V_{n \text{ эт}}$, то поступает сигнал на изменение (увеличение тока). При этом будут одновременно изменяться $V_{n \text{ факт}}$ и $V_{n \text{ эт}}$. При совпадении значений $V_{n \text{ факт}}$ и $V_{n \text{ эт}}$ и соответствующих им токов $I_{ср \text{ факт}}$ и $I_{ср \text{ эт}}$, т. е. при выходе на оптимальные режимы по диаграмме « $I-F-M$ », процесс программирования прекращается до очередного изменения площади обработки.

При переходе на другой материал изделия изменяется масштаб напряжения в функциональном преобразователе.

Автоматическое программирование режимов (АППР) или, что то же, автоматическое проектирование технологического процесса, наряду с автоматическим регулированием зазора (АРЗ) и системой оптимизации скорости подачи (ЭР), превращает электроимпульсный станок в полуавтоматический. Данные системы встраиваются в современные модели станков.

Типаж освоенных и осваиваемых промышленностью электроимпульсных станков включает гамму универсальных копировально-прошивочных станков, специальные и специализированные станки для обработки рабочих колес газовых турбин и компрессоров, обработки ручьев на прокатных валках, изготовления сит в листовых заготовках, прорезки пазов в тонкостенных кольцевых заготовках, изготовления прессформ протекторов шин, обработки сопловых аппаратов, извлечения сломанного инструмента и исправления брака после термической обработки и др.

Область применения электроимпульсной обработки быстро расширяется. В соответствии с этим растет и типаж осваиваемых электроимпульсных станков.

Наибольшее применение в промышленности получили универсальные копировально-прошивочные электроимпульсные станки. На этих станках производится не менее 80 % всех операций, осуществляемых электроимпульсным способом.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЕ СТАНКИ

Эти станки, оснащенные набором соответствующих приспособлений (вращающейся и осциллирующей головками, вращающимся столом и др.), позволяют выполнить все известные операции электроимпульсной обработки. Основным ограничением являются размеры деталей, которые могут быть размещены на столе и в ванне данного станка, и величина вертикального перемещения шпинделя, определяющая возможную глубину обработки. Этим геометрическим параметрам соответствует допустимый наибольший для данного станка вес заготовки и инструмента.

Механизмы универсальных станков обеспечивают получение перемещения рабочих элементов станка и электродов-инструментов, необходимых для копировально-прошивочных работ с прямолинейным плоскопараллельным движением (см. рис. 30).

Все дополнительные движения, используемые при осуществлении других схем обработки, получают с помощью приспособлений и приставок.

Механизмы станков дают возможность получить рабочее прямолинейное перемещение от следящей системы инструментальной головки станка, ручные или механические установочные перемещения инструментальной головки в трех взаимно перпендикулярных направлениях, ручное установочное вращательное движение электрода-инструмента и его вибрации. Помимо этих движений, в тяжелых станках предусмотрен отвод головки от рабочей зоны по дуге окружности.

Универсальные станки имеют вертикальную компоновку, позволяющую защитить рабочие элементы станка от загрязнения продуктами эрозии и сократить занимаемые станками производственные площади.

Все универсальные станки снабжены жестким тумбообразным столом и подъемной ванной, описанными ниже. Такой тип узла стола и ванны обладает большой жесткостью, позволяющей практически обрабатывать любые тяжелые заготовки, размещающиеся на рабочем столе, дает возможность быстро осуществить заполнение рабочего пространства диэлектрической средой или отвод среды из рабочего пространства с освобождением его для обзора и доступа к заготовке.

В этих станках предусматривается ступенчатое или ступенчато-плавное регулирование электрических режимов, обеспечивающее набор режимов для любых операций, системы снабжения рабочей жидкостью, в том числе прокачки жидкости через инструмент, отсчета вертикального перемещения шпинделя и выключения станка по достижении заданной глубины обработки, регулирования вибрации инструмента, устройства для измерения и контроля режимов; блокировка и защита и, наконец, автоматический регулятор подачи (зазора), т. е. все основные станки, рассчитаны на весь диапазон возможных условий обработки самых разнообразных деталей.

Поскольку ограничивающими факторами являются геометрические размеры детали, станки по своим размерным параметрам образуют размерный ряд, причем в качестве основного параметра, характеризующего ряд, выбраны размеры стола. В связи с однородным технологическим назначением этот ряд включает в себя копировально-прошивочные станки, работающие как по электроимпульсному, так и электроискровому методам.

Этот ряд, дополненный тяжелыми электроимпульсными станками, состоит из семи типоразмеров, приведенных ниже:

Номер модели	0	I	II	III	IV	V	VI
Размер стола в мм	100×	160×	250×	400×	630×	1000×	1250×
		×160	×250	×400	×500	×1000	×1600
					(630)		×2000

Модели 0 и I являются электроискровыми станками; остальные пять — электроимпульсными.

Такое подразделение соответствует установившимся областям эффективного использования этих разновидностей электроэрозионной обработки.

Три модели II, III, IV, рассчитанные на наиболее распространенные в промышленности размеры изделий (модели 4Б721, 4А722, 4А723, 473, 4724), усовершенствованы в соответствии с достигнутым уровнем эрозионной обработки и также освоены станкостроительной промышленностью (модели 4Б721, 4Б722, 4723, 4А724).

Тяжелые станки (модели V, VI) не имеют ранее выпущенных аналогов.

Кроме этого, в дополнение к размерному ряду выпущен упрощенный переносный универсальный копировально-прошивочный станок модели 4611, используемый в промышленности для извлечения сломанного инструмента и деталей крепления, а также исправления брака после термической обработки.

На рис. 69 показан электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4Б722, созданный взамен станка 4А722. В табл. 29 приведены его технические данные. В модели 4Б722 по сравнению с заменяемой моделью повышены точность и чистота обработанной поверхности, увеличена производительность. Станок обеспечивает изготовление ковочных штампов, пресс-форм и кокилей с размерами обрабатываемых поверхностей до 8000—10 000 мм², предварительное профилирование твердосплавных штампов фильер, а также фильер из материалов с повышенными механическими свойствами, прорезку фасонных отверстий в тонкостенных деталях, изготовление сеток, обработку труднодоступных поверхностей, извлечение сломанных инструментов и др.

На литом основании установлены стойка и неподвижный жесткий стол с охватывающей ванной. На передней части стойки расположены направляющие для перемещения ванны. На боковой стороне стойки находится пульт управления, внутри станины — система подачи и прокачки рабочей жидкости, электрооборудова-

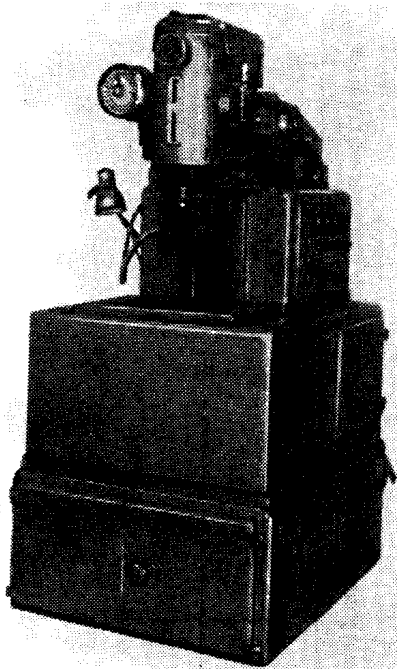


Рис. 69. Электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4Б722

Основные технические данные универсальных электронпульсных копировально-прошивочных станков

Характеристика станков	Модели станков			
	4Б722	4723	4724	4725
Размеры стола (ширина × длина) в мм	250 × 400	400 × 500	630 × 1000	1000 × 1600
Наибольший вес обрабатываемых деталей в кг	70	200	1200	4000
Прозводительность по стали	1500	3500	7000	12 000
Класс чистоты обработанной поверхности на чистовых режимах	5—6	5—6	4—5	4
Расстояние от поверхности стола до торца шпинделя в мм:				
наибольшее	470	500	650	1000
наименьшее	290	300	400	500
Тип генератора импульсов	МГИ-2М и ВГ-3В	МГИ-П9 и ВГ-3В	ГМС-400, ИГИ-15	ГМС-630, ИГИ-15
Тип регулятора подачи	Магнитополупроводниковый	Магнитополупроводниковый	Магнитополупроводниковый	Электрогидравлический
Мощность в кет	15	25	40	60
Габариты (длина × ширина × высота) в мм	1270 × 1070 × 1900	1500 × 1170 × 2000	2000 × 1660 × 2500	4600 × 3600 × 3500
Вес в кг	1500	1800	4500	12 000

ние и вентиляционная система. На верхней части стойки расположены суппорты координатных перемещений инструментальной головки. Инструментальная головка имеет ручное и автоматическое вертикальное перемещение, а также механическое перемещение по всем координатам. Для точных отсчетов координатных перемещений предусмотрены микроскопы типа МО с прецизионными линейками. Для определения глубины и времени обработки на инструментальной головке установлено отсчетное устройство.

Питание станка технологическим током осуществляется от генераторов двух типов: на черновых режимах от машинного коммутаторного генератора МГИ-2М и чистовых от высокочастотного генератора ВГ-3В.

Автоматическая рабочая подача обеспечивается магнитополупроводниковым регулятором.

Скорость съема при обработке на станке модели 4Б722 сталей достигает $1500 \text{ мм}^3/\text{мин}$ и твердых сплавов $200 \text{ мм}^3/\text{мин}$, шероховатость поверхности на чистовых режимах при работе с высокочастотным генератором соответствует $\nabla 5$ — при обработке сталей и $\nabla 6$ — в случае обработки твердых сплавов.

Станок модели 4723 (рис. 70, табл. 29) является базовой моделью гаммы универсальных копировально-прошивочных станков. Этот станок имеет наибольший диапазон применения; он позволяет обрабатывать ковочные штампы, прессформы и литьевые формы с площадью обрабатываемой поверхности преимущественно до $25\,000\text{--}30\,000 \text{ мм}^2$, лопатки, межлопаточные каналы, предварительно профилировать фасонные поверхности твердосплавных деталей для армирования штампов и технологической оснастки, а также твердосплавные фильеры или фильеры из материалов с повышенными механическими свойствами, прорезать фасонные отверстия в тонкостенных деталях, изготавливать сетки, щели, листовые пружины, обрабатывать труднодоступные поверхности, детали из магнитных сплавов, извлекать сломанные инструменты и др.

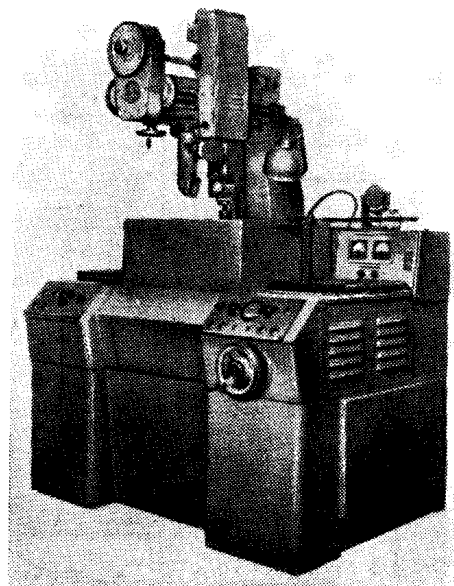


Рис. 70. Электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4723

В станке модели 4723 сохранена оправдавшая себя компоновка ранее выпускавшегося станка модели 473, однако комплектация станка, все основные узлы и элементы претерпели существенные изменения, повышающие точность станка и удобства его обслуживания.

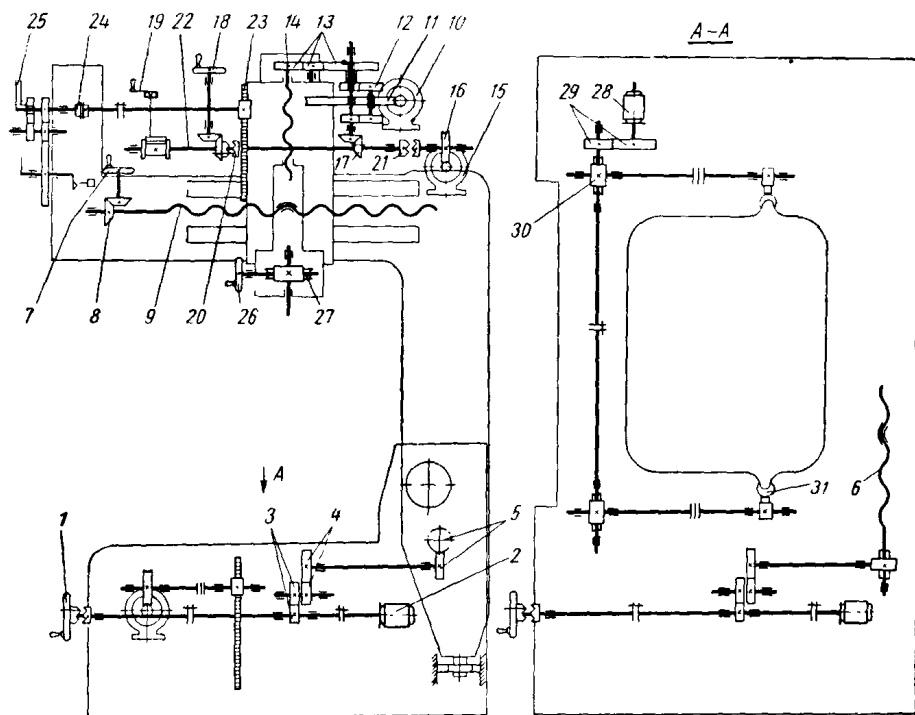


Рис. 71. Кинематическая схема станка модели 4723

Кинематическая схема станка (рис. 71) позволяет осуществить перемещение инструментальной головки относительно стола по траверсе и вместе с траверсой в горизонтальной плоскости по двум координатам и вертикальное перемещение инструментальной каретки головки с электродом-инструментом, которое может сочетаться с его вертикальными колебаниями. Движение траверсы может осуществляться как вручную от маховичка 1, так и от электродвигателя 2 через две пары цилиндрических колес 3 и 4, винтовую пару 5 и ходовой винт 6 (рис. 71, II). Поперечное движение головки по траверсе производится от маховичка 7 (рис. 71, I) через пару конических колес 8 и винт 9. Вертикальная рабочая подача инструмента обеспечивается автоматическим регулятором с регулируемым электродвигателем постоянного тока 10 через червячную и планетарную передачи 11 и 12, цилиндрические колеса 13 и винт 14 вертикальной подачи электрода-инструмента.

Быстрое установочное движение осуществляется от отдельного асинхронного электродвигателя 15 через червячную 16 и коническую 17 передачи, цилиндрические зубчатые колеса 13 и винт 14.

Наличие планетарной передачи позволяет осуществить совместно или раздельно любую работу этих электродвигателей. Вертикальное перемещение вручную осуществляется от маховика 18

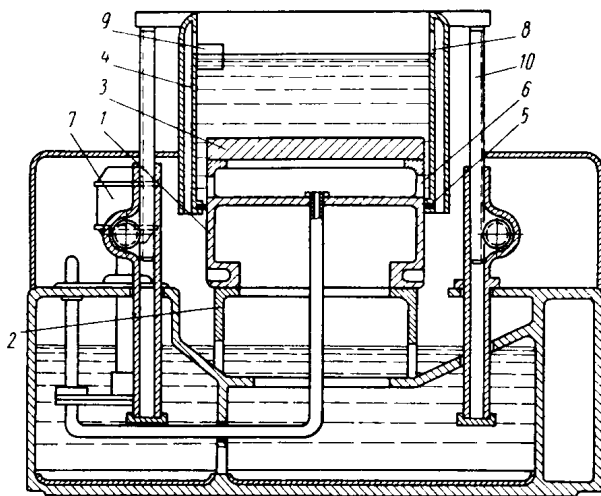


Рис. 72. Стол и ванна станка модели 4723

через валик 22, две пары конических и три пары цилиндрических зубчатых колес. При перемещении вручную поворотом рукоятки 19 муфты 20 и 21 отводятся вправо, а при механическом — влево. При вертикальном движении головки отсчитываются перемещения через реечную передачу 23, электромагнитную муфту 24 и механизм отсчета 25. Установочное вращательное движение производится через маховик 26 и червячную пару 27. Подъем и опускание ванны станка осуществляется электродвигателем 28 через пару цилиндрических колес 29 и две червячные пары 30, а также две симметричные реечные передачи 31, рейки которых жестко связаны с ванной.

Конструкция узла стол—ванна станка модели 4723 показана на рис. 72.

Эта конструкция использована с некоторыми изменениями во всех универсальных электроимпульсных станках. Стол станка 1 состоит из жесткой тумбы 2, отлитой за одно целое с основной несущей деталью станины, и рабочей плиты 3 с $\perp$ -образными пазами для крепления обрабатываемых деталей. Ванна 4 станка выполнена подъемной с двойными стенками и имеет уплотнение 5 из изно-

состойкого материала. В процессе работы рабочая жидкость непрерывно подается в ванну через окна 6 стола насосом 7. Непрерывная циркуляция рабочей жидкости способствует интенсификации ее охлаждения. Избыток жидкости сливается через окна 8 во внутренние окна ванны. Для предотвращения разбрызгивания

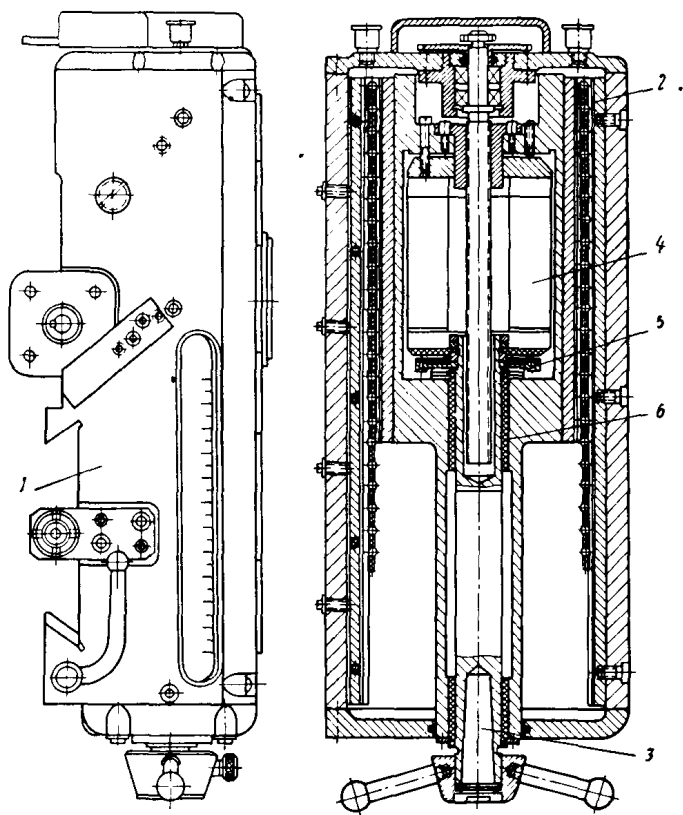


Рис. 73. Инструментальная головка станка модели 4723

и воспламенения рабочей жидкости при случайном прекращении работы насоса в ванне предусмотрено поплавковое реле 9, отключающее станок, если уровень рабочей жидкости в ванне будет ниже заданного уровня. Стол станка имеет скосы для ускорения слива жидкости при опускании уплотнений ванны ниже определенного положения. Ванна закреплена на двух штангах 10 с рейками, перемещаемыми с помощью двух зубчатых колес, приводимых от электродвигателя.

Инструментальная головка показана на рис. 73. Корпус инструментальной головки 1 представляет собой жесткую отливку с направляющими в виде ласточкина хвоста, с помощью которых он устанавливается на траверсе.

Внутри корпуса по V-образным направляющим 2 на шариках перемещается инструментальная каретка 3 со шпинделем. Шпиндель головки, имеющий снизу конусное отверстие для крепления электрододержателей или приспособлений, подвешен на рессоре 5 и установлен во втулках 6 из изоляционного материала. С помощью электромагнитного вибратора 4 шпиндель приводится в колебательное движение.

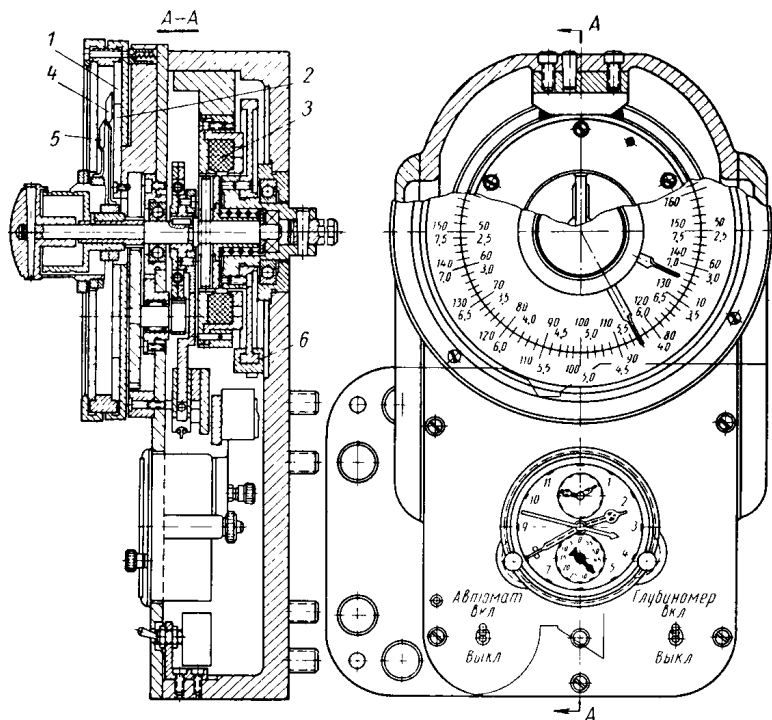


Рис. 74. Механизм отсчета вертикальных перемещений инструментальной головки станка модели 4723

На инструментальной головке закреплена рейка для привода во вращение механизма отсчета вертикальных перемещений (рис. 74). Для удобства наблюдения в этом механизме применены циферблаты 1 и 2 индикаторного типа, достаточно больших размеров. На циферблатах шкалы нанесены в обратных направлениях. При таком нанесении шкал одна из них показывает действительное перемещение электрода-инструмента, а другая дает возможность определить величину перемещения головки, остающуюся до конца обработки.

Механизм отсчета включается с помощью электромагнитной муфты 3. Указатели выполнены в виде двух стрелок 4 и 5, одна из которых отсчитывает миллиметры, а другая — доли миллиметра (0,05 мм). При достижении заданной глубины обработки с по-

мощью упоров *б* и микропереключателей подается команда на прекращение процесса и возврат инструментальной каретки с электродом-инструментом в верхнее исходное положение.

Грубый отсчет координатных перемещений производится по лимбам и линейкам, а тонкий с точностью 0,005—0,01 — с помощью отсчетных микроскопов МО и прецизионных линейек. Один из микроскопов закреплен на станине, а другой на инструментальной головке. Станок комплектуется машинным коммутаторным генератором импульсов типа МГИ-П9 и высокочастотным типа ВГ-ЗВ.

Принципиальная электросхема станка показана на рис. 75. Электрооборудование станка включает восемь электродвигателей переменного и два постоянного тока, обеспечивающих получение необходимых перемещений рабочих элементов, заполнение ванны рабочей жидкостью, прокачку рабочей жидкости через электрод-инструмент, привод машинного генератора, контрольно-измерительные приборы для установки электрического режима, коммутирующую, защитную и сигнальную аппаратуру и аппаратуру управления. Для возбуждения машинного генератора использован дроссельный усилитель ГИВ, выполненный по схеме неперверсивного магнитного усилителя с внутренней обратной связью на постоянном токе.

Параллельно якорию генератора через регулируемое токоограничивающее сопротивление включена обмотка обратной связи по напряжению $2W_{осн}$, обеспечивающая снижение минимального тока возбуждения. Питание обмотки управления $2W_y$ осуществляется от трансформатора ТП.

Напряжение на вибраторе регулируется дроссельным регулятором ДИ, 7ПР. Напряжение на дроссель подается от трансформатора ТМУ. Обмотки управления $3W_y$ и смещения $3W_{см}$ питаются от трансформатора ТП.

Дроссельный регулятор имеет выход на постоянном токе для питания электродвигателя головки с вращающимся шпинделем.

Силовой рабочий контур машинного генератора ГИ образован токоограничивающими сопротивлением *ИС*, шунтами *1Ш*, *2Ш*, *3Ш* с амперметром *А*, обрабатываемой деталью и электродом-инструментом *Э*. В зависимости от положения переключателя режимов *ПР* включается соответствующая ступень токоограничивающего сопротивления. Электрический режим при работе с машинным генератором устанавливается по напряжению на эрозионном промежутке и токе в рабочем контуре. Для перехода с низкочастотного на высокочастотный генератор (или обратно) служит переключатель ПВГ1-2. Для автоматического регулирования рабочей подачи электрода-инструмента служит магнитно-полупроводниковый регулятор МПР.

В комплект приспособлений входит головка с вращающимся шпинделем, головка для придания электроду-инструменту осциллирующих движений, набор державок и патронов.

Применяя головку с вращающимся шпинделем, помимо прошивочных работ, на станке можно резать и шлифовать.

Наибольшая производительность при обработке углеродистых сталей достигает 3500, а твердых сплавов 200 $\text{мм}^3/\text{мин}$. Шероховатость на чистовых режимах при обработке стальных деталей $\nabla 5$ и твердосплавных $\nabla 6$.

Электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4А724 (рис. 76, табл. 28) по своей компоновке и кон-

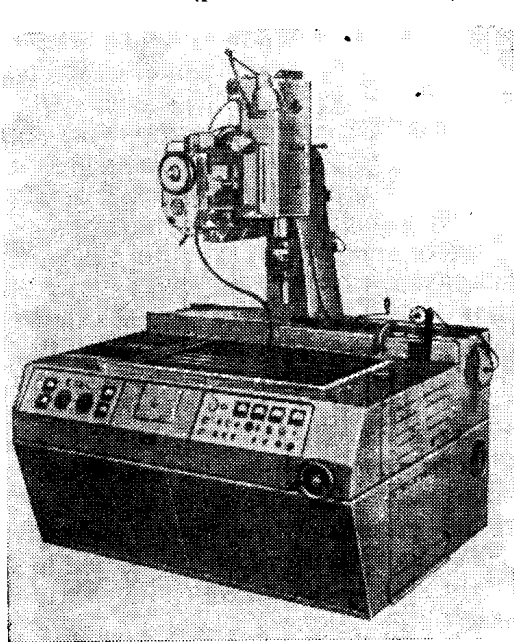


Рис. 76. Электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4А724

структивным решением основных узлов близок или аналогичен станку модели 4723. Станок обеспечивает эффективную обработку ковочных штампов, прессформ, кокилей с площадью поверхности преимущественно до 60 000—80 000 мм^2 , лопаток, межлопаточных каналов, фасонных отверстий и труднодоступных поверхностей.

В станке имеются автоматический магнитно-полупроводниковый регулятор подачи, ускоренные механические перемещения головки и траверсы, устройства для автоматического контроля глубины обработки, оптические микроскопы для отсчета координатных перемещений.

В станке применена двухконтурная схема обработки, станок укомплектован низкочастотным магнитонасыщенным генератором типа ГМС-400 для предварительной обработки и высокочастотным индукторным типа ИГИ-15 для чистовой обработки.

Станок комплектуется набором приспособлений, который резко расширяет его технологические возможности.

Наибольшая производительность при обработке на станке стальных деталей достигает 7000—8000 $\text{мм}^3/\text{мин}$, шероховатость на чистовых режимах соответствует $\nabla 4$ — $\nabla 5$.

Тяжелый электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4725 существенно отличается от всех ранее выпускавшихся станков; в табл. 29 указаны его основные технические данные, а на рис. 77 показан внешний вид станка.

Станок предназначен для обработки крупных деталей с фасонными поверхностями.

Стол станка выполнен в виде неподвижной, хорошо развитой жесткой тумбы и охватывается по периметру подъемной ванной по типу ванны станка модели 4723, обеспечивающей необходимый уровень рабочей жидкости над поверхностью обрабатываемой детали. Подъем ванны осуществляется гидроцилиндром через реечные передачи.

Станина станка представляет собой литую коробку, имеющую полости, служащие резервуаром для рабочей жидкости. Внутри, в средней части станины, установлен шнековый транспортер, ко-

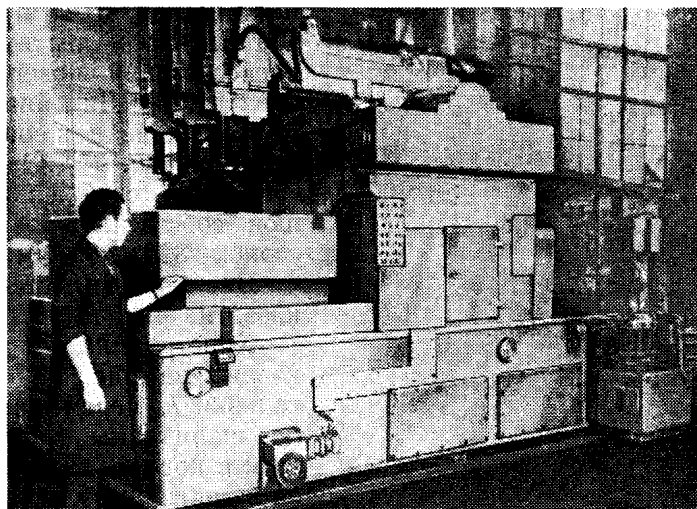


Рис. 77. Электроимпульсный копировально-прошивочный станок модели 4725

торый перемещает отходы эрозионного процесса к торцу станины, в карманы скребкового цепного транспортера, загружающего отходы в подставленную тару.

Специальная система улучшает отстой продуктов эрозии и интенсифицирует охлаждение рабочей жидкости.

Станок снабжен системой отсоса паров и газов, выделяющихся при эрозионной обработке.

Питание станка технологическим током осуществляется от двух источников: на черновых режимах — от низкочастотного ГМС-630 и на чистовых — от высокочастотного ИГИ-15 генераторов.

Станок комплектуется орбитальной головкой, позволяющей придавать электроду-инструменту круговые движения, необходимые при чистовой обработке. Наибольшая скорость съема металла: равна $12\,000\text{ мм}^3/\text{мин}$, шероховатость при обработке крупных поверхностей на чистовых режимах соответствует $\nabla 4$.

Станок модели 4611 относится к особому классу переносных станков, специально приспособленных для осуществления операций над крупногабаритными деталями.

Одним из основных применений станка является удаление остатков сломанных режущих инструментов и крепежных деталей, а также прошивание крепежных отверстий в термически обрабо-

танных деталях. Станок обеспечивает извлечение остатков сверл и крепежных деталей диаметром от 2 до 25 мм и длиной до 60 мм при горизонтальном и вертикальном расположении поверхностей обработки. Линейная скорость прошивания составляет 2—3 мм/мин.

Станок снабжен небольшой собственной ванной со столом 320×485 мм.

Внешний вид станка показан на рис. 78.

Конструкция головки показана на рис. 79. Ползун головки 1, перемещающийся по шариковым направляющим в корпусе 2, приводится в движение электродвигателем 3 постоянного тока через червячный редуктор 4 и ходовой винт 5. Внутри ползуна находится шпиндель вибратора 6, имеющий внизу цанговый зажим 7 для закреп-

Рис. 78. Электроимпульсный прошивочный переносный станок модели 4611

пления инструмента. Для обеспечения высокой точности движения шпинделя вибратора применены также шариковые направляющие 8. Выбор зазора в направляющих 8 осуществляется винтом 9 через рычаг 10. Мембрана 11 является одновременно пружиной и защитным устройством от попадания грязи. Колебательное движение сообщается от электромагнита 12. Нижнюю часть корпуса 2 охватывает стакан 13 с уплотнением 14. Стакан имеет вертикальное перемещение и фиксируется на корпусе гайкой уплотнения 15, что позволяет создать вокруг зоны обработки замкнутую полость, необходимую при работе вне резервуара станка или при работе с наклоном головки.

Рабочая жидкость подается насосом через входной ниппель в полость шпинделя вибратора и через отверстие в инструменте поступает в зону обработки. Рабочая жидкость из станка отводится

через ниппель. Путевой выключатель 16 ограничивает ход ползуна вниз. Ползун можно перемещать вручную с помощью рукоятки, установленной на корпусе головки, при этом червячная передача включается посредством специальной муфты.

Головка снабжена хвостовиком, с помощью которого она может крепиться в шпинделе радиально-сверлильного станка.

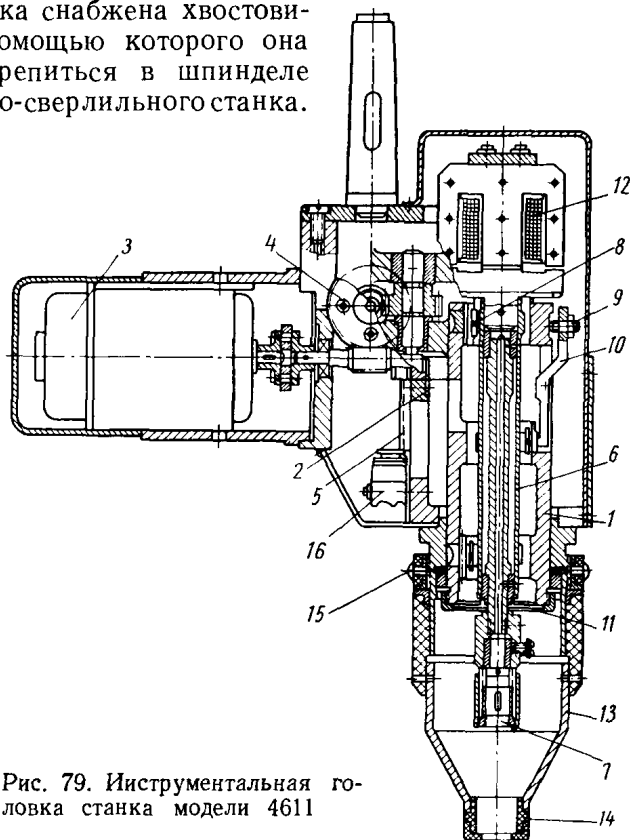


Рис. 79. Инструментальная головка станка модели 4611

В качестве источника питания в станке модели 4611 применен комбинированный генератор, состоящий из низкочастотного генератора униполярных импульсов на частоту 50 имп/сек для прошивания отверстий 3—25 мм, и генератор типа LC для прошивания отверстий диаметром 2—3 мм. Автоматическая рабочая подача электрода-инструмента обеспечивается с помощью регулятора с магнитным усилителем.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАНКИ

Специальные и специализированные электроимпульсные станки в отличие от универсальных имеют большую производительность вследствие увеличения количества одновременно работающих электродов, автоматизации цикла обработки и сокращения вспо-

могательного времени благодаря использованию специальных устройств, предусмотренных в конструкциях станков. Количество моделей специальных станков довольно велико; при этом в качестве базовых станков часто используются лучшие модели универсальных станков. Так, специализированный двухшпиндельный электроимпульсный станок модели 4723Д (рис. 80) для обработки межлопаточных каналов рабочих колес турбин спроектирован

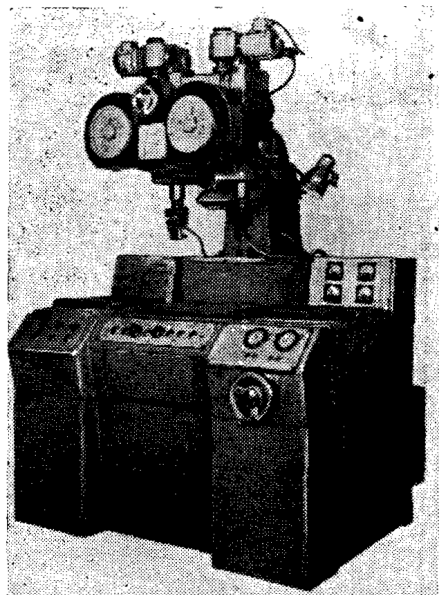


Рис. 80. Специализированный станок модели 4723Д

на базе универсального копировально-прошивочного станка модели 4723. Помимо обработки рабочих колес диаметром до 300 мм, станок может быть также использован для многопозиционной обработки лопаток, штампов и других деталей. В комплект входят собственно станок, машинный генератор униполярных импульсов типа МГИ-3М на 400 имп/сек и высокочастотный электронно-полупроводниковый или машинный генератор. В отличие от универсального станка модели 4723 двухшпиндельный станок имеет усиленную Г-образную траверсу, посаженную на круглую направляющую. Траверса перемещается в продольном направлении вручную или при помощи механического привода.

На консольной части траверсы расположены две спаренные головки с индивидуальными приводами подачи шпинделей, а также прибор, отсчитывающий вертикальные перемещения инструмента с циферблатами для каждого шпинделя.

Корпусы головок, объединенные седлом, имеют установочное поперечное перемещение по призматической направляющей траверсы и связаны внизу перемычкой, таким образом головки соединены в один блок, устойчиво посаженный на консоль.

Блок головок перемещают по траверсе вручную.

В корпусах головок (рис. 81) на призматических шариковых направляющих перемещаются шпиндельные каретки с регулируемым вибратором. Сами шпиндели установлены в каретках на изоляционных втулках и прикреплены к вибратору двумя плоскими пружинами. Движение каретки через реечно-шестеренную передачу сообщается стрелкам циферблатов прибора, отсчитывающего вертикальные перемещения шпинделей. Точность кон-

тролируемых перемещений шпинделей составляет 0,1 мм. Редукторы на головках обеспечивают реверсивное медленное рабочее и быстрое холостое движения шпинделей на всю установленную длину хода от двух электродвигателей постоянного и переменного тока. Кроме механического, головки имеют ручной привод для наладочных установок шпинделей. Опускание шпинделей от механического привода ограничивается микропереключателем с регулируемым кулачком в механизме отсчитывающего прибора. Кулачок верхнего ограничения подъема шпинделей не регулируется. Микропереключатели позволяют автоматически включать электрические режимы обработки в любой последовательности, заданной в зависимости от глубины погружения электрода в деталь. Каждая головка регулируется независимо.

Электросхема управления станком позволяет одновременно включать машинный и высокочастотный генераторы на разные головки или один из генераторов на один или оба шпинделя одновременно.

При работе с питанием от машинного генератора МГИ-3М в наладочном или полуавтоматическом цикле на любом из рабочих режимов оптимальный ход процесса поддерживается экстремальным регулятором ЭР-1 и контролируется по циферблатам автоматических потенциометров на пульте станка раздельно для каждой головки.

Для повышения эффективности электроимпульсных станков на операциях, подобных указанной, представляют интерес станки с большим числом инструментальных головок, работающих от общих источников питания. Такие станки можно применять как для

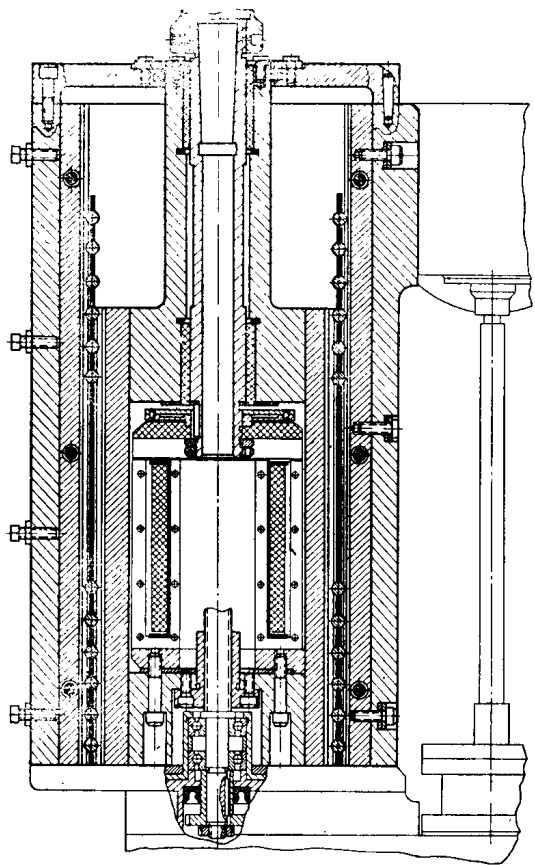


Рис. 81. Инструментальная головка станка модели 4723Д

многопозиционной обработки серийных деталей, например лопаток, так и для совмещения нескольких операций при обработке одной более или менее крупной детали. Например, в электроимпульсном станке модели МА-53 (рис. 82), предназначенном для обработки ручьев валков периодического проката, одновременно работает 11 шпинделей, несущих на себе по две многоэлектродные гребенки. Таким образом, обеспечивается возможность одновременной обработки 22 ручьев вала.

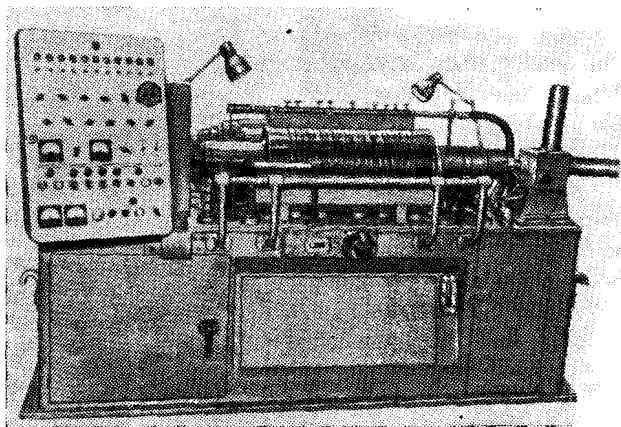


Рис. 82. Одиннадцатшпиндельный полуавтомат для электроимпульсной обработки валков периодического проката модели МА-53

Станок представляет собой гидрофицированный полуавтомат с многоконтурной электросхемой и независимым регулированием межэлектродного промежутка на каждом контуре.

Гидросоленоидная головка, в которой закрепляется электрод-инструмент, осуществляет подачу электрода во время обработки и одновременно является автоматическим регулятором подачи.

В качестве источника технологического тока использован машинный генератор импульсов МГИ-3М.

Разработан специализированный электроимпульсный станок (модель МА-4729) для обработки фасонных поверхностей рисунка прессформ протекторов шин размерами до $\varnothing 1500 \times 400$ мм.

Станок представляет собой шестишпиндельный полуавтомат с гидрофицированными инструментальными головками и электрогидравлической следящей системой.

Для установки обрабатываемых прессформ служит стол с круглой подъемной ванной, вокруг стола располагаются две группы инструментальных головок по три головки в каждой. Головки в группе помещены в порядке последовательности режимов обра-

ботки и используются: одна для черновой обработки, вторая для получистовой и третья — для чистовой.

Деление на шаг рисунка осуществляется с помощью делительного механизма со сменными зубчатыми колесами; регулирование режимов — программное.

Станок комплектуется тремя видами генераторов: низкочастотным магнитонасыщенным типа ГМТ-250, машинным МГИ-3М и высокочастотным ИГИ-15.

Многоинструментная обработка особенно часто применяется при одновременном выполнении одинаковых операций; типичным ее примером может служить одновременное прошивание большого числа отверстий или щелей в сетках. При этом обработка осуществляется либо при наличии одинаковых источников импульсного тока в каждом контуре, что характерно для электроискровых станков с релаксационными генераторами, либо при питании нескольких контуров от одного источника питания, что характерно для электроимпульсных станков с мощными машинными генераторами импульсов.

Для прошивания отверстий в сетках и ситах выпущено значительное число многоконтурных станков, обеспечивающих одновременную отработку от 20 до 8000 отверстий. Так, на электроимпульсном станке модели МЭ-9 (рис. 83) одновременно обрабатывают 7552 отверстия диаметром 1 мм и более, изготавливают сетки из нержавеющей стали. Заготовкой служит лист толщиной до 1,5, шириной до 710 мм и неограниченной длины.

Станок — сварной конструкции.

Над столом станка жестко со станиной закреплена поворотная траверса, несущая четыре инструментальные головки с держателями электродов. Для смены держателей с электродами траверса может поворачиваться на угол 90° при помощи червячной пары и рукоятки. Рабочее положение траверсы фиксируется упором при помощи клина.

Каждая инструментальная головка траверсы имеет редуктор с электродвигателем постоянного тока. Рабочая подача инструментальной головки вниз и обратный ход вверх после окончательного прошивания отверстий осуществляются с помощью автоматического электронного регулятора подачи. На подвижной части головки находится вибратор с электрододержателем.

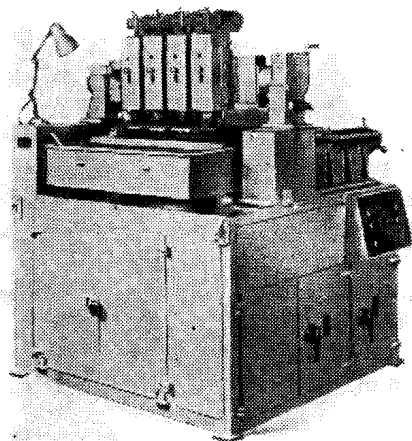


Рис. 83. Электроимпульсный станок для изготовления сеток модели МЭ-9

Инструмент представляет собой набор медных электродов-проволочек в специальной державке. Четыре державки установлены в одну линию и перекрывают всю ширину листа.

Рядом с ванной находится дополнительное устройство для перемещения стола станка с закрепленным на нем листом на шаг после прошивания ряда отверстий. Лист (или лента) закрепляется на столе, для чего стол с помощью винтовой пары выводится из зоны обработки. Конструкция станка позволяет изготавливать сетки непосредственно из рулона ленты.

В качестве источника технологического тока применяется машинный генератор МГИ-2М. Потребляемая станком мощность 8 *квт*, вес 1460 *кг*, габаритные размеры 2050×1540×1695 *мм*.

Для отверстий диаметром менее 1 *мм* обычно применяют электроискровые станки с релаксационными генераторами. Однако при изготовлении щелей (вследствие увеличения площади за счет длины щели) электроимпульсные источники могут применяться при ширине щели и менее 1 *мм*. Так, специальный двухшпиндельный электроимпульсный станок модели 4Ц24М позволяет изготавливать щели шириной от 0,5 *мм*, длиной до 75—80 *мм* и глубиной до 5 *мм*.

Каретка, несущая рабочие шпиндели, перемещается по направляющим, очерченным по радиусу расположения щелей на сегментах. Направляющие каретки крепятся на станине в верхней части. Каждая шпиндельная головка имеет два перемещения — индивидуальное и общее с кареткой.

В верхней правой части станка смонтирована коробка деления, обеспечивающая перемещение шпинделей на заданный угол поворота. Инструмент, состоящий из плоских медных электродов, установленных в специальную державку, закрепляется в шпинделе станка и имеет автоматическое перемещение от регулятора подачи, установленного на каждом шпинделе. Число одновременно работающих электродов от 96 до 184.

Шпиндельная головка имеет устройство для автоматического отключения работы при достижении определенной глубины. Регулятор подачи электромашинный.

В качестве источника технологического тока применена двухконтурная схема независимого генератора импульсов, в котором в качестве источника переменного тока применен сварочный преобразователь ПС-100. Габаритные размеры станка 1272×1190×1700 *мм*, вес 1200 *кг*.

Прогресс, достигнутый в последние годы в создании источников питания (низкочастотных статических генераторов), в разработке многоконтурных схем и повышении стойкости инструмента, позволил перейти от автоматизации отдельных электророззионных станков к созданию автоматических линий. В СССР создана первая автоматическая многопоточная линия модели ЛЛ-1 (рис. 84) для электроимпульсного калибрования турбинных ло-

патов. На линии удаляется основная часть припуска со всех поверхностей заготовки и снимается облой, остающаяся часть припуска удаляется электрохимическим методом и шлифованием.

Линия состоит из двух участков, на одном обрабатываются поверхности, расположенные с одной стороны заготовки, а на другом — с противоположной. Для лучшего использования технологического оборудования каждый участок состоит из парал-

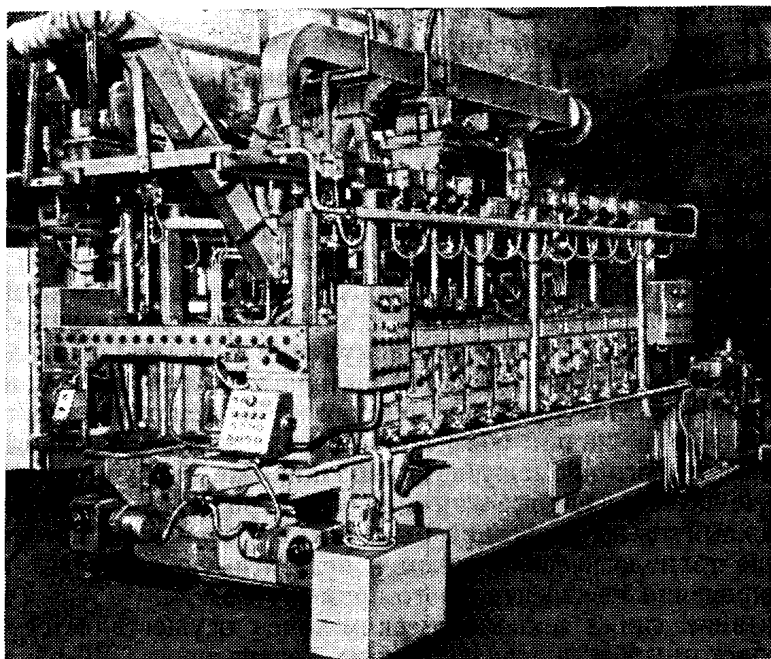


Рис. 84. Автоматическая линия для электроимпульсного калибрования лопаток модели ЛЛ-1

лельно работающих и не зависящих друг от друга технологических агрегатов, загружаемых заготовками в любой последовательности. Между участками предусмотрен межоперационный накопитель заделов, позволяющий им работать несинхронно.

Особенностью линии является также система базирования заготовок, позволяющая совместить обработку большого числа поверхностей и дающая возможность автоматизировать процесс смены обрабатываемых заготовок; обрабатываемые заготовки закрепляются в центрах приспособления — спутника.

Линия имеет общее сварное основание коробчатого сечения, на котором располагается в два ряда 20 технологических блоков: десять блоков для обработки заготовок с одной стороны и десять — с другой. В основании линии имеются полости для отстоя тяжелых

фракций продуктов эрозии. В каждом из отсеков установлен шнековый транспортер для перемещения осаждающихся продуктов эрозии в специальные карманы, из которых они переносятся в сборники скребковыми транспортерами.

Каждый технологический блок имеет гидрофицированную горизонтально расположенную инструментальную головку и базы для установки спутника с заготовкой.

Со стороны торцов обоих рядов технологических блоков расположены два транспортера спутников, являющиеся одновременно межоперационными накопителями. В нижней части одного из транспортеров вмонтировано периодически действующее моечное устройство струйного типа. Периодичность работы транспортеров — спутников и моечного устройства связана с общим циклом работы линии.

Над каждым рядом технологических блоков смонтированы направляющие манипуляторы — тележки с двумя подвижными загрузочными и разгрузочными захватами. Манипулятором спутник с заготовкой переносят с транспортера на рабочую позицию, затем с одной рабочей позиции на транспортер спутников.

Линия снабжена системой циркуляции и охлаждения рабочей жидкости и центробежными сепараторами, обеспечивающими ее регенерацию. Электрогидравлический привод подачи электрода-инструмента в линии обеспечивает поддержание необходимого межэлектродного промежутка и вибрацию электрода-инструмента, а также все наладочные движения электрода.

Каждый технологический блок имеет независимое автономное питание технологическим током и независимую от других схему регулирования межэлектродного промежутка.

Питание линии технологическим током осуществляется от 20 низкочастотных магнитонасыщенных генераторов ГМС-63, смонтированных в общем электрошкафе. Генератор позволяет осуществить независимое регулирование режимов в каждом блоке.

При выпуске небольших серий лопаток применение автоматических линий нецелесообразно, в этих случаях используются универсальные станки или специальный двухпозиционный станок модели МЭ-8. Станок предназначен для одновременной предварительной обработки спинки и корыта пера двух рабочих лопаток газовых турбин фасонным электродом из материала ЭЭГ и заменяет 12 операций механической обработки на токарных и фрезерных станках.

Размеры обрабатываемых заготовок лопаток: длина — от 100 до 250 мм, ширина от 40 до 100 мм. Станок имеет две головки, причем каждая несет два контура, подача электродов регулируется тиратронным регулятором.

С боковых сторон станины имеются направляющие, по которым перемещается каретка с инструментальными головками.

На каждой каретке установлены инструментальная головка с электровибраторами и стол, на котором крепится приспособление для установки лопаток.

Одновременная автоматическая подача электродов на деталь осуществляется с помощью клина, который, в свою очередь, перемещается с помощью регулируемого электродвигателя постоянного тока, редуктора, ходового винта и гайки. В станке предусмотрено программное регулирование режимов при помощи электроконтактных датчиков.

В качестве источника технологического тока применяется машинный генератор импульсов МГИ-3М. Вес станка 2300 кг.

Рассмотренные выше специальные станки выпускаются по заказам и серийно. Кроме того, в промышленности работает значительное количество станков, предназначенных для решения той или иной производственной задачи, актуальной только для данного предприятия. Большей частью такие станки изготавливаются заводами для собственных нужд путем модернизации серийного оборудования.

Как правило, эффективность специальных электроимпульсных станков значительно, иногда в несколько раз, превышает эффективность универсальных электроимпульсных станков. Наиболее перспективным направлением, обеспечивающим быстрое создание специальных станков, является развитие производства унифицированных узлов (станин, ванн, столов, шпиндельных головок, регуляторов, генераторов и др.) и сборка из них станков по принципу агрегатирования.

Электроды-инструменты являются одним из основных элементов, определяющих эффективность применения электроимпульсного метода обработки.

Затраты на электроды-инструменты составляют существенную долю от общих затрат на обработку. Поэтому при освоении процессов электроимпульсной обработки на электроды-инструменты обращено особое внимание. Электроды-инструменты должны обладать высокой эрозионной стойкостью при стабильной производительной работе по заданному материалу, быть технологичными и легко поддающимися обработке методами, соответствующими типу их производства, иметь базы для крепления на станке и быть выполненными с точностью, достаточной для достижения требуемой точности обработки.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ

Электроды-инструменты состоят из рабочей части с поверхностями, участвующими в формообразовании, и вспомогательных элементов, необходимых для фиксации положения и крепления электродов в станке и ограниченных сочетанием вспомогательных и базовых поверхностей.

Рабочая часть электрода-инструмента изготавливается из эрозионностойкого материала, вспомогательные элементы могут быть как из того же материала, что и рабочая часть, так и из других материалов, более дешевых или лучше отвечающих требованиям, предъявляемым к вспомогательным элементам электрода-инструмента.

В качестве материала для изготовления рабочей части электродов-инструментов применяются медь марок М1 и М2, первичный алюминий, алюминиевые сплавы марок Д1, АК7, АЛ3, АЛ5, медный сплав МЦ4, серый чугуны, вольфрам, специальный углеграфитированный материал марки ЭЭГ и некоторые другие материалы.

При выборе материала электрода-инструмента учитываются его стоимость и дефицитность, стабильность эрозионного процесса

при обработке заданного материала, возможность и стоимость изготовления электродов требуемой формы и размеров.

Наилучшие показатели в отношении стабильности процесса и возможности подвода мощности к месту обработки для всей группы обрабатываемых электроимпульсным методом металлов и сплавов показывают электроды-инструменты с рабочей частью, изготовленной из меди. Однако высокая стоимость этого материала, его дефицитность и сравнительно высокий износ (см. гл. III) ограничивают его применение.

Электроды-инструменты из меди применяются при обработке твердосплавных деталей, прошивании щелевидных отверстий и отверстий сравнительно малого диаметра, при чистовой обработке на повышенных частотах, а также в тех случаях, когда высокая стоимость самого материала электрода-инструмента компенсируется малой стоимостью его изготовления, как, например, при извлечении сломанных инструментов электродами в виде медной трубки. Медь ввиду ее стабильного качества используется также как эталонный материал при проверке и оценке оборудования.

Алюминий и алюминиевые сплавы в общем случае обработки близки по износу к меди, стабильность процесса при использовании алюминиевых электродов несколько ниже, чем медных, причем диапазон обрабатываемых материалов и режимов обработки уже по сравнению с медными электродами. На износ электродов-инструментов из алюминия и его сплавов оказывает большое влияние конфигурация рабочей части. На узких выступающих элементах рабочей части электрода износ резко возрастает. Большое влияние на износостойкость электродов-инструментов из алюминия и его сплавов оказывает плотность материала. Лучшие показатели по износостойкости получаются при уплотнении материала прокаткой, прессованием, ковкой.

Электроды-инструменты из алюминия и алюминиевых сплавов применяются при предварительной обработке полостей и отверстий без резко выделяющихся выступов в стальных деталях и деталях из жаропрочных сплавов.

Медный сплав МЦ-4 близок по своим свойствам эрозионной стойкости к меди. Он применяется при обработке твердосплавных деталей вследствие хорошей обрабатываемости резанием и улучшенных литейных свойств.

Серый чугун при обычных прошивочных работах позволяет получить стабильный эрозионный процесс в весьма узком диапазоне режимов, характеризующихся сравнительно небольшой мощностью. В этом диапазоне стабильных режимов износ чугунных электродов близок к износу медных электродов. Однако, если электродам-инструментам сообщить достаточно быстрые перемещения относительно обрабатываемой поверхности, то диапазон стабильных режимов расширяется. Вследствие этого серый чугун получил

применение при обработке вращающимся электродом-инструментом деталей из твердого сплава и некоторых других.

Вольфрам является материалом высокой стойкости, во много раз превышающей стойкость меди. Однако его большая стоимость наряду с плохой обрабатываемостью не позволяют широко применить этот материал для изготовления электродов-инструментов. Вольфрам используется в виде проволоки или ленты при прошивании небольших отверстий в сталях и жаропрочных сплавах или разрезке заготовок из этих материалов.

Наиболее износостойким является материал ЭЭГ, состоящий на 99,9% из графита и приготовленный по специальной технологии. Вследствие высоких показателей по стойкости при удовлетворительной стабильности процесса материал ЭЭГ стал основным при обработке заготовок из отбеленных чугунов, сталей и жаропрочных сплавов. При наличии дополнительного движения относительно заготовки электроды-инструменты из графитированного материала ЭЭГ хорошо работают по твердым сплавам в области повышенных мощностей. Это позволяет широко применить материал ЭЭГ при обработке вращающимся электродом-инструментом на операциях электроимпульсного шлифования.

Одним из преимуществ материала ЭЭГ является возможность получить на электроде-инструменте малые радиусы скругления углов, внешние углы могут быть получены с практически острой кромкой. Этот материал при достаточно больших сечениях прочен, обладает меньшим весом по сравнению с металлами, подвергается методам механической обработки. Основные технические данные материала ЭЭГ приведены ниже.

Основные технические данные материала ЭЭГ

Механическая прочность на сжатие в кг/см^2	600
Механическая прочность на изгиб (не менее) в кг/см^2	300
Удельное электросопротивление (не более) в $\text{ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$	20
Объемный вес (не менее) в г/см^3	1,65
Относительный износ при электроимпульсной обработке стали (длительность импульсов 600—1000 мк/сек) не более	0,3%

Износ графитированного материала зависит от его структуры и ориентации зерен, полученной при прессовании. Наименьший износ получают при направлении зерен перпендикулярно обрабатываемой поверхности.

По сравнению с металлическими электродами (медными, алюминиевыми), если не применять э. д. с. специальной формы, износ инструментов из графитированного материала уменьшается в десятки и сотни раз. По эрозионной стойкости 1 кг материала марки ЭЭГ при электроимпульсной обработке эквивалентен 50—100 кг алюминия или 150—300 кг меди. Одним электродом-инструментом из материала ЭЭГ вследствие высокой его стойкости можно обработать до нескольких десятков изделий.

Профиль формообразующей поверхности рабочей части элект-

трода-инструмента, изготавливаемый из описанных выше эрозионно-стойких материалов, выбирается таким образом, чтобы эта поверхность к концу процесса обработки описывала поверхности, отстоящие от заданной поверхности заготовки, учитывающей припуски под последующую обработку (если электроимпульсная обработка не является окончательной), на величину межэлектродных зазоров. Профиль формообразующей поверхности электрода-инструмента строится в соответствии со схемами формообразования, требованиями к точности и качеству обработанной поверхности, схемой образования межэлектродных зазоров.

Характерным, с точки зрения построения формообразующей части электрода-инструмента, является получение формы только при поступательном прямолинейном движении электрода-инструмента или поступательном круговом движении; обработка с вращением электрода инструмента и обрабатываемой детали; обработка по принципу обкатки электродом-инструментом обрабатываемой детали.

Процессы обработки электродом-инструментом в виде проволоки или ленты, а также электродом, совершающим винтовые движения, обладают теми же особенностями в отношении построения профиля электрода-инструмента, что и прошивание с прямолинейным поступательным движением электрода.

При простом прошивании с прямолинейным движением электрода-инструмента можно выделить две характерные группы электродов-инструментов: для обработки сквозных отверстий и для профилирования поверхностей объемного фасонного профиля.

Электроды-инструменты (рабочая часть), применяемые при обработке сквозных отверстий, выполняют в виде стержня, поперечные сечения которого представляют собой эквидистанты соответствующих сечений обрабатываемого отверстия. Расстояние между поверхностью электрода-инструмента и стенками отверстия

$$\Delta = Z_{\delta} + Z_0 + \delta, \quad (\text{VII. } 1)$$

где Z_{δ} — толщина слоя, который необходимо снять для удаления дефектного поверхностного слоя, оставшегося после электроимпульсной обработки;

Z_0 — толщина слоя металла, компенсирующего погрешности обработки;

δ — величина межэлектродного зазора.

Межэлектродный зазор может иметь различную величину для вертикальных и наклонных участков поверхности. В соответствии с этим профиль электрода должен строиться отдельно для вертикальных участков и участков, отклоняющихся от вертикали.

При разработке электродов-инструментов обычно пользуются сведениями по указанным составляющим коррекции профиля электрода, содержащимися в технологических руководствах к станкам. Представление о величине Z_{δ} и Z_0 можно составить по

данным, приведенным в гл. III. На рис. 85 и 86 приводятся данные по величине межэлектродных зазоров при обработке стальных и твердосплавных заготовок.

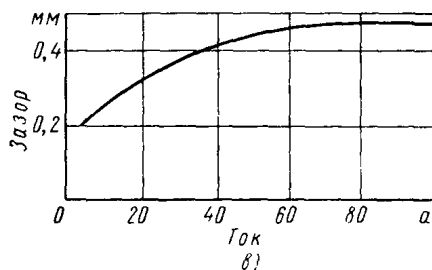
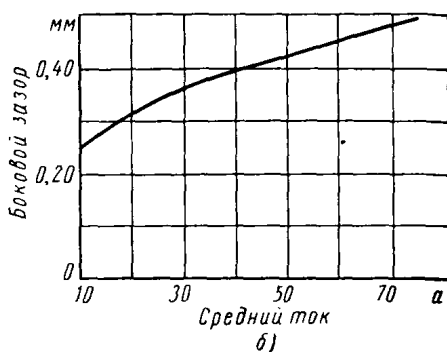
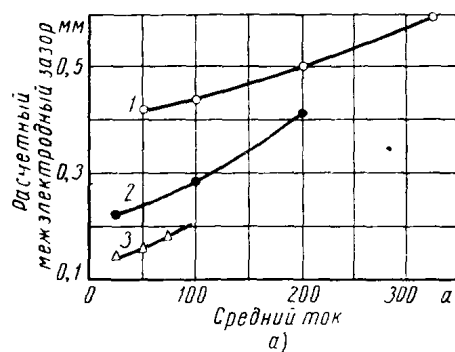


Рис. 85. Величина межэлектродного зазора в зависимости от электрического режима при обработке сталей:

а — наклонные и горизонтальные поверхности (1 — алюминиевые электроды; 2 — медные электроды; 3 — электроды из материала ЭЭГ); б — вертикальные поверхности, обработка медными электродами; в — вертикальные поверхности, обработка электродами из графитированного материала ЭЭГ

При использовании ультразвуковой доводки, используемой в ряде случаев при обработке твердосплавных заготовок, величину Z_0 с целью упрощения установки и выверки инструмента и заготовки, а также для снижения требований к точности изготовления электродов-инструментов несколько увеличивают — до 0,1—0,2 для чистовых и 0,2—0,3 мм для черновых электродов.

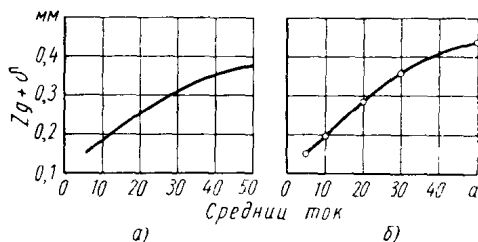


Рис. 86. Величина межэлектродного зазора и глубины дефектного слоя при обработке твердого сплава на частоте 400 имп/сек:

а — горизонтальные и наклонные поверхности; б — вертикальные поверхности

Длину рабочей части медных электродов-инструментов, профилирующих отверстия с вертикальными стенками в твердосплавных деталях, берут увеличенной по сравнению с длиной прошиваемого отверстия в 1,5—2,0 раза.

При обработке отверстий с вертикальными стенками в стальных деталях и жестком допуске на прямолинейность образующих отверстия применяют электроды-инструменты из графитированного

материала со ступенчатой рабочей частью, имеющей коррекцию Δ на длине 8—10 мм у конца, обращенного к обрабатываемому отверстию. Этот участок электрода-инструмента с коррекцией Δ и является действительно рабочим. Остальная часть электрода, входящая в процессе обработки в отверстие, делается уменьшенной в поперечном сечении относительно рабочего участка на 0,5—1,2 мм (на сторону).

Толщина стенок электродов-инструментов, предназначенных для трепанации, берется, если это возможно, не менее 0,7—1 мм. При меньшей толщине стенок резко (иногда в десятки раз) возрастает износ электрода. Рабочая часть электродов для трепанации, особенно при работе на форсированных режимах, имеющих целью максимальное повышение производительности, должна быть в 4—10 раз больше прошиваемого отверстия.

При обработке фасонных объемных поверхностей профиль рабочей части электрода-инструмента представляет собой зеркальное отображение поверхности с изменениями размеров в соответствии со спецификой эрозионного процесса. Контуры профиля электрода являются эквидистантами соответствующих контуров обрабатываемой поверхности, очерченных на расстоянии, определяемом формулой (VI. 1). Для прокачки рабочей жидкости в теле электрода-инструмента предусмотрены специальные отверстия, расположенные на расстоянии 20—40 мм одно от другого. Если имеются резко выделяющиеся участки поверхности, отверстия для прокачки рабочей жидкости размещают на этих участках. На больших по высоте выступах порядка 40 мм и более, ограниченных наклонными к вертикали поверхностями, отверстия для прокачки размещают на наклонных поверхностях. Диаметр отверстий для прокачки со стороны рабочей части электрода-инструмента принимается равным 1,2—2,5 мм. При большой глубине профиля отверстия для прокачки делают ступенчатыми: со стороны электрододержателя отверстия равны 5—8 мм. Длина отверстия, выходящего на рабочую поверхность, превышает величину износа на 3—4 мм.

Размеры формирующей поверхности электродов-инструментов, используемых при обработке с поступательными круговыми движениями, устанавливаются следующим образом. При заданной чертежами поверхности 1 (рис. 87) в первую очередь учитывается

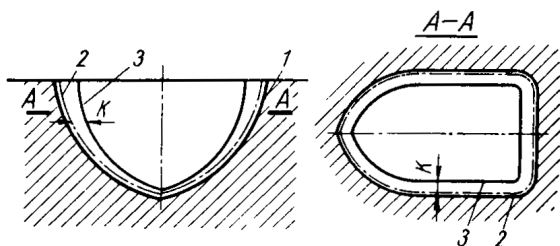


Рис. 87. Схема построения профиля рабочей поверхности электрода-инструмента при обработке с поступательными круговыми движениями:

R — сдвиг электрода-инструмента; 1 — обрабатываемый профиль; 2 — положение электрода к концу обработки; 3 — профиль электрода

расстояние, равное величине межэлектродного зазора на финишных режимах, сложенной с величиной припуска под последующую обработку. Затем вводится коррекция K на величину сдвига (амплитуды колебаний) электрода-инструмента в горизонтальной плоскости в процессе обработки (табл. 29). Для этого строятся горизонтальные сечения поверхности, ограничивающей конечные положения рабочей части электрода при обработке. На расстоянии, равном наибольшей высоте микронеровностей, сложенной с межэлектродным зазором на черновых режимах, проводятся эквидистанты контурных линий горизонтальных сечений. Эти эквидистанты являются контурными линиями горизонтальных сечений электрода-инструмента.

Т а б л и ц а 29

Величина сдвига электрода-инструмента в зависимости от электрического режима

Тип генератора	Электрический режим		Сдвиг в мм
	Частота в имп/сек	Ток в а	
МГИ-2М, МГИ-3М и МГИ-П9	400	20—30	0,2—0,25
ВГ-3В	8 000	III 20—25	0,15—0,2
	22 000	II 10—15	0,1
		III 15	0,1
		II 10 I 3—5	0,1 0,02
Примечание. Римскими цифрами обозначены режимы генератора ВГ-3В в соответствии с обозначениями на приборной панели.			

При допускаемых отклонениях от заданных чертежом размеров свыше 0,2—0,3 мм профилирование рабочей части электрода-инструмента может быть упрощено. Размеры формообразующей поверхности электрода-инструмента в этом случае уменьшают по нормали к обрабатываемой поверхности на величину, равную сумме припуска под последующую обработку межэлектродного зазора на черновых режимах и наибольшей высоты микронеровностей, остающихся после черновой обработки.

В рабочей части могут быть сделаны для прокачки рабочей жидкости не только описанные выше круглые отверстия, но и отверстия в виде щелей. Щелевидные отверстия при круговых движениях электрода-инструмента не оставляют на поверхности заготовки заметных трудноудаляемых выступов.

Вращающиеся электроды-инструменты применяются на операции разрезки и так называемого электроимпульсного шлифова-

ния — плоского, круглого или профильного. При разрезке (обычно дисками из меди) толщина диска исходя из наилучшего сочетания износа и ширины реза принимается равной 1—2 мм, диаметр — максимально возможный.

Электроды-инструменты для круглого и плоского шлифования выполняются с рабочей частью в виде диска или цилиндра, при установлении размеров которых учитываются прочность и жесткость электрода, размеры заготовки, износ и некоторые другие конструктивные соображения.

Для профильного шлифования применяют электроды-инструменты, работающие периферией. Эти электроды в сечении вдоль оси по периферии имеют профиль, очерченный эквидистантой к контуру заданного профиля на расстоянии, равном сумме межэлектродного зазора и припуска под последующую обработку.

Элементы для крепления электрода-инструмента в станке (приспособлении) с базовыми поверхностями выполняются в соответствии с методами их крепления и базирования и конструкцией применяемых приспособлений.

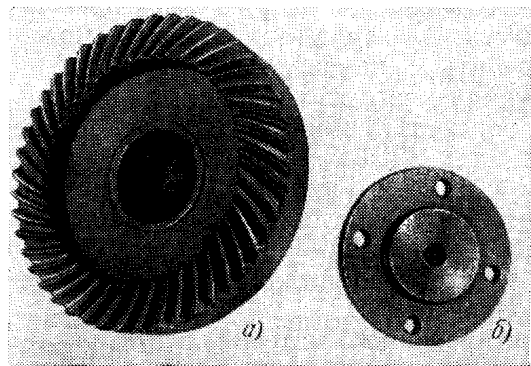


Рис. 89. Электрод-инструмент с прикрепляемым к рабочей части хвостовиком:

а — электрод; б — хвостовик

применяемые при прошивании фасонных поверхностей в случае небольшой повторяемости обрабатываемых деталей могут снабжаться хвостовиками, ввернутыми в тело электрода-инструмента или прикрепляемыми с помощью фланца (рис. 89) как к плоскому торцу, так и к имеющемуся центрирующему цилиндрическому выступу. На хвостовиках с фланцем устанавливается штуцер для присоединения шланга, через который подводится к электроду-инструменту прокачиваемая через него рабочая жидкость. Для

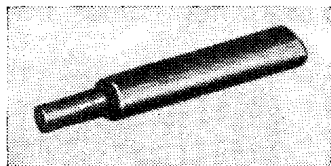


Рис. 88. Электрод-инструмент с хвостовиком, изготовленным за одно целое с рабочей частью

Легкие электроды-инструменты стержневого типа для прошивочных работ и работ с винтовым движением при достаточных поперечных сечениях снабжаются хвостовиками, изготовленными за одно целое с рабочей частью (рис. 88).

Электроды-инструменты с сильно развитой рабочей частью,

выверки положения электроды-инструменты снабжаются контрольным углом или разметкой, нанесенной на плоские контрольные площадки. Хвостовики электродов-инструментов обычно унифицируются и представляют собой сменные детали многократного использования с различными электродами.

Электроды-инструменты для обработки фасонных поверхностей при использовании специальных приспособлений (см. гл. VII) базируются также непосредственно при помощи контрольного угла и имеют специальные площадки под зажимы крепежных устройств. При большой повторяемости обрабатываемых деталей базы для фиксации положения электрода-инструмента часто выполняются в виде двух цилиндрических отверстий под контрольные штифты.

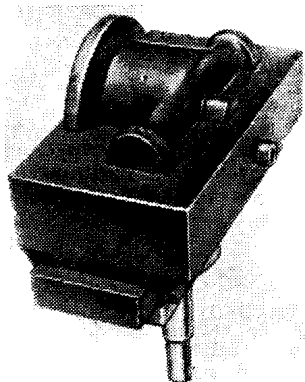


Рис. 90. Электрод-инструмент с рабочей графитированной частью, прикрепляемой к стальному основанию с помощью разжимного ласточкина хвоста

Во вращающихся электродах-инструментах предусматриваются базы для крепления на оправках подобно креплению шлифовальных кругов. При разовом или редком и нерегулярном использовании вращающегося электрода-инструмента его крепление можно упростить. Небольшие цилиндрические вращающиеся электроды-инструменты можно крепить с помощью достаточно точно выполненного хвостовика.

Электроды-инструменты, используемые при обработке обкаткой, базируются с помощью цилиндрических поверхностей или плоских базовых площадок

в зависимости от их размеров и конструкции.

Приставные хвостовики электродов-инструментов обычно изготавливаются из конструкционной стали.

При использовании графитированного материала ЭЭГ для повышения надежности крепления электрода-инструмента и повышения точности его установки он может выполняться составным: рабочая часть электрода изготавливается из графитированного материала, а верхнее основание с базами для крепления в станке или электрододержателе — из стали. Профилирующая рабочая часть наклеивается на стальное основание эпоксидным клеем и дополнительно привертывается к основанию двумя-тремя винтами в зависимости от размеров электрода. Такая конструкция особенно удобна при серийном производстве, когда требуется многократное восстановление электродов-инструментов. Помимо крепления клеем, получило применение и чисто механическое крепление графитированной части к стальному основанию. На рис. 90 показан один из электродов, у которого графитированная рабочая часть

крепится при помощи разжимного ласточкина хвоста. Небольшие графитированные элементы могут просто вставляться в пазы и держаться в них силами упругости боковых стенок.

В практике электроимпульсной обработки получили применение электроды-инструменты с наборами рабочих элементов, например при обработке ряда небольших отверстий. Такие электроды выполняются в виде щетки, составленной из отдельных стержней, рабочие концы которых залиты сплавом с пониженной температурой плавления, например припоями ПОС-40, ПОС-60 и др.

При многоконтурной обработке используются электроды-инструменты, состоящие из рабочих, изолированных друг от друга элементов, каждый из которых присоединяется к отдельному контуру. На рис. 91 показан электрод-инструмент для обработки решетки. Он состоит из шести рабочих секций из графитированного материала ЭЭГ, приклеенных к текстолитовому диску.

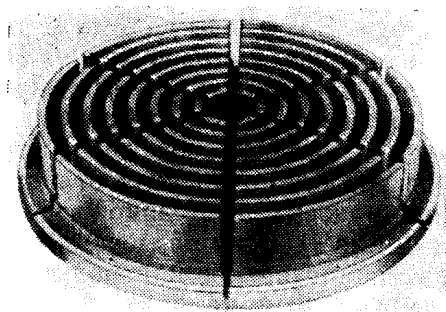


Рис. 91. Электрод-инструмент для многоконтурной обработки решетки

В тех случаях, когда многоконтурный электрод используется для обработки одной полости или отверстия, его делают секционным из элементов, расположенных один от другого на расстоянии, превышающем пробивной промежуток и равном 1,5—2 мм.

Для устранения замыкания промежутка продуктами эрозии между рабочими элементами электрода в промежутки-щели прокачивается рабочая жидкость. Такие электроды применяются при поступательном круговом движении, устраняющем в местах разделов рабочих элементов появление перемычек-ребер на обрабатываемой детали.

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ

Металлические электроды-инструменты можно изготавливать следующими методами: слесарно-механической обработкой; литьем в земляные формы; литьем в кокиль или по выплавляемым моделям; литьем с последующей чеканкой; чеканкой; жидкой штамповкой; ковкой в штампе и чеканкой; прессованием через матрицы и обработкой на вальцах.

Медные электроды-инструменты в зависимости от сложности их фасонных частей и серийности изготавливаются слесарно-механической обработкой, чеканкой, жидкой штамповкой, чеканкой

и прессованием через матрицы. Обычно при изготовлении электродов из меди избегают литья, так как оно требует соблюдения специальных условий для обеспечения высокого качества материала. Отливка меди часто ведет к такому ухудшению стабильности процесса, которое совершенно сводит на нет те преимущества, которые дает медь как материал электродов-инструментов для электроимпульсных станков.

При изготовлении алюминиевых электродов и электродов из алюминиевых сплавов могут использоваться все перечисленные методы. Электроды из этих материалов изготавливаются с широким применением методов литья. Получила большое применение отливка в земляные формы. Она используется для получения при серийном производстве грубых электродов-инструментов, используемых на черновой обработке. Фасонная поверхность у этих электродов, полученная отливкой, подвергается лишь небольшой и нетрудоемкой слесарной доработке. Такие электроды с уменьшенными на 1—3 мм размерами против заданных размеров обрабатываемой поверхности используются в сочетании с графитированными точными калибрующими электродами. Применение дешевых алюминиевых электродов в данном случае позволяет повысить на грубых режимах подводимую мощность и этим снизить трудоемкость операции (см. гл. III) и ее стоимость.

Электроды-инструменты из медного сплава МЦ-4 изготавливают литьем и с применением слесарно-механических методов обработки.

Вольфрамовые электроды-инструменты или элементы из вольфрама, если такие входят в электроды, особой обработке не подвергаются. Вольфрамовая заготовка в виде готовой проволоки или ленты лишь разрезается на элементы заданной длины. Иногда заготовка подвергается правке, которая осуществляется с подогревом путем пропускания тока через заготовку.

Электроды-инструменты из графитированного материала ЭЭГ изготавливаются с применением методов слесарно-механической обработки. Заготовки из этого материала выпускаются в виде бруска. Если размеры бруска недостаточны для изготовления из него электрода-инструмента требуемых размеров, электрод-инструмент изготавливают из двух или нескольких частей, склеенных эпоксидным клеем.

Графитированный материал хорошо обрабатывается на металлорежущих станках с применением высоких скоростей резания (200—700 м/мин) и подачи до 500—4000 мм/мин. Верхние пределы подачи используют для черновой обработки, так как на выходе инструмента возможно при таких подачах скалывание материала. Износ режущего инструмента при обработке графитированного материала в основном обусловлен абразивным действием. Чтобы снизить износ, задний угол α берется увеличенным до 10—30° и угол заострения β уменьшается до 60—70°. Величина переднего угла γ выбирается равной 6—10°.

Графитированные материалы могут подвергаться всем видам механической размерной обработки: фрезерованию, точению, сверлению, протягиванию и пр. Режимы резания для некоторых видов механической обработки приведены в табл. 30.

Т а б л и ц а 30

Режимы резания при обработке графитированного материала

Вид обработки	Скорость резания в м/мин	Подача в мм/мин	Глубина резания в мм	Ориенти- ровочная производи- тельность в см ³ /мин
Фрезерование: черновое чистовое на копировальных стан- ках	250 425 —	1000—2100 600—1200 —	5—6 2—3 —	1000 200 30
Точение: черновое чистовое	500 420	2000—4000 1000—2000	3—5 1—2	2000
Сверление сверлами: спиральными полыми	30—60 100—150	200—700 600—1000	3—10 8—10	50 800
Разрезание	1800	700—1000	—	300—450
Протягивание	3—8	—	0,2	56

Сложные фасонные поверхности у электродов-инструментов из графитированного материала могут быть обработаны на копировально-фрезерных станках и слесарным способом. При обработке заготовок из этого материала можно использовать станки с механическим управлением прямого действия упрощенной конструкции, например камнерезные копировальные станки для обработки фасонных профилей и др.

Слесарная обработка производится напильниками, шаберами, абразивной шкуркой и полировочными пастами.

Для уменьшения размеров на одинаковую величину по нормали к обрабатываемой поверхности пользуются наколкой. Игло-наколкой, у которой длина колющего конца ограничена регулируемой опорой в виде подвижного диска, накалывают обрабатываемую поверхность. Затем следы наколов удаляют. Этот прием применяется при использовании для изготовления электрода-инструмента шаблонов изделия, при необходимости перехода от одних размеров электрода к другим и в некоторых других случаях.

Металлорежущие станки, используемые для обработки графитированного материала, оборудуются вентиляционными устройствами. Для уменьшения распыливания материала заготовки могут подвергаться вымачиванию в маслах или керосине. После вымачивания стружка при обработке сходит в виде вязкой массы.

Внедрение в промышленность электроимпульсной обработки и нового эрозионностойкого графитированного материала марки ЭЭГ потребовало разработки новых высокопроизводительных способов изготовления фасонных электродов-инструментов.

Единичное изготовление электродов из ЭЭГ не вызывает особых затруднений вследствие хорошей механической обрабатываемости материала и осуществляется, по сравнению с металлическими электродами, более производительнее. Однако при изготовлении большого количества электродов-инструментов сложной формы громоздкость слесарно-механической обработки (в частности, лекальных работ высокой квалификации) резко снижает общую эффективность электроимпульсной обработки. Поэтому в ЭНИМСе был разработан новый высокопроизводительный способ изготовления фасонных изделий, названный «вихревым копированием». Этот способ позволяет повысить производительность изготовления фасонных электродов-инструментов из графитированного материала в 10—25 раз при точности обработки до 0,05—0,1 мм и чистоте поверхности 3—6-го классов.

В общем случае по характеру обрабатываемых деталей, методу формирования и видам применяемого движения вихревое копирование может быть определено как вибрационный способ получения фасонных изделий со снятием стружки, осуществляемый путем копирования на заготовке формы инструмента.

Рабочая поверхность инструмента снабжается режущими элементами в виде насечки, абразива и т. п. и выполняется с коррекцией размеров по отношению к профилю детали на величину амплитуды колебаний.

Обработка вихревым копированием осуществляется при поступательном движении с круговой траекторией, когда все точки инструмента или детали описывают окружности одинакового радиуса и любая проходящая через них прямая остается во время движения параллельной самой себе.

Круговое движение получают преобразованием вращательного движения при помощи простых механизмов. Кинематическая схема одного из таких механизмов приведена на рис. 92. При вращении валика 1, получающего движение от двигателя 2 через коробку скоростей 3, режущий инструмент 4 и планшайба 5 в результате совместного действия эксцентрика 6 и ограничителя поворота 7 получают поступательное круговое движение с радиусом, равным эксцентриситету.

Образование профиля на изделии (в нашем случае — на электроде-инструменте из графитированного материала) в сечениях

его плоскостями кругового движения¹ происходит эквидистантно к профилю режущего инструмента (рис. 93), который поэтому должен выполняться с коррекцией размеров. В частности, размеры

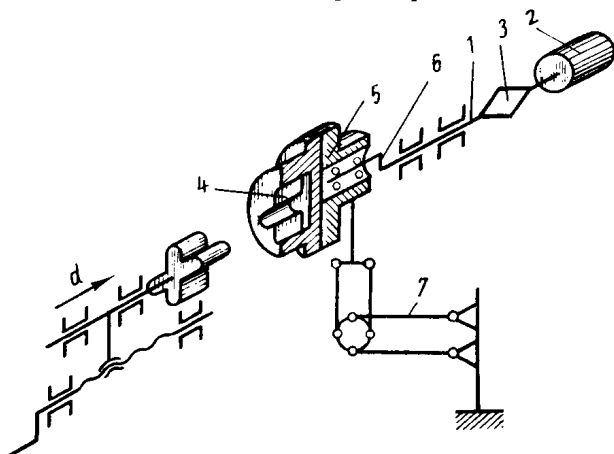


Рис. 92. Схема механизма для получения поступательных круговых движений

и радиусы кривизны участков электрода, охватываемых инструментом, получаются меньше, а охватывающих — больше, чем размеры и радиусы кривизны у инструмента соответственно на удвоенную или одинарную величину эксцентриситета.

При обработке вихревым копированием поверхностей, не совпадающих с плоскостями движения, резание происходит поочередно всеми элементами инструмента в моменты их соприкосновения с заготовкой. В течение остального времени между заготовкой и инструментом имеется зазор, через который может удаляться стружка. При обработке поверхностей, совпадающих с плоскостями движения, инструмент все время соприкасается с заготовкой.

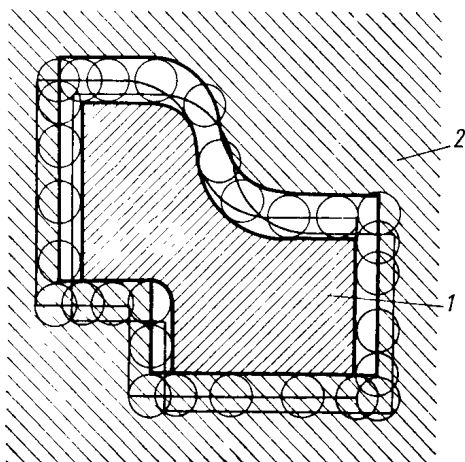


Рис. 93. Схема формообразования при обработке вихревым копированием:
1 — инструмент; 2 — заготовка

Наряду с круговым движением резания при вихревом копировании должно быть движение подачи, которое может осуществ-

¹ Плоскостями движения условно названы параллельные плоскости, в которых лежат траектории движущихся точек.

вляться перемещением заготовки относительно инструмента или изменением величины эксцентриситета.

На основе метода вихревого копирования разработан технологический процесс серийного изготовления электродов-инструментов из графитированного материала. Сущность этого процесса заключается в двукратном применении способа вихревого копирования: при электроэрозионном изготовлении режущих инструментов и механической обработке графитированных материалов. Указанное сочетание механической и электроэрозионной разновидностей способа вихревого копирования является весьма эффективным. Оно позволяет легко переносить любую форму электродов, предназначенных для электроэрозионной

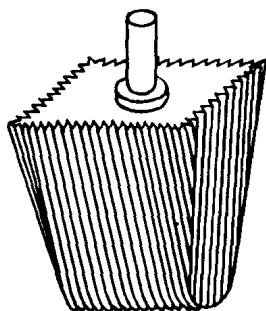


Рис. 94. Электрод-инструмент с насечкой на торцовых поверхностях

Первый проход: образование рифлений на инструменте

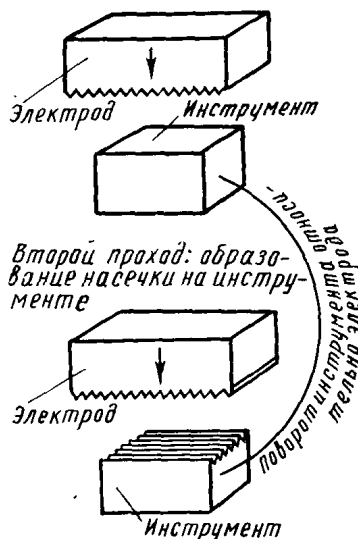


Рис. 95. Схема нанесения насечки на электрод-инструмент

обработки, на инструмент для вихревого копирования (производя необходимую коррекцию его профиля путем использования при электроэрозионной обработке движения вихревого копирования), и наоборот, форму инструмента — на электроды из графитированного материала. Последнее достигается вследствие того, что неровности и острые кромки, образующиеся на эрозированных поверхностях, обладают режущими свойствами. На инструментах, предназначенных для грубой обработки, может выполняться специальная насечка путем копирования рифлений, выполняемых на электродах для электроэрозионной обработки (рис. 94).

Насечка на рабочих поверхностях инструментов в несколько раз улучшает их режущие свойства. В первую очередь ее следует вводить на плоских торцах, где она может изготавливаться рифленным электродом за два прохода (рис. 95). После первого прохода на инструменте образуются рифления. Далее следует поворот ин-

струмента относительно электрода и повторное прошивание, в результате которого на месте рифлений образуется насечка.

Инструмент должен иметь отверстия, через которые продувается или отсасывается воздух, обеспечивающий отвод графитированной стружки из зоны обработки, что резко увеличивает производительность вихревого копирования.

Технологический процесс при серийном изготовлении электродов-инструментов вихревым копированием состоит из трех этапов.

1. Изготовление обычными слесарно-механическими способами комплекта мастер-электродов из графитированного материала, предназначенных для электроэрозионной обработки режущих инструментов. Количество электродов в комплекте должно быть равно необходимому числу проходов.

Входящие в комплект мастер-электроды, используемые на предварительных черновых проходах, могут быть выполнены менее точно, чем используемый на последнем чистовом проходе калибровочный электрод, который доводится с точностью в несколько сотых долей миллиметра.

Когда изготавливается небольшое число режущих инструментов для вихревого копирования, можно обойтись одним мастер-электродом, подвергая его правке после каждого прохода.

2. Электроэрозионное изготовление фасонных режущих инструментов. Необходимая при этом коррекция их формы и размеров по отношению к форме и размерам изготовленных методом вихревого копирования изделий (в данном случае электродов-инструментов из графитированного материала) может осуществляться двумя путями: применением корригированных мастер-электродов, что связано с пересчетом размеров и использованием специальной оснастки при их изготовлении, и перемещением некорригированных мастер-электродов в процессе электроэрозионного изготовления режущего инструмента, т. е. использованием при электроэрозионной обработке движений вихревого копирования.

Корригирование режущих инструментов вторым путем, т. е. перемещением некорригированных электродов при электроэрозионной обработке, позволяет использовать в качестве мастер-электродов электроды-инструменты из графитированного материала, изготавливаемые вихревым копированием. Таким образом, необходимо специально изготовить только первый комплект мастер-электродов, а дальнейшее их воспроизводство происходит как бы само собой. При использовании рабочих электродов требуется выполнить условие:

$$e_m = e_{\varepsilon p} + \delta_6, \quad (\text{VII. } 2)$$

где e_m — эксцентриситет при механическом изготовлении электродов-инструментов;

$e_{\varepsilon p}$ — эксцентриситет при электроэрозионном изготовлении режущего инструмента;

δ_6 — величина зазора при электроэрозионной обработке.

Глубина прошивания при электроэрозионной обработке инструмента должна быть меньше номинальной высоты рабочих электродов на величину торцового зазора.

3. Заключительный этап — изготовление вихревым копированием рабочих электродов-инструментов для электроимпульсной обработки.

В случае необходимости электроды-инструменты, изготовленные вихревым копированием, так же, как и после копировально-фрезерной обработки, могут доводиться вручную для получения высоких классов чистоты и точности. Их контроль может осуществляться шаблонами или объемными эталонными формами по краске.

Грубые резак — инструменты для вихрекопировальной обработки, обрабатываемые на низкой и средней частоте, изготавливаются из конструкционных незакаленных сталей, так как поверхностные слои получают в процессе такой обработки закалку до *HRC* 60—62.

Резаки для чистовой вихрекопировальной обработки, обрабатываемые с целью получения достаточно малых поверхностных неровностей на повышенных частотах порядка 8000 *имп/сек* и выше, делаются из закаленных инструментальных сталей с большой глубиной прокаливания из-за недостаточного упрочнения рабочей поверхности резака в процессе электроимпульсной обработки.

В тех случаях, когда электроды-инструменты проходят восстановление после работы на электроимпульсных станках, электроды предварительно сушат, так как после пропитки рабочей жидкостью в ванне электроимпульсного станка образующаяся в процессе обработки на вихрекопировальном станке вязкая стружка забивает промежутки между режущими элементами резака и ухудшает резание.

Электроды-инструменты, изготовленные из одного куска графитированного материала, сушатся в шкафах при температуре 300—400° С. Клееные эпоксидным клеем электроды сушатся при температуре 130—140° С. Продолжительность сушки зависит от размеров электродов-инструментов и температуры в сушильной камере и составляет от нескольких часов до суток и более. Например, электрод-инструмент размерами 100×100×200 *мм* сушится при температуре 400° С в течение 5—6 ч. Во время сушки рабочая жидкость, выделяющаяся из электрода-инструмента, увлажняет его поверхность. Поэтому момент окончания сушки может быть установлен путем наблюдения за поверхностью электрода-инструмента. Высыхание поверхности свидетельствует об удалении влаги из электрода-инструмента.

Вихрекопировальная обработка может производиться на металлорежущих станках, снабженных специальным устройством, или на специальных вихрекопировальных станках.

На рис. 96 показан вихрекопировальный станок модели МА-459 для обработки фасонных графитированных электродов.

Станок позволяет обрабатывать фасонные графитированные электроды-инструменты размерами до $200 \times 200 \times 200$ мм при производительности до $100 \text{ см}^3/\text{мин}$.

На рис. 97 показаны некоторые из графитированных электродов-инструментов, обработанных на станке МА-459. Ниже дана краткая техническая характеристика станка МА-459.

Краткая техническая характеристика станка модели МА-459

Наибольшие размеры обрабатываемых графитированных электродов в мм	200×200×200
Диаметр рабочей планшайбы в мм	350
Наименьшее расстояние от торца планшайбы вихрекопиральной головки до торца планшайбы задней бабки в мм	210
Поворот планшайбы задней бабки в град	360
Максимальное перемещение задней бабки с планшайбой в мм	490
Частота круговых колебательных движений в цикл/мин:	
наименьшая	476
наибольшая	1440
Количество ступеней регулирования частоты круговых колебательных движений	4
Амплитуда круговых колебательных движений в мм	0—5
Производительность в $\text{см}^3/\text{мин}$	100
Мощность в квт	9
Габаритные размеры (длина × ширина × высота) в мм	2485×1250×1750
Вес в кг	3500

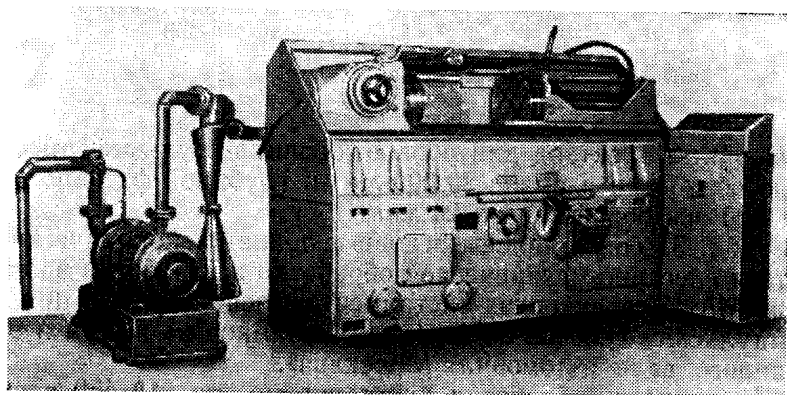


Рис. 96. Вихрекопиральный станок модели МА-459

Применение станка модели МА-459 в десятки раз сокращает трудоемкость процесса изготовления фасонных графитированных электродов. При серийном производстве электродов-инструментов этот метод позволяет в 8—20 раз сократить затраты на изготовле-

ние сложных фасонных электродов-инструментов из графитированного материала.

Некоторое представление об эффективности станка дают следующие примеры. Фасонная часть электрода-инструмента для обработки штампа шатуна автомашины «Москвич» обработана за 15 мин вместо 4—5 ч, затрачиваемых при применении обычных методов слесарно-механической обработки.



Рис. 97. Электроды-инструменты, изготовленные на вихрекопировальном станке модели МА-459

Фасонный электрод для обработки шинных прессформ с площадью обработки в плане $20\,000\text{ мм}^2$ и глубиной фасонного профиля 200 мм обработан за 24 мин.

В табл. 31 сопоставлены основные технико-экономические показатели слесарно-механической обработки и обработки на станке модели МА-459 электродов-инструментов, используемых при электроимпульсном способе изготовления штампов на шатун и вилку карданного вала автомобиля «Москвич».

Эффективность обработки на станке модели МА-459 в значительной степени зависит от серийности изготовления электродов-инструментов. В общем случае применение станка МА-459 оказывается целесообразным при серийности изготовления электродов-инструментов, начиная с 3—5 шт. и выше.

Экономия на 1 ч работы станка при серийном изготовлении графитированных электродов достигает 3—5 руб., чему соответствует годовая экономия 12,0—20,0 тыс. руб.

Эффективность обработки фасонных электродов-инструментов из материала ЭГГ на станке МА-459

Показатель	Электрод на штамп шатуна		Электрод на штамп вилки	
	Слесарно-механическим методом	Обработка на станке МА-459	Слесарно-механическим методом	Обработка на станке МА-459
Трудоемкость в мин (штучное время)	445	27	720	33
Стоимость обработки в руб.	3,5	0,27 (без учета стоимости инструмента)	5,7	0,33 (без учета стоимости инструмента)
Стоимость инструмента для станка МА-459 в руб.	—	14,3	—	13,3
Полная стоимость обработки электродов-инструментов при изготовлении партии электродов (12 шт.), расходуемых на выполнение годовых программ, в руб.	3,5	2	5,7	3,3
Экономия на один электрод-инструмент в руб.	—	1,5	—	2,4

Область рационального применения электроимпульсной обработки ограничена преимущественно теми технологическими процессами, которые обеспечивают по сравнению с механической обработкой более высокую производительность и низкую себестоимость.

При сравнении конкурирующих вариантов обработки производительность и себестоимость являются важнейшими критериями, однако не должны быть упущены и такие характерные для электроимпульсной обработки факторы, как улучшение условий труда, уменьшение сроков технологической подготовки, сокращение технологического цикла, устранение ручных операций и операций, требующих высокой квалификации станочников, а также более широкие возможности для автоматизации этих работ.

Наиболее эффективно применение электроимпульсной обработки на копировально-прошивочных операциях. Хотя в отдельных случаях электроимпульсную обработку применяют для «разрезания», «шлифования» и других операций, соответствующих по назначению или по кинематике (но не по сущности процесса) операциям механической обработки, однако копировально-прошивочные работы составляют абсолютное большинство и именно им уделено основное внимание в настоящей главе.

ВЫБОР РЕЖИМА ПРИ ЧЕРНОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Требуемая точность и чистота обработки достигаются на чистовых режимах. Что же касается черновых режимов, то они применяются для удаления припуска с максимально возможной скоростью.

Скорость съема металла при электроимпульсной обработке зависит главным образом от режима по току. Регулирование величины тока в электроимпульсных станках осуществляется в зависимости от применяемого типа генератора изменением напряжения холостого хода; изменением токоограничивающего сопротивления — активного или реактивного; изменением обоих параметров одновременно.

На черновых режимах величина рабочего тока должна быть повышена до допустимых пределов. При достаточно мощном источнике питания величину тока приходится ограничивать в первую очередь в соответствии с размерами обрабатываемой поверхности: повышение силы тока сверх оптимальной для данной площади ведет к оплавлению детали, быстрому износу электрода и потере стабильности процесса.

Величину I_{opt} оптимального тока можно определять по графику на рис. 98, где представлена полученная при обработке плоских поверхностей электрическая зависимость ток—площадь

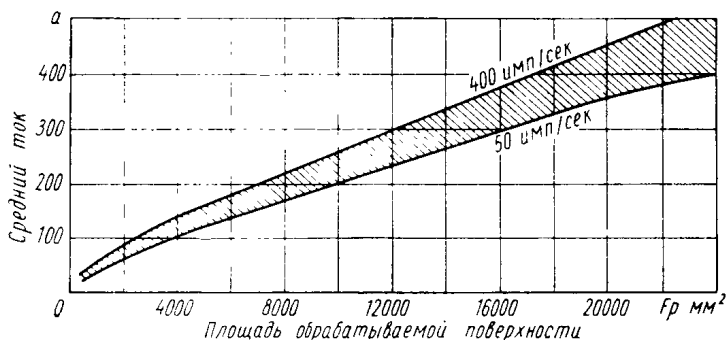


Рис. 98. Зависимость режима обработки по току от площади обрабатываемой поверхности

(анод—медь). Заштрихованная область на графике соответствует значениям тока, обеспечивающим получение максимальной производительности при данной величине поверхности. Режим по току следует выбирать, не выходя за пределы этой области. При меньших значениях тока возможности обработки будут использоваться неполностью. Однако при выходе за верхнюю границу устойчивость процесса нарушается и производительность падает; при значительном превышении оптимального значения тока проведение процесса становится вообще невозможным.

Рассмотренная зависимость построена по экспериментальным данным для случая обработки плоскости. При обработке фасонной поверхности также можно пользоваться этой зависимостью, но в этом случае отложенная по оси абсцисс расчетная величина F_p обрабатываемой сложной поверхности определяется особо.

На практике величину F_p определяют с достаточной для производственных нужд точностью непосредственным измерением соответствующих сечений и проекций на чертеже или в готовой детали. Три принципиально различных варианта определения F_p , которые могут встретиться при обработке фасонной поверхности, изображены на рис. 99. В двух наиболее часто встречающихся случаях величина F_p определяется как площадь проекции обрабатываемой поверхности на плоскость, перпендикулярную к на-

правлению подачи; такой способ справедлив, когда обрабатываемая поверхность имеет участок, перпендикулярный к подаче (рис. 99, а), или же перпендикулярно к направлению подачи можно провести плоскость, касательную к обрабатываемой поверхности (рис. 99, б). В обоих этих случаях угол $\psi_{x \min}$ между направлением подачи и нормалью к обрабатываемой поверхности в точке, где этот угол минимален, равен нулю.

В тех же сравнительно редких случаях, когда обрабатываемая поверхность не имеет такого участка и $\psi_{x \min} > 0$ (рис. 99, в),

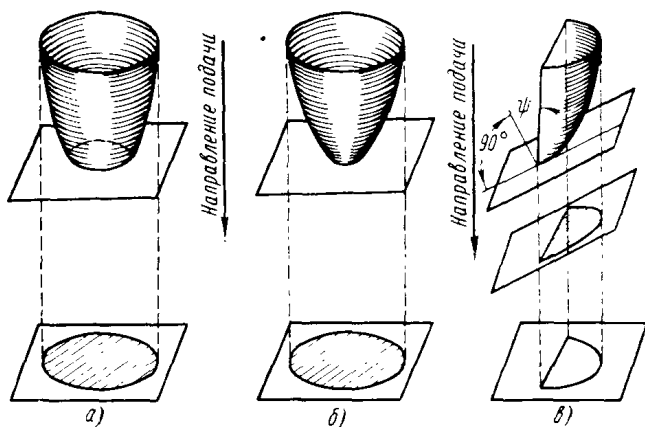


Рис. 99. Схема определения расчетной величины F_p площади обрабатываемой поверхности

величина F_p равна площади участка плоскости, касательной к обрабатываемой поверхности в точке, где угол ψ_x минимален и ограничен цилиндрической поверхностью, образующая которой параллельна направлению подачи, а направляющей служит граница проекции обрабатываемой поверхности на плоскость, перпендикулярную к подаче.

Таким образом, только в том случае, когда обрабатывается плоскость, величина F_p совпадает с истинной величиной площади обрабатываемого участка плоскости. Во всех остальных случаях величина F_p меньше полной площади обрабатываемой поверхности.

Под обрабатываемой поверхностью понимается только та поверхность, которая подвергается обработке в момент рассмотрения. При обработке сложной полости вначале вступает в работу маленький участок электрода, и величина F_p мала; по мере углубления электрода в деталь F_p обычно растет, постепенно достигая максимума. Поэтому с изменением F_p постепенно должна изменяться и величина рабочего тока.

Помимо рассмотренного влияния на устойчивость процесса и режим обработки таких взаимосвязанных факторов, как величина площади обрабатываемой поверхности и условия эвакуации

продуктов эрозии, на выбор оптимальной величины тока во многом влияет материал электродов, а возможности минимальной интенсификации режимов по току зависят от правильного выбора режима по напряжению.

Характер электроэрозионного процесса, его устойчивость (см. гл. II) зависят также от того, какой материал применен для электрода. Наибольший диапазон режимов свойственен медным электродам, для алюминия и ЭЭГ он уже.

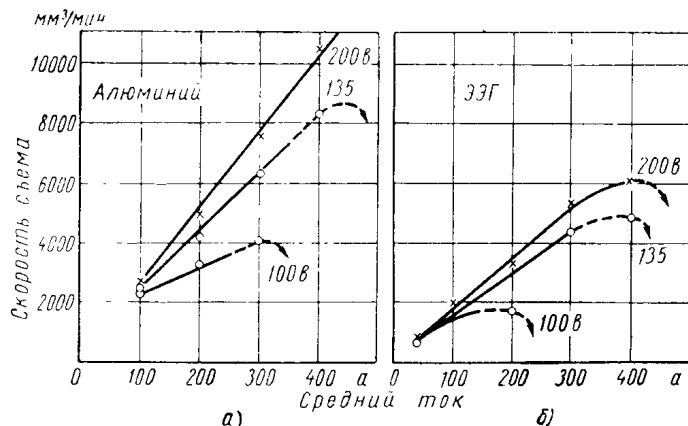


Рис. 100. Влияние напряжения холостого хода на скорость съема (катод — сталь 45, частота 100 имп/сек):

a — электрод из алюминия; b — электрод из ЭЭГ

Так, если при работе на частоте 400 имп/сек (при амплитудном напряжении в импульсе 100 в) снижение стабильности процесса происходит для медных электродов на токах 400—450 а, то для алюминиевых электродов наибольшая величина тока, при которой еще возможна устойчивая работа, равняется 150—200 а, а для ЭЭГ — всего лишь 100 а. При работе на частотах 100 и 50 имп/сек (и том же напряжении 100 в) устойчивая работа с медными электродами возможна до силы тока 600—800 а, с алюминиевыми — до 250—300 а, а с электродами из ЭЭГ — до 150 а.

Указанные значения предельных по току режимов можно существенно поднять, увеличивая амплитуду напряжения холостого хода генератора; это связано со стабилизирующим влиянием роста зазора. Повышение устойчивости процесса, помимо изменений в характере процесса, наблюдаемого визуально, по приборам, на экране осциллографа и тому подобным, проявляется и в изменении достигаемых скоростей съема. Такой характер влияния напряжения на скорость съема путем повышения устойчивости электроэрозионного процесса отчетливо проявляется на графиках рис. 100, причем тем в большей степени, чем больше режим по току.

Как видно из приведенных данных, с увеличением напряжения происходит непрерывное увеличение скорости съема. В случае, когда процесс протекает стабильно, зависимость скорости съема от напряжения при постоянном среднем токе очень мала.

Таким образом, при необходимости максимального увеличения режима следует повышать силу тока и напряжение холостого хода генератора. Но поскольку падение напряжения на промежутке почти не изменяется, увеличение напряжения на клеммах генератора влечет за собой рост потерь в электрическом контуре и соответствующее снижение к. п. д. станка в целом. Поэтому напряжение холостого хода генератора должно выбираться по минимально допустимому напряжению, обеспечивающему устойчивую работу на предельном для соответствующего станка режиме.

СВЯЗЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА И ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ С РЕЖИМОМ ОБРАБОТКИ

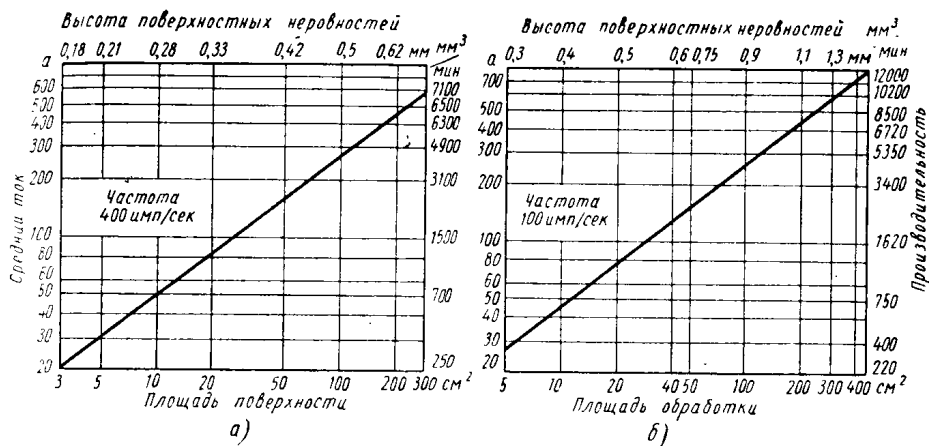
Применяемые режимы электроимпульсной обработки можно подразделить на черновые, получистовые и чистовые. Хотя практически возможны и отделочные режимы электроэрозионной обработки, обеспечивающие при достаточно малых энергиях импульсов высокую чистоту поверхности ($\nabla 8$), однако в связи с их крайне низкой производительностью рекомендовать их в промышленных условиях в подавляющем большинстве случаев нельзя.

Взаимосвязь между режимами обработки и обеспечиваемой при этом производительностью процесса и чистотой обработанной поверхности представлена на номограммах. Номограммы построены для случая работы медными электродами по стали 45 на частоте 400 *имп/сек* в пределах режимов по току до 600 *а* (рис. 101), а также на частоте 100 *имп/сек* при токах до 800 *а* (рис. 101, б) и на частоте 50 *имп/сек* при токах до 1000 *а* (рис. 101, в). При других материалах детали и электрода-инструмента приведенные соотношения изменяются, причем у тех материалов, которые обрабатываются электроимпульсным способом лучше, чем сталь 45 (например, у жаропрочных сплавов на никелевой основе), чистота поверхности на тех же режимах несколько хуже, и наоборот — у материалов с худшей обрабатываемостью чистота поверхности получается лучше (данные по обрабатываемости металлов и сплавов электроимпульсным способом приведены в гл. III).

Режим по току на черновых режимах выбирается по расчетной величине площади (см. рис. 98). Для этого же можно воспользоваться и номограммами. Например, при $F_p = 10\,000 \text{ мм}^2$, частоте 50 *имп/сек* и электроде из меди (рис. 101, в) номограмма поднимается от точки 100 *см*² нижней шкалы по вертикали до пересечения с наклонной прямой, затем по горизонтали перемещается влево до пересечения со шкалой тока и определяется величина $I_{отм} = 200 \text{ а}$. Следуя по горизонтали, определяем по правой

шкале производительность $M = 3600 \text{ мм}^3/\text{мин}$. На верхней шкале показана величина максимальных поверхностных неровностей, которая для рассматриваемого примера $H_m = 1 \text{ мм}$.

Данные номограмм — это то, что можно получить при хорошо налаженном оборудовании, обслуживаемом квалифицированным



рабочим. В производственных условиях трудно учесть ухудшение условий обработки по мере углубления электрода, усложнения профиля фигуры и т. п. Для компенсации влияния этих трудноучитываемых факторов на практике следует на 10—15% уменьшать режим по току по сравнению с данными номограмм; в таком случае характеристики по производительности и чистоте поверхности определяются по номограмме для фактически назначенного режима. Номограммы построены для медных электродов, используемых в электроэрозионной обработке в качестве эталонов. При использовании графитированных электродов из материала ЭЭГ допустимый режим по току необходимо выбирать на 20—30% меньше, чем указано на номограммах для меди.

Как видно из номограмм, чистота поверхности после обработки на частотах 50, 100 и 400 имп/сек низка, высота поверхностных

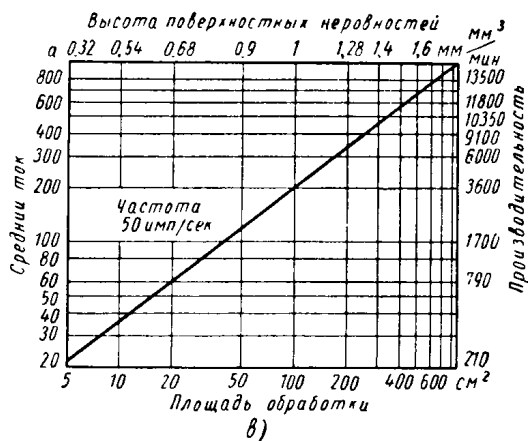


Рис. 101. Номограммы режимов и технологических характеристик на частотах:

а — 400 имп/сек; б — 100 имп/сек; в — 50 имп/сек

неровностей даже после снижения режима в конце операции относительно еще велика.

Для чистовой обработки необходимо переходить на меньшие по току режимы при частотах, измеряемых тысячами импульсов в секунду. Вследствие многократного уменьшения энергии импульсов размеры единичных лунок-следов разрядов и вместе с ними величина шероховатости уменьшаются. Взаимосвязь между режимом по току, производительностью процесса и чистой поверх-

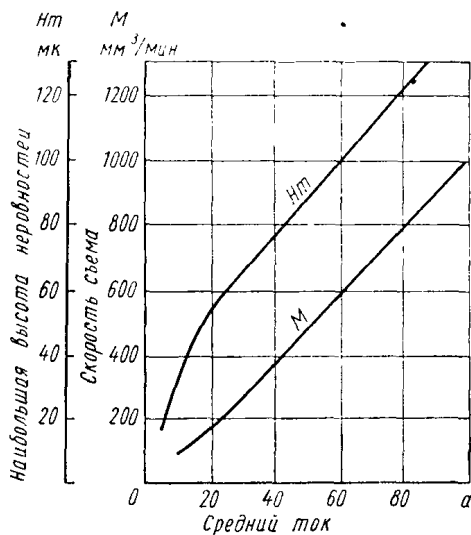


Рис. 102. Скорость съема и шероховатость поверхности в зависимости от среднего тока при 8000 имп/сек

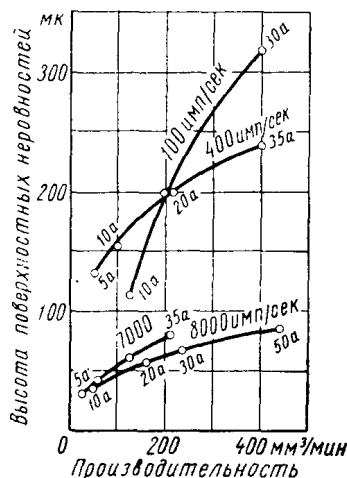


Рис. 103. График для определения границ перехода по частоте импульсов

ности для машинного высокочастотного генератора типа ИГИ на 8000 имп/сек представлена на рис. 102. Сравнение аналогичных характеристик, но для разных частот, дано на рис. 103. Как видно из рис. 103, если исходить только из требований достижения максимальной чистоты поверхности, то целесообразно переходить на высокочастотную обработку, как только производительности процесса на высокой и низкой частоте сравняются. Однако на самом деле граница перехода на высокую частоту проходит гораздо ниже — на токах порядка 20—30 а. Это связано с тем, что по мере увеличения частоты растет износ электродов и энергоемкость процесса. В настоящее время разработан ряд способов уменьшения износа, однако необходимость сохранения точного электрода на чистовом проходе приводит к требованию, чтобы припуск на чистовой проход был минимален. На практике в большинстве случаев целесообразно, постепенно снизив режим по току в конце чернового прохода, осуществлять переход с частоты 50—100 на частоту 400 имп/сек при токе 30 а, а на частоту 7—8 кГц — при токе 20 а. При переходе на высокую частоту с частоты 400 имп/сек

ступенчатое снижение режима производят до тока 10—15 а, после чего переключаются на высокочастотный генератор.

В тех случаях, когда обрабатываемая поверхность имеет участки, параллельные направлению подачи (или близкие к ним — мало наклоненные к направлению подачи), чистовая обработка этих участков осложняется вследствие того, что при переходе от черновых режимов к чистовым уменьшаются межэлектродные зазоры. В результате поверхности, перпендикулярные к направлению подачи, при переключении на чистовые режимы продолжают обрабатываться (так как зазор в направлении подачи выбирается автоматически до возникновения эрозионного процесса), а по боковым поверхностям обработка может не возобновиться, и на этих поверхностях сохраняются крупные шероховатости, оставшиеся от чернового прохода.

Наиболее простым способом чистовой обработки боковых поверхностей является введение дополнительного прохода, выполняемого «чистовым» электродом соответственно больших размеров. Однако при этом, помимо увеличения расходов на инструмент, сильно возрастает время обработки. Для исключения этого используют специальный прием, позволяющий получить без замены электродов-инструментов эффект эрозионного контактирования по всей поверхности при переходе к чистовым режимам.

Эффект контактирования (эрозионного) по всей поверхности с уменьшением межэлектродных зазоров достигается путем сдвига электрода-инструмента в горизонтальной плоскости с приближением его к обрабатываемой поверхности. При обработке фасонных поверхностей удовлетворительный результат дает последовательный сдвиг электрода по шести направлениям, выполняемый вручную, с помощью механизмов координатных перемещений инструментальной головки; контроль за величиной этих перемещений осуществляется по отсчетным устройствам (индикаторами, микроскопами и др.).

Дальнейшим развитием этого способа является применение специальных приспособлений — осциллирующих (их также называют планетарными) головок, закрепляемых в инструментальной каретке станка. Головка придает электроду круговые колебательные движения, причем электрод все время остается параллельным самому себе (круговое поступательное движение). Амплитуда (эксцентриситет) a кругового движения определяется по формуле

$$a = Z + p_1 - p_2,$$

где Z — припуск на чистовую электроимпульсную обработку;
 p_1 — наибольший межэлектродный зазор при черновой обработке;
 p_2 — наименьший межэлектродный зазор при чистовой обработке.

Обычно амплитуда колебаний лежит в пределах 1—3 мм (для обработки после черновых режимов соответственно 20—300 а, 100 *имп/сек*).

Помимо компенсации разницы в межэлектродных зазорах с переходом к чистовым режимам, использование круговых движений с регулируемой амплитудой дает возможность коррекции размеров в процессе обработки, что совершенно исключено при работе по обычно применяемому методу прошивания. Круговые движения способствуют эвакуации продуктов энергии из зоны обработки, повышая стабильность процесса. При высокочастотной обработке с применением круговых движений интенсивность съема металла с фасонных поверхностей повышается в среднем в 1,5—2 раза.

РАСЧЕТ ЧИСЛА ПРОХОДОВ

Под проходом понимается прошивание детали одним электродом. Число проходов зависит от эрозионной стойкости электрода-инструмента, глубины прошиваемой детали и требуемой точности.

Возможны два способа получения заданных размеров обрабатываемой поверхности; требуемая точность может быть достигнута:

- 1) корректированием размеров профилирующего электрода с учетом его износа при дальнейшем использовании;
- 2) путем постепенного приближения к заданному профилю, последовательно работая рядом электродов-инструментов, размеры которых не учитывают износ в процессе обработки.

Возможна и комбинация указанных способов, когда коррекцию производят на отдельных участках инструмента, имеющих повышенный износ.

Корректирование профиля по всем размерам представляет большие трудности, так как износ электрода-инструмента на различных участках непостоянен и плохо поддается учету. Этот способ может в основном использоваться на простейших работах, таких как прошивание отверстий, где компенсация износа достигается простым удлинением рабочей части электрода-инструмента.

Работа электродами, размеры которых не учитывают износа, не дает полного соответствия получаемого профиля исходному, но при достаточном количестве электродов-инструментов (т. е. при нескольких проходах) могут быть получены сколь угодно малые отклонения от исходного профиля, и этот способ является основным при обработке фасонных поверхностей.

Вопрос о требуемом числе проходов должен рассматриваться в каждом конкретном случае с учетом требований чертежа, износостойкости инструмента и серийности детали. На практике электроимпульсной обработки могут встречаться разнообразные варианты: в одних случаях возможно одним электродом изготовить одну или несколько деталей в один проход; в других случаях

в условиях серийного производства в целях снижения расхода электродов изношенные электроды используются многократно и число проходов увеличивают до двух-трех даже тогда, когда деталь можно изготовить за один проход; иногда, когда стойкости инструмента не хватает, одну деталь приходится обрабатывать в несколько проходов — этот редкий в практике электроимпульсной обработки случай связан с повышенным износом утоненных участков электрода (расчет числа проходов следует выполнять по тому участку заготовки, где износ электрода максимален).

В серийном производстве сложнопрофилированных и в первую очередь многополостных деталей выгодной схемой обработки, характеризующейся наименьшим расходом электродов-инструментов при определенном числе проходов, является обработка заготовки вначале черновыми, а затем чистовыми электродами при одинаковой периодичности их замены. При этом в качестве черновых используются электроды, ранее применявшиеся на предыдущих проходах, и только чистовой проход выполняется новым электродом. В результате на партию деталей расходуется один новый электрод-инструмент. Величина подачи электродов на всех проходах одинакова и соответствует полной глубине прошиваемой полости, что существенно облегчает управление станком и автоматизацию рабочего цикла.

Наиболее целесообразна указанная схема при изготовлении многополостных деталей, например, при обработке межлопаточных каналов рабочих колес радиальных турбин, когда каждый канал можно рассматривать как одну из деталей в партии.

Для точного расчета числа проходов необходимо иметь зависимость между числом проходов и количеством деталей в партии при известных параметрах детали и электрода (глубина профиля, требуемая точность обработки и величина износа). Такая зависимость выражается формулой

$$n = \frac{\lg \left[\frac{H}{B\delta} (1 - \gamma m) + \gamma m \right]}{\lg \frac{1 - \gamma m + \gamma m B}{\gamma m B}},$$

где n — число проходов, необходимое для обработки каждой детали;

H — глубина профиля обрабатываемой детали, соответствующая участку наибольшего абсолютного износа электрода (в случае, когда относительный износ электрода одинаков на всех участках, H — максимальная глубина профиля);

γ — относительный износ электрода на наиболее изнашиваемом участке;

m — число профилируемых деталей;

δ — наибольшее допускаемое искажение профиля детали, вызываемое износом электрода (принимается равным примерно половине послеоперационного допуска, но не более 0,2—0,3 мм);

$$B = \frac{1 - (1 - \gamma m)(1 + \gamma)^m}{\gamma m [(1 + \gamma)^m - 1]}.$$

Графики, построенные по расчетным данным, приведены на рис. 104. Показаны наиболее часто встречающиеся отношения $\xi = \frac{H}{\delta}$ от 10 до 1000 при величине относительного износа $\gamma = 0,002; 0,005; 0,007; 0,01$ и $0,02$ (на рис. 104 износ выражен в %).

По графикам удобно быстро выбирать не только число проходов для определенного числа деталей, но и рациональную величину партии при повторном использовании электродов, а также увязать эти величины со значением ξ , которым обычно можно в известных пределах варьировать за счет припуска, оставляемого после электроимпульсной обработки.

Графики могут быть также использованы при определении числа деталей, которые можно изготовить одним электродом до его износа сверх допустимой величины δ ; в этом случае определяется значение m при $n = 1$. Этот вариант является весьма перспективным при такой форме электрода, которая допускает систематическую правку («заточку») его рабочей части.

В наиболее неблагоприятных случаях, когда необходимо несколько проходов для обработки всего лишь одной детали, величина n определяется при $m = 1$.

При использовании графиков в случаях, когда величины ξ отличаются от указанных на рисунке, следует интерполировать результаты и округлять значения n до ближайшего целого числа, вследствие чего истинная величина δ будет несколько меньше принятой в расчетах.

Интересен такой прием: если увеличить количество проходов сверх расчетного числа n , расход электродов резко сокращается. Это нетрудно показать на примере. Пусть нужно прошить глухое отверстие глубиной 100 мм с точностью 1 мм электродом, изготовленным из материала с износом 1%. Если отверстие изготовить одним электродом за один проход, то на каждую деталь будет расходоваться один вновь изготовленный электрод. В том случае, если применить два последовательно работающих электрода (т. е. два прохода), то можно без их восстановления обработать до 15 деталей (см. рис. 104 для $\gamma = 1\%$) и израсходовать, таким образом, на каждую деталь не один электрод, а $2/15$ электрода.

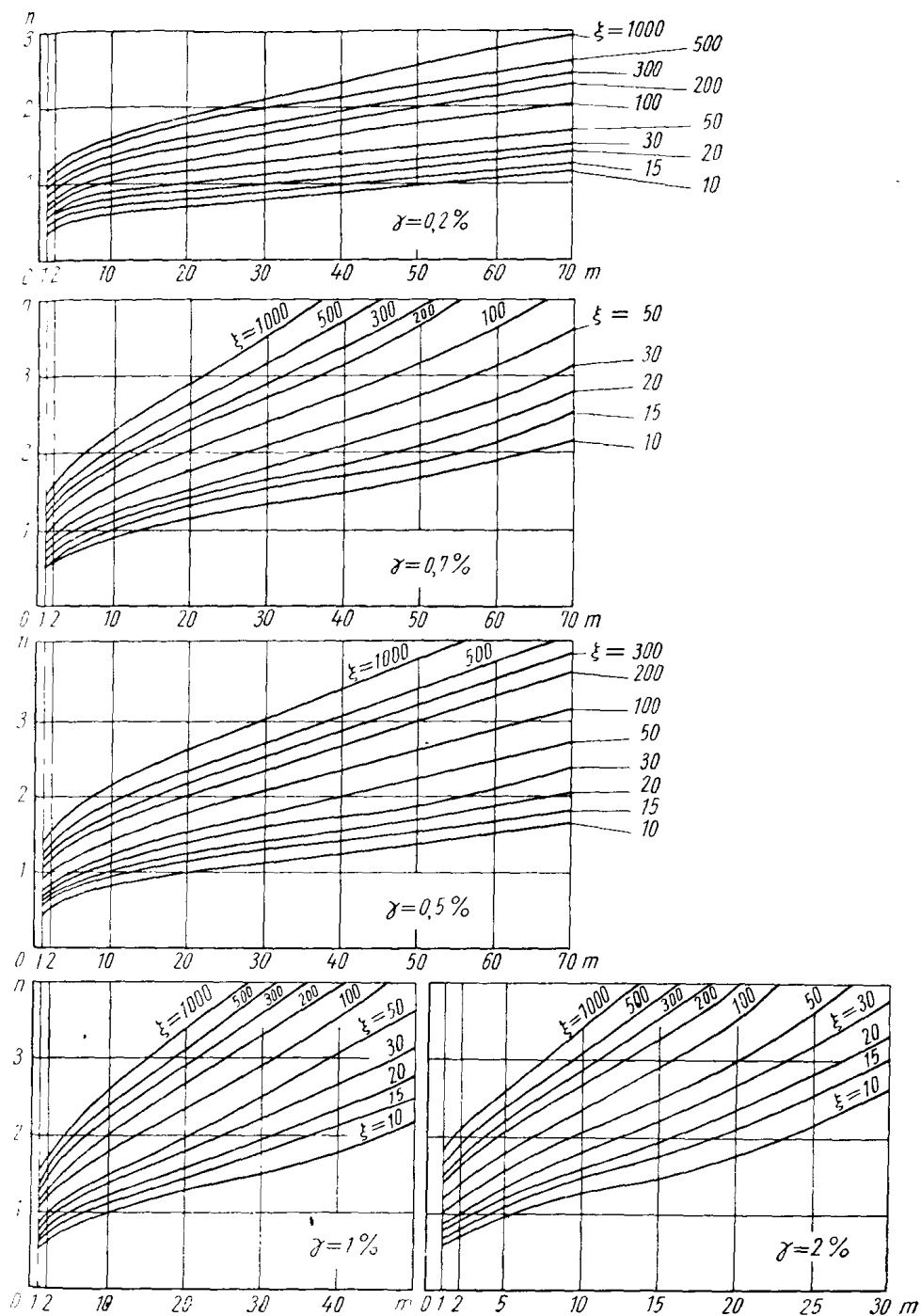


Рис. 104. Графики для определения числа проходов

РАСЧЕТ ПРИПУСКОВ

Припуском на электроимпульсную обработку является слой металла, удаляемый с поверхности заготовки в результате электроэрозионного процесса.

Промежуточным припуском является слой металла, необходимый для выполнения технологического перехода. Он определяется разностью размеров, получаемых на предшествующем и выполняемом переходах технологического процесса обработки данной поверхности.

На копировально-прошивочных операциях обычно удаляется односторонний припуск. Минимальный припуск на обработку

$$Z_{\theta \min} = (H_a + T_a) + |\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_\theta|,$$

где H_a — высота поверхностных неровностей, полученных на предшествующем переходе;

T_a — глубина дефектного слоя, полученного на предшествующем переходе;

ρ_a — векторная (геометрическая) сумма пространственных отклонений взаимосвязанных поверхностей обрабатываемой заготовки, получавшаяся на предшествующем переходе;

ε_θ — погрешность установки при выполняемой обработке, равная сумме погрешностей базирования и закрепления.

Индекс a указывает, что данная составляющая должна быть принята по предшествующему переходу, а индекс θ присвоен величинам, относящимся к выполняемому технологическому переходу.

При обработке полостей, когда векторы $\bar{\rho}_a$ и $\bar{\varepsilon}_\theta$ совпадают по направлению, т. е. когда угол $(\bar{\rho}_a \bar{\varepsilon}_\theta)$ равен 0,

$$Z_{\theta \min} = H_a + T_a + \rho_a + \varepsilon_\theta.$$

В тех случаях, когда предвидеть направление векторов нельзя, их суммируют по правилу квадратного корня. Так, например, при обработке отверстий (учитывая, что припуск на диаметральный размер удваивается) припуск определяется как

$$2Z_{\theta \min} = 2[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_\theta^2}].$$

Для расчета по приведенным формулам в практике механической обработки используют справочные таблицы с значениями H_a , T_a и др., причем табличные данные для расчета отличаются по разным отраслям машиностроения и учитывают конкретные условия производства.

Припуск на электроимпульсную обработку, если она следует после механической, определяется обычным путем по справочным

величинам H_a , T_a , ρ_a для предшествующего перехода механической обработки и величины ϵ_s погрешности установки, которая для электроимпульсных станков такая же, как и для металлорежущих.

В случае, когда требуется определить припуск на механическую обработку после электроимпульсной (предшествующий переход выполнен на электроимпульсном станке), величину H_a следует выбирать по данным, приведенным выше на номограммах рис. 101. Величины ρ_a и ϵ_s выбирают по данным для металлорежущих станков. Величина T_a слоя с измененной структурой для стали 45 приведена ниже: для черновых режимов в табл. 32 и для чистовых — в табл. 33.

Т а б л и ц а 32

Зависимость глубины измененного слоя от тока и частоты следования импульсов

Частота следования импульсов в имп/сек	Общая наибольшая глубина зоны структурных превращений в мм при среднем токе в а										
	10	20	50	100	200	300	400	500	600	800	1000
400	0,06	—	0,2	0,23	0,26	0,3	0,47	0,53	0,6	—	—
100	0,15	0,2	—	0,31	0,36	0,54	—	0,6	—	0,9	—
50	0,2	0,35	0,42	0,47	—	0,63	0,73	—	0,8	—	0,94

Т а б л и ц а 33

Частота следования импульсов в кГц	Общая наибольшая глубина зоны структурных превращений в мм при среднем токе в а				
	1,2	3	7	10	15
7—8	—	0,03	—	0,05	0,06
22—25	0,02	0,02	0,04	—	0,05

Приведенная выше формула для расчета минимального припуска является основной и включает все возможные производственные погрешности. В ряде конкретных случаев те или иные составляющие припуска выпадают. Например, при установке заготовки на магнитную плиту электроимпульсного станка (погрешность закрепления нулевая) и при совмещенной установочной и измерительной базах (погрешность базирования тоже нулевая) исключается погрешность установки, и, следовательно, $\epsilon_s = 0$; при определении припуска на чистовой проход, выполняемый на электроимпульсном станке путем изменения режима (по току, частоте импульсов), но без перестановки детали и инструмента, пространственные отклонения не исправляются и $\rho_a = 0$; в ряде случаев при работе на чистовых режимах на высокой

частоте дефектный слой практически отсутствует и $T_a = 0$; возможны случаи, когда слой с измененной структурой не ухудшает качества поверхности детали и его не требуется удалять, в этих случаях T_a исключают из формулы.

РАСЧЕТ МАШИННОГО ВРЕМЕНИ НА ОБРАБОТКУ

В общем случае машинное время на электроимпульсную обработку определяется делением объема припуска на скорость съема металла.

Поскольку обычно полный припуск удаляется не на одном постоянном режиме, и, следовательно, скорость съема в процессе обработки изменяется, расчет проводят поэтапно, определяя трудоемкость удаления промежуточных припусков, каждого на «своем» режиме.

Для этого на черновых проходах, когда режим выбирается в зависимости от величины площади обрабатываемой поверхности, деталь удобно рассечь на слои, каждый из которых удаляется на постоянном режиме; затем

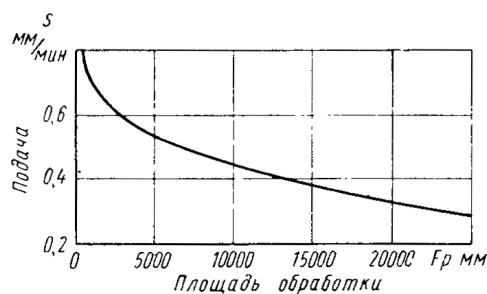


Рис. 105. Величина подачи при оптимальном соотношении тока и площади

нужно определить объем каждого слоя (при сложном профиле — приближенно); определить скорость съема, достигаемую при соответствующем режиме; определить время удаления каждого слоя по отдельности и, суммировав результаты, определить время всей черновой обработки.

Время чистовой обработки также может быть определено через объем припуска на чистовой проход; при этом следует учитывать, что коэффициент заполнения профиля для поверхности, обработанной электроимпульсным способом, равен примерно 0,5.

В производственных условиях для быстрой оценки трудоемкости электроимпульсной обработки расчет можно производить упрощенно: время черновой обработки определяют по скорости движения подачи, а время чистовой обработки — по площади обрабатываемой поверхности. Такой расчет делается следующим образом.

Если при обработке обеспечивается оптимальное соотношение между током и площадью, можно определять величину подачи по графику на рис. 105.

Высоту (глубину) обрабатываемой фигуры H рассекают на отрезки H_1 , H_2 и т. д., соответствующие более или менее значительным изменениям в площади F_{p1} , F_{p2} и т. д.

Определяют по графику значения подач s_1, s_2 , достигаемые на участках H_1, H_2 ; время прошивания на каждом участке $\left(\frac{H_1}{s_1}; \frac{H_2}{s_2}\right)$ и общую продолжительность черновой обработки, как сумму этих времен.

Если обработка ведется на токе, меньшем, чем допускается величиной обрабатываемой поверхности, величина подачи уменьшается во столько раз, во сколько фактическая величина F_p больше оптимальной. Поэтому в этом случае найденные по графику значения подачи умножают на отношение оптимальной величины площади (по графику) к фактической.

Описанный упрощенный способ расчета пригоден в условиях черновой обработки, причем при переходе от данных, указанных на графиках для стали 45, к дру-

гим материалам следует учитывать изменение обрабатываемости (коэффициенты обрабатываемости указаны в гл. III).

Время полустивовой обработки на промежуточных ступенях электрического режима можно оценить по полной площади поверх-

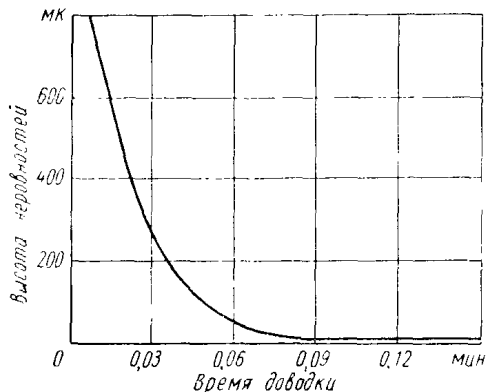


Рис. 106. Трудоемкость чистовой обработки 1 см^2 поверхности (генератор ИГИ на 8000 имп/сек)

чистой обработки поверхности с начальной высотой неровностей 0,8 мм трудоемкость обработки 1 см^2 поверхности показана на рис. 106.

Чистота, соответствующая 5-му классу, достигается на машинном высокочастотном генераторе типа ИГИ (8 кГц) или на электронно-полупроводниковом типа ВГ-ЗВ (8 кГц) примерно за 0,15 мин/см^2 .

Таблица 34

Средний ток в а	Высота неровностей в мм	Время обработки в мин на 1 см^2 поверхности
50	0,28	0,02
30	0,22	0,02
20	0,18	0,03
10	0,15	0,05
5	0,12	0,12

ности, требующей обработки (не путать с расчетной величиной площади F_p , определяемой по соответствующим проекциям). Для этого можно пользоваться трудоемкостью обработки 1 см^2 поверхности (частота 400 имп/сек , сталь 45, табл. 34).

Время чистовой обработки определяют либо, как указывалось выше, по объему припуска, либо также по трудоемкости обработки 1 см^2 поверхности.

Для частоты 8000 имп/сек (генератор типа ИГИ) при

При частоте 22 000 *имп/сек* (генератор ВГ-3В) можно повысить чистоту поверхности до 6-го класса (на границе $\nabla 7$). Трудоемкость при этом значительно возрастает (до 2 *мин/см²*).

При оценке различных вариантов технологического процесса, кроме сопоставления машинных времен, следует учитывать возможность многостаночного обслуживания при переходе на электроимпульсную обработку и уменьшение ручного труда (если он требуется на чистовых операциях механической обработки) за счет равномерного припуска и улучшенной микрогеометрии поверхности.

МНОГОКОНТУРНЫЕ СХЕМЫ

Применение высокопроизводительных режимов и реализация больших мощностей при обработке одной детали одним инструментом не всегда возможны. Ограничивающими факторами, как указывалось выше, являются недостаточная величина обрабатываемой поверхности; сложная форма обрабатываемой поверхности, интерпретируемая через расчетную величину площади; опасность прижогов при ограниченной толщине стенок детали; снижение стабильности процесса на высоких режимах при некоторых материалах электрода и заготовки; наконец, необходимость для некоторых деталей снизить режим, чтобы ограничить высоту поверхностных неровностей и глубину измененного слоя.

Большим резервом повышения производительности электроимпульсной обработки, в особенности при наличии того или иного ограничивающего фактора, является многоинструментальная обработка.

В силу особенностей электроэрозионного процесса одновременная работа нескольких электродов-инструментов возможна при соблюдении определенных условий и соотношений в параметрах применяемых многоконтурных схем. Под контуром следует понимать электрическую цепь питания с одним (рис. 107, а) или несколькими (рис. 107, б) электродами-инструментами, в которой можно поддерживать режим, отличный от режима других контуров; в контуре обычно имеется устройство (например, сопротивление) для независимого регулирования режима только в данной цепи. Таким образом, в разных контурах многоконтурной схемы (рис. 107, в) можно осуществлять работу с разными режимами.

Как показано на рис. 107, г несколько контуров могут питаться от одного генератора; такие контуры оказываются связанными между собой наличием общего источника питания. В других случаях возможна связь между контурами не только через общий генератор, но и через общий привод подачи (рис. 107, е). Такая связь может иметь место и при питании одной части контуров от одного, а другой части — от другого генератора (рис. 107, д).

Принципиально различными для осуществления обработки и построения наиболее выгодного технологического процесса являются те схемные решения, которые вне зависимости от конструктивного исполнения станка приводят к подлинно одновременной работе электродов, т. е. к одновременному возникновению электрических разрядов, к дроблению импульсов. Однако в производственных условиях реализация возможностей многоконтурной

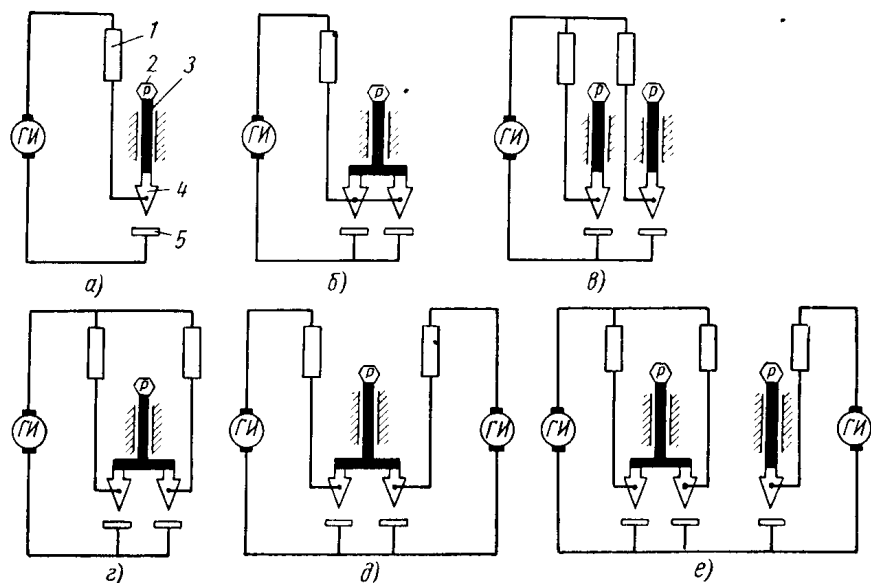


Рис. 107. Многоконтурные схемы:

ГИ — генератор импульсов; 1 — сопротивление; 2 — регулятор; 3 — шпиндель; 4 — электрод; 5 — деталь

обработки, применение многоинструментных наладок зависят от технологических возможностей оборудования.

При рационально выбранных конструкциях и схемах электроимпульсных станков можно использовать в практике электроимпульсной обработки ряд эффективных методов, широко применяемых на металлорежущих станках, — многопозиционной обработки, обработки по методу концентрации операций и групповой. Во всех этих случаях необходимые изменения режимов работы различных электродов осуществляются следующими путями (используемыми отдельно или в различных сочетаниях):

1) регулированием токоограничивающих сопротивлений или аналогичных по назначению устройств в контурах, питающихся от одного генератора;

2) регулированием режима работы генераторов, питающих разные контуры;

3) применением в разных контурах генераторов разных типов (например, работающих на разных частотах).

В соответствии с различными конструктивными решениями, связанными с различными вариантами многоконтурной обработки, электроимпульсные станки можно подразделить на станки с одним или с несколькими независимо работающими генераторами; каждая из этих групп включает одно- и многошпиндельные станки, причем один шпиндель может нести один или несколько электродов-инструментов, питающихся каждый от своего контура. Наличие шпинделя, общего для нескольких контуров, означает, что они связаны общим приводом подачи. Наличие генератора, общего для нескольких контуров, означает, что они электрически взаимосвязаны.

В конечном счете характеристики многоинструментной обработки могут быть сведены к закономерностям, установленным для случая работы одним электродом; однако при этом необходимо учитывать зависимости, связанные с влиянием общего источника питания и общего привода подачи.

Обе зависимости могут проявляться вместе или по отдельности. Так, например, для одношпиндельных многоконтурных станков с одним генератором имеют место обе связи; для многошпиндельных станков, несущих на каждом шпинделе по одному контуру, имеет место только связь через общий источник питания; для одношпиндельных многоконтурных станков с несколькими генераторами, питающими каждый свой контур, имеется только связь через общий привод подачи; наконец, у многошпиндельных станков, каждый шпиндель которых несет один контур, имеющий питание от своего генератора, обе связи между контурами отсутствуют, и каждая шпиндельная головка работает как отдельный одноконтурный станок.

Различные конструктивные и схемные решения при анализе или проектировании могут быть сведены к этим четырем вариантам, связанным с различными сочетаниями взаимного влияния работающих контуров через общий источник питания или привод подачи.

НЕОБХОДИМЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКОНТУРНЫХ СХЕМ ДЛЯ СТАНКОВ С ОДНИМ ГЕНЕРАТОРОМ

При работе от одного генератора и наличии того или иного ограничивающего фактора возникает целесообразность применения многоконтурной схемы, с помощью которой вместо одного импульсного разряда одновременно возбуждается несколько разрядов соответственно меньшей мощности (рис. 108).

В общем виде многоконтурная схема для станков с одним генератором представлена на рис. 109. Внутреннее сопротивление источника питания и сопротивление общих для всех контуров участков цепи представлены на схеме сопротивлением R . Сopro-

тивление отдельных контуров обозначено r . В случае, когда каждый шпиндель многошпиндельного станка несет один электрод-инструмент со своим контуром, проявляется связь между контурами через общий источник питания. Возникновение параллельных разрядов и, следовательно, одновременная работа всех n ин-

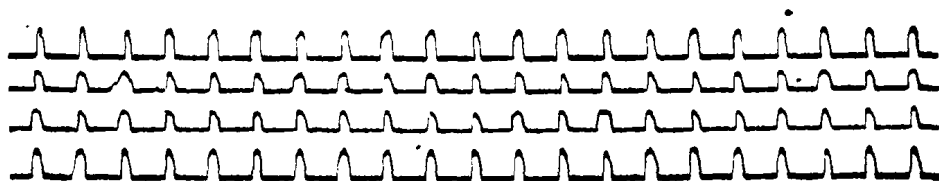


Рис. 108. Осциллограммы тока в четырех контурах, работающих одновременно от одного генератора

струментов возможны, как показывает расчет [58], при соотношении параметров схемы:

$$n \leq \frac{r(E_{\max} - U_1)}{R(U_1 - U_s)} + 1, \quad (\text{IX. 1})$$

где $E_{\max}$ — э. д. с. генератора (здесь и далее — амплитудные значения);

U_1 — напряжение, необходимое для пробоя эрозионного промежутка;

U_s — напряжение на электродах во время импульсного (дугового) разряда.

Эта зависимость выражает условие возникновения параллельных разрядов во всех контурах n -контурной схемы и, поскольку

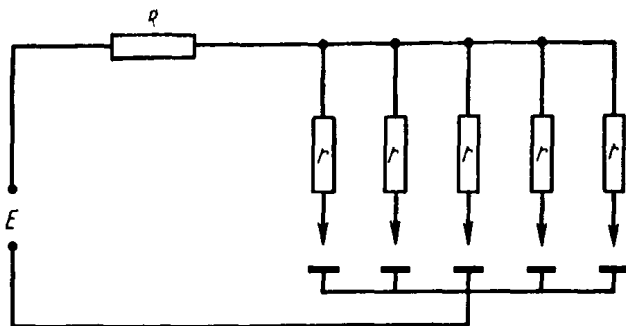


Рис. 109. Принципиальная многоконтурная схема с одним генератором

для нормальных условий проведения устойчивого процесса электроимпульсной обработки диапазон значений U_1 и U_s известен, позволяет связать все параметры схемы, подлежащие выбору или регулированию: R , r , n , $E_{\max}$. Например, для распространенных в промышленности генераторов типа МГИ с амплитудным

значением $E_{\max} \approx 100$ в в условиях устойчивого процесса при $U_1 \approx 55 \div 60$ в и $U_s \approx 30$ в параметры многоконтурной схемы связаны зависимостью

$$n \leq (1,4 \div 2) \frac{r}{R} + 1. \quad (\text{IX. } 2)$$

Приведенное условие (IX. 1) одновременной работы всех инструментов многоконтурной схемы справедливо для всех схем с общим источником питания и может быть использовано для определения максимально допустимого числа инструментов, работающих одновременно, причем надежность одновременной работы возрастает с увеличением правой части неравенства. При уменьшении правой части до значений, нарушающих справедливость приведенного выражения, n -контурная схема работает при возникновении параллельных разрядов не во всех контурах одновременно, а в отдельных их группах, количество контуров в которых удовлетворяет указанному условию. Поскольку величина r выбирается (регулируется) в зависимости от требуемого режима, для соблюдения рассмотренных требований сопротивление общих для всех контуров участков электрической цепи должно быть минимальным, без которого нельзя обойтись (сопротивление проводов, шунтов и т. п.)

Возбуждение разрядов во всех контурах происходит за время возрастания мгновенного значения напряжения в импульсе до максимума, поэтому длительность параллельных импульсных разрядов оказывается тем меньше, чем позже произошел пробой на том или ином контуре. Эта разница в длительности импульсных разрядов ведет к снижению энергии в параллельных импульсах; а следовательно, к снижению производительности многоконтурной обработки. Влияние указанного эффекта уменьшается при применении генераторов, вырабатывающих импульсы напряжения с крутым передним фронтом, а при уже имеющемся генераторе — за счет значительного превышения значения $E_{\max}$ амплитуды напряжения, необходимой для пробоя n -го промежутка.

МНОГОИНСТРУМЕНТНАЯ ОДНОКОНТУРНАЯ ОБРАБОТКА

На основании полученной зависимости (IX. 1) удобно рассмотреть случай многоинструментной одноконтурной обработки, т. е. обработки инструментами, не разделенными электрическими сопротивлениями. В связи с тем, что в многоэлектродной одноконтурной схеме $r \ll R$, возникновение параллельных разрядов на расстояниях, исключающих влияние ранее возникшего разряда, невозможно. Все электроды-инструменты имеют одинаковый потенциал, серии разрядов возникают поочередно то на одном из них, то на другом, и в результате процесс обработки характеризуется теми же зависимостями, что и обработка одним электродом. Таким образом, если пренебречь некоторым отличием в усло-

виях эвакуации, то можно считать, что увеличение числа электродов равносильно увеличению площади обрабатываемой поверхности; последнее обстоятельство позволяет соответственно увеличивать режим по току в тех случаях, когда при обработке одним инструментом этому препятствует небольшая величина обрабатываемой поверхности. При увеличении количества электродов сохраняется прямо пропорциональная зависимость между числом электродов, общим рабочим током и суммарной скоростью съема, а съем, приходящийся на один электрод-инструмент, остается без

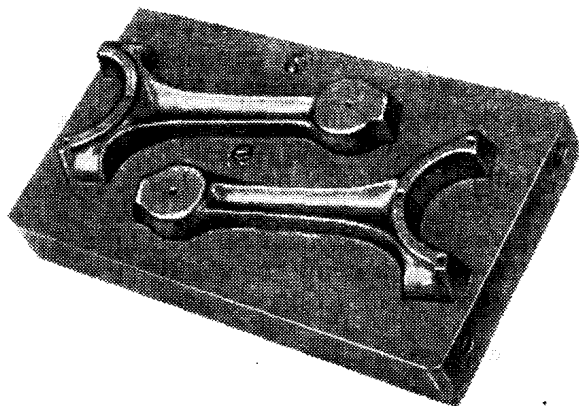


Рис. 110. Электрод-инструмент для одновременной обработки двух ручьев в штампе на шатун

изменений. По мере увеличения количества электродов и соответствующего повышения режима зависимость скоростей съема от рабочего тока повторяет аналогичную зависимость для одноинструментной обработки.

При увеличении числа электродов, но сохранении прежней величины тока, изменение производительности соответствует известной зависимости скорости съема от площади, т. е. уменьшается при отклонении от оптимальной величины обрабатываемой поверхности. В связи с тем, что при многоинструментной одноконтурной обработке дробления импульсов не происходит, ее применением нельзя решить задач, связанных с преодолением каких-либо других ограничивающих режим факторов, кроме недостаточной величины обрабатываемой поверхности. В последнем же случае ее применение вполне оправдано. В частности, многоинструментная одноконтурная обработка может быть применена для изготовления небольших лопаток, многоместных штампов, прессформ и т. п.

Поскольку инструменты при одноконтурной обработке электрически соединены, их, когда это удобно, изготавливают из целого куска материала (рис. 110) или собирают в кассету.

ВЛИЯНИЕ ОБЩЕГО ГЕНЕРАТОРА НА ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКОНТУРНОЙ ОБРАБОТКИ

Производительность, обеспечиваемая в случае многоинструментной обработки, оценивается по суммарному съему, производимому всеми электродами в единицу времени. Поэтому в конечном счете суммарная скорость съема пропорциональна суммарному для всех контуров рабочему току.

Рассмотрим, как при соблюдении условия (IX. 1) одновременной работы всех n -инструментов этот общий ток (а следовательно, и суммарная производительность) зависит от числа контуров.

Связь рабочего тока с параметрами схемы выражается следующим образом:

при одноконтурной схеме ($n = 1$) рабочий ток I_{cp1} (см. рис. 109)

$$I_{cp1} = \frac{E_{cp} - U_{scp}}{R + r}, \quad (\text{IX. 3})$$

где E_{cp} и U_{scp} — средние значения соответственно э. д. с. генератора и напряжения на эрозионном промежутке; при многоконтурной схеме с числом инструментов n значение рабочего тока в любом контуре I_{cp1n} определится, как

$$I_{cp1n} = \frac{E_{cp} - U_{scp}}{nR + r}. \quad (\text{IX. 4})$$

Таким образом, при переходе от одноконтурной схемы к n -контурной, как это видно из выражений (IX. 3) и (IX. 4), имеет место уменьшение рабочего тока одного контура:

$$I_{cp1n} = I_{cp1} \frac{R + r}{nR + r}. \quad (\text{IX. 5})$$

Из полученной формулы видно, что при $R = 0$, т. е. при идеально жесткой внешней характеристике генератора и отсутствии сопротивления общей части цепи, ток одного контура в одно- и многоконтурных схемах был бы одинаков. В реальных же схемах имеет место соотношение (IX. 5), вследствие чего суммарный ток $I_{об}$ при работе одного генератора на n контуров возрастает по сравнению с одноинструментной обработкой не в n раз, а меньше:

$$I_{об} = n I_{cp1} \frac{R + r}{nR + r}. \quad (\text{IX. 6})$$

В приведенных зависимостях не учитывалась какая-либо взаимосвязь контуров, помимо электрической. Поэтому эти зависимости справедливы только для n -контурной схемы с самостоятельным регулированием подачи каждого электрода (например, n шпиндельных головок или n одношпиндельных станков с общим

генератором). Соотношение величин тока одного контура в одно- и многоконтурной схемах при общем приводе подачи имеет, как будет показано ниже, более сложный характер.

Зависимость общего тока, а с ним и суммарной скорости съема от числа одновременно работающих электродов [см. (IX. 6)] позволяет оценить влияние общего генератора на производительность многоинструментной обработки.

МНОГОКОНТУРНАЯ ОБРАБОТКА НА ОДНОШПИНДЕЛЬНЫХ СТАНКАХ

Многоконтурная обработка на одношпиндельных станках представляет большой интерес, так как одношпиндельные станки наиболее распространены. От предыдущего этот вариант отличается наличием общего привода подачи для всех одновременно работающих электродов. Зависимости, рассмотренные выше для многоконтурных схем с одним генератором, сохраняют свою силу независимо от того, самостоятельно или нет регулируется подача каждого электрода. Однако величина рабочего тока, а с нею и производительность зависят еще и от этого.

При многоинструментной обработке с общим приводом подачи для поддержания нормального процесса необходимо обеспечить такую подачу механически единой системы электродов, чтобы, поддерживая рабочий зазор на всех электродах, не допустить короткого замыкания ни на одном из них. Поэтому в случае, если на каком-либо из электродов происходит короткое замыкание, регулятор, во избежание прижогов и сваривания электрода с деталью, возможных при обработке на характерных для электроимпульсного метода высоких режимах, должен обеспечить быстрое реверсирование подачи и отвод электродов до восстановления нормального зазора.

Таким образом, при работе на высокопроизводительных режимах необходимо производить регулирование по максимально нагруженному контуру. При этом желательно обеспечить съем сигнала на регулятор таким образом, чтобы не зависеть от регулируемых параметров схемы и режимов обработки. В связи с этим наиболее удобно осуществлять регулирование по напряжению на эрозионном промежутке, снимая сигнал так, как это показано на рис. 111, а. Если не учитывать незначительного падения напряжения на диоде, то можно считать, что сигнал, снимаемый на регулятор, в любой момент времени равен напряжению на наиболее нагруженном электроде. Сопротивление в цепи съема сигнала рассчитывается по допустимому току диода в момент короткого замыкания контура. Так, при работе с серийными генераторами МГИ-2М, МГИ-3М схема с диодами Д7Г и сопротивлением 430 *ом*, мощностью 20 *вт* обеспечивает устойчивую работу на всех режимах. Регулирование возможно осуществить по аналогичной схеме с разделительными

вентильями, но со съемом сигнала по току в наиболее нагруженном контуре (рис. 111, б); при этом сравниваются падения напряжения на балластных сопротивлениях, и схема оказывается непригодной для генераторов, работающих без балласта. В связи с этим, а также учитывая преимущества регулирования по напряжению на эрозионном промежутке как наиболее стабильному параметру, вариант схемы со съемом сигнала по напряжению следует считать предпочтительным.

Рассмотрим влияние в работе отдельных контуров друг на друга.

Как указывалось выше, состав импульсов-разрядов при электроимпульсной обработке неоднороден. Общее количество импульсов n_2 , вырабатываемых генератором, равно сумме четырех возможных групп импульсов: импульсов холостого хода n_x , короткого замыкания n_k , рабочих n_p и фиктивных n_f .

Нормально настроенный регулятор станка при появлении серии импульсов холостого хода осуществляет медленную подачу всех жестко связанных одним приводом электродов к детали. При появлении серии импульсов короткого замыкания или, что менее резко выражено, фиктивных импульсов хотя бы на одном электроде регулятор осуществляет отвод всех электродов. В отличие от подачи на сближение отвод должен осуществляться возможно быстрее, чтобы не допустить сваривания электродов, прижогов на детали, зашлаковывания промежутка. Как правило, быстрый отвод электродов вызывает перебег — некоторое превышение нормальной величины промежутка, возникновение серии холостых импульсов и, как следствие этого, — последующую подачу на сближение до возобновления рабочих импульсов, т. е. до положения, которое регулятор и должен был бы поддерживать все время. В реальных условиях, однако, в силу действия случайных причин — заклинивания промежутка крупными частицами, образования мостика из нескольких частиц, контакта при вибрации и т. п. — возможность появления импульсов короткого замыкания и фиктивных

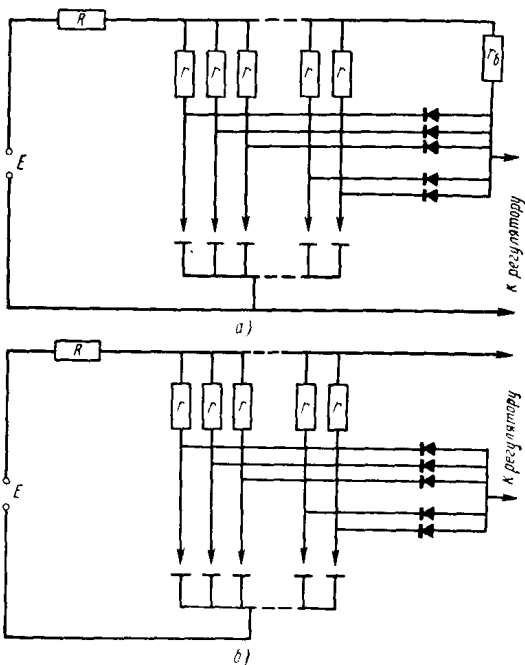


Рис. 111. Схема съема сигнала:

а — по напряжению на наиболее нагруженном электроде; б — по току

сохраняется. При этом регулятор не успевает реагировать на отдельные импульсы того или иного вида и изменяет подачу под действием только серий импульсов, возникающих на наиболее нагруженном электроде. Для полного описания механизма процесса в рассматриваемом случае необходимо еще иметь в виду, что после небольшого начального периода «приработки», когда некоторая неизбежная разница в исходном положении электродов перестает мешать их одновременной работе, они все работают при любых сочетаниях различных видов импульсов, одновременно

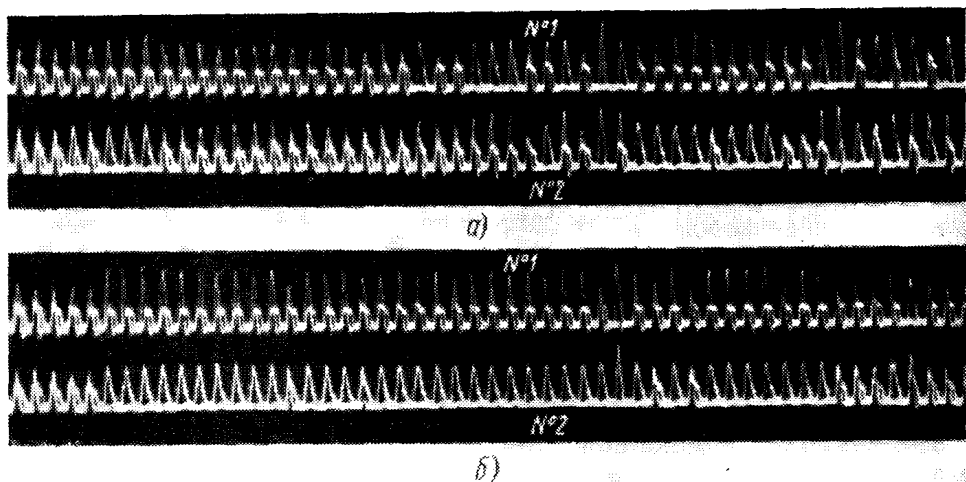


Рис. 112. Осциллограммы тока и напряжения при двухконтурной обработке на токе 500 а:

а — работают два контура; б — работает контур № 1, контур № 2 замкнут

протекающих в разных контурах (рис. 112, а). Даже тогда, когда один из контуров замкнут, нормальная работа остальных контуров не прекращается (рис. 112, б). Единственным положением, при котором существенно сказывается взаимное влияние электродов, является их общий отвод, когда во всех контурах следуют серии холостых импульсов. Избежать появления серий холостых импульсов не представляется возможным ввиду того, что для разрыва стационарной дуги, возникающей при коротком замыкании, а тем более для разрыва сварившихся электрода и детали необходимо раздвинуть их на расстояние, большее, чем это нужно для нормальной работы.

Расчет, проведенный для рассмотренных условий, показывает, что среднее значение тока $I_{ср1n}$ в одном из n контуров с учетом влияния общего источника питания и общего привода подачи определяется выражением

$$I_{ср1n} = I_{ср1} \frac{R + r}{nR + r} [1 - bp(n_x)]^{n-1}, \quad (IX.7)$$

где $p(n_x)$ — вероятность возникновения серий импульсов холостого хода;

b — среднее число импульсов в одной серии.

Величина $bp(n_x)$ может определяться по осциллограммам или, что более удобно на практике, из равенства

$$bp(n_x) = \frac{t}{T}, \quad (\text{IX.8})$$

где $\overline{t}$ — время пауз в общем времени T работы одноконтурной (при $n = 1$) схемы, вызванных реверсированием подачи.

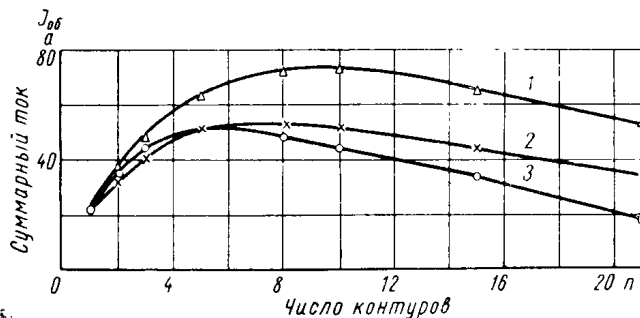


Рис. 113. Зависимость суммарного тока от числа контуров:

1 — $R = 0,07 \text{ мм}$, $\frac{t}{T} = 0,05$; 2 — $R = 0,14 \text{ ом}$, $\frac{t}{T} = 0,05$;

3 — $R = 0,07 \text{ ом}$, $\frac{t}{T} = 0,1$

Величина суммарного для n одинаковых контуров тока $I_{об}$ с учетом равенства (IX. 8) составляет

$$I_{об} = nI_{ср1} \frac{R+r}{nR+r} \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{n-1}. \quad (\text{IX.9})$$

Зависимость (IX. 9) имеет экстремальный характер; суммарный ток достигает максимума при некотором определенном значении n_m , и дальнейшее увеличение числа контуров влечет за собой снижение производительности. Для одного из вариантов обработки в конкретных условиях (при $I_{ср1} = 22 \text{ а}$; $R = 0,07 \text{ ом}$; $R = 0,6 \text{ ом}$ $\frac{t}{T} = 0,05$) зависимость $I_{об} = f(n)$ представлена на рис. 113. Там же для сравнения представлены зависимости при вдвое большем значении R или $\frac{t}{T}$. Как видно из графиков, темп роста суммарного тока, а с ним и производительности, снижается тем больше, чем ближе значение n к n_m , причем n_m и $I_{об}$ уменьшаются при увеличении R и в еще большей степени при увеличении отношения $\frac{t}{T}$. В связи с этим, а также учитывая тот факт, что увеличение

числа контуров связано с усложнением оборудования и обычным для многоинструментной обработки увеличением непроизводительных затрат времени, значения n , выбираемые для практических целей при проектировании технологических процессов или многоконтурных станков, должны быть меньше n_m . Наиболее подходящие значения n для конкретных производственных задач целесообразно определять по графику, построенному для соответствующих условий по формуле (IX. 9).

При необходимости по многоконтурной схеме можно работать одним составным электродом, отдельные части которого изолированы друг от друга и имеют самостоятельные контуры. Примером конструктивного выполнения таких электродов может служить шестиконтурный электрод-инструмент (показанный в гл. VII для одновременного прошивания 48 пазов).

ОБРАБОТКА НА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ СТАНКАХ С НЕСКОЛЬКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Описанные выше варианты многоконтурной обработки относились к станкам с одним источником питания. Менее распространенным, но также перспективным вариантом является использование электроимпульсных станков с несколькими генераторами. Необходимость в применении нескольких генераторов может возникнуть в двух случаях: во-первых, когда мощность одного генератора оказывается недостаточной для питания всех контуров и, во-вторых, когда технологические характеристики, обеспечиваемые генератором, не позволяют одновременно выполнить разные операции.

Станки с общим приводом подачи. В связи с тем, что все контуры таких одношпиндельных станков имеют самостоятельные источники питания, на суммарный ток оказывает влияние только наличие общего привода подачи. Для них величина суммарного тока при n работающих в одинаковом режиме контурах

$$I_{об} = nI_{сп1} \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{n-1}. \quad (\text{IX. 10})$$

Во избежание значительного снижения производительности из-за влияния общего привода число контуров обычно невелико. Например, в универсальном копировально-прошивочном станке мод. 4А724 имеется два контура, питающихся от автономных секций низкочастотного генератора.

При обработке крупных поверхностей число контуров может быть увеличено до трех-четырех. При этом электрод-инструмент делается сборным из отдельных элементов (секций), включенных в параллельные силовые электрические контуры. Секции устанавливаются с зазором, который предотвращает электрический контакт их друг с другом. Для того чтобы в зазорах не скапливались частицы эрозированного металла, способные привести к замыканию секций, через зазоры осуществляют прокачку рабочей среды.

При ширине зазоров между секциями, соответствующей удвоенной величине эрозионного промежутка, на обрабатываемой поверхности остается лишь небольшой буртик высотой до 1—2 мм; если же электроду придается осциллирующее движение, буртик также разрушается.

На рис. 114 дано схематическое изображение многосекционного электрода, а на рис. 115 показан трехсекционный электрод для изготовления штампа на коленчатый вал.

Как показано на схеме (рис. 114), привод подачи электрода 1, состоящего из секций 2, автоматически регулируется по напряжению на том участке эрозионного промежутка 3, где оно минимально. Сигнал для регулирования подачи получают как разность потенциалов на обрабатываемой детали 4 и на выходе сопротивления 5 дополнительного контура. Величину этого сопротивления выбирают гораздо большей, чем сопротивления 6 силовых контуров; подключается сопротивление дополнительного контура одним концом к одному из генераторов 7 или 8, а другим концом — к диодам 9, соединяющим дополнительный контур с секциями электрода. Съем сигнала на регулятор производят с точек 10 и 11.

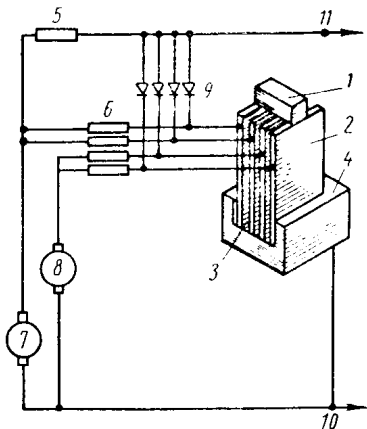


Рис. 114. Секционный электрод и схема регулирования общего привода

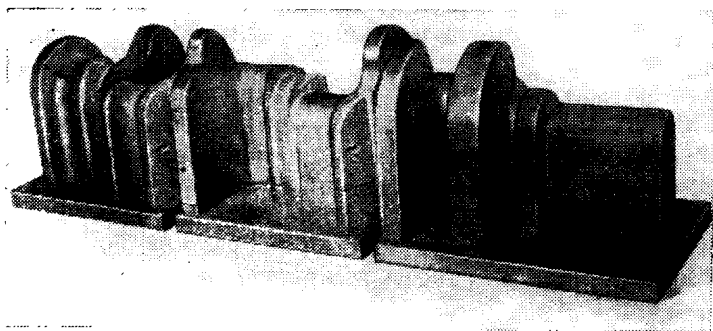


Рис. 115. Трехсекционный электрод для обработки ручья в штампе на коленчатый вал

Станки с независимыми головками. Суммарный ток электроимпульсного станка с автономными головками, имеющими независимые источники питания и приводы подачи, равен сумме токов всех контуров, а производительность его соответствует суммарной

производительности головок. Для n головок, работающих в одном режиме, суммарный ток $I_{об} = nI_{ср1}$. Примером станков с независимыми головками являются универсальный трехшпиндельный станок модели 4725, каждая головка которого питается от своей секции генератора, специализированный двухшпиндельный станок модели 4273Д, одна головка которого может работать от машинного генератора модели МГИ-3М, в то время как вторая питается от высокочастотного генератора модели ВГ-3В, автоматическая линия ЛЛ-1 из 20 автономных блоков и др.

Рассмотренные способы осуществления многоконтурной обработки не исчерпывают всех возможных вариантов, однако они охватывают наиболее принципиальные случаи, к которым могут быть сведены различные конструктивные и технологические решения, встречающиеся на практике. Полученные зависимости могут быть применены при проектировании многоконтурных электроимпульсных станков и связанных общими генераторами станочных линий, а также для выбора наиболее выгодных схем технологических процессов, обеспечивающих максимальную производительность станка. В большинстве случаев промышленного применения не только специальных, но и универсальных электроимпульсных станков целесообразно внедрение многоконтурной обработки, способной обеспечить повышение производительности на наиболее часто встречающихся операциях (обработка штампов, лопаток, фасонных каналов и т. п.) в 2—4 раза, а в отдельных случаях (обработка пазов, отверстий, мелких полостей) в 50—100 раз. Вследствие столь высокой эффективности многоконтурную обработку следует считать одним из основных направлений повышения производительности электроимпульсного метода.

В производственных условиях проверен и может быть рекомендован для внедрения на машиностроительных заводах ряд операций, осуществляемых на электроимпульсных станках.

В число этих операций входит изготовление ручьев ковочных штампов, восстановление изношенных штампов; изготовление формующих полостей в формах для литья, прессформах на пластмассу и резину; обработка рабочих колес газовых турбин и компрессоров; обработка турбинных лопаток; прошивание щелей и глубоких отверстий; обработка тонкостенных деталей, решеток, сеток и сит; обработка соединительных каналов в корпусных деталях; обработка ручьев в валках и ковочных секторах для периодического проката; изготовление копиров и калибров обкаткой; обработка твердосплавных деталей, предварительное (в сочетании с последующей чистовой обработкой на ультразвуковых и шлифовальных станках) изготовление твердосплавных штампов и фильер; клеймение и гравирование; исправление брака закаленных деталей, извлечение сломанного инструмента и деталей крепления.

Хотя указанными операциями далеко не исчерпывается область рационального применения электроимпульсной обработки, но ими охвачены наиболее важные группы деталей и наиболее общие по характеру технологические процессы. Поэтому в определенной мере эти технологические процессы можно рассматривать как типовые и ориентироваться на них при применении электроимпульсной обработки в различных отраслях машиностроения.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОВОЧНЫХ ШТАМПОВ

Обработка ручьев ковочных штампов — типичный случай применения электроимпульсного способа при изготовлении сложных поверхностей объемного профиля. Это одна из первых операций, внедренных на машиностроительных заводах.

Для изготовления ковочных штампов используется большая номенклатура углеродистых (У7А, У8А) и легированных (5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ, 5ХНГ, 7ХЗ, 8ХЗ, 3ХВ8 и др.) сталей. По эрозион-

ной обрабатываемости эти стали как термически обработанные, так и не закаленные мало отличаются от стали 45.

Минимальный допуск на горизонтальные размеры окончательных ручьев штампов для поковок нормальной точности равен 0,15—0,2 мм, а на вертикальные — 0,1 мм. Допуск на окончательные ручки штампов для поковок повышенной точности снижается до 0,1 мм. Заготовительные ручки ковочных молотовых штампов изготавливаются с более широкими допусками.

В нормальных условиях работы точность обработки фасонных профилей электроимпульсным способом соответствует указанным допускам на окончательные ручки штампов нормальной точности и заготовительные ручки всех видов ковочных штампов; при этом работы выполняются электродами, соответственно более точными на исправном и хорошо выверенном оборудовании.

Требования к качеству поверхности ковочных штампов таковы, что на электроимпульсных станках с низкочастотным генератором можно предварительно обрабатывать фасонные поверхности штампов обычно более производительно, чем на копировально-фрезерных станках, применение же высокочастотных генераторов позволяет получить небольшие ковочные штампы без дополнительной слесарной доводки, а при обработке более крупных штампов — существенно уменьшить время ручных работ.

Переход на электроимпульсную обработку позволяет изменить общую схему процесса обработки.

При изготовлении новых штампов в целом состав операций не меняется. Меняется лишь их последовательность: электроимпульсная обработка производится после термической обработки и шлифования базовых поверхностей штампа, вследствие чего устраняется влияние доводки штампов на трудоемкость.

В случае восстановления изношенных штампов технологический процесс изменяется более существенно: совершенно отпадает необходимость в отжиге и закалке, весь цикл восстановления сводится к занижению верхней плоскости штампа, углублению ручья электроимпульсным способом и его абразивной или высокочастотной доводке. Для успешного применения электроимпульсной обработки при восстановлении штампа необходимо избегать при их эксплуатации чрезмерного износа, образования глубоких трещин и т. п.

Электроимпульсная обработка штампов осуществляется на универсальных копировально-прошивочных станках моделей 4А722, 4Б722, 473, 4723, 4А724, 4725 и 4726.

Для крепления штампов на столе станка используются захваты, магнитные плиты и специальные приспособления. Тяжелые штампы обрабатываются без закрепления на столе станка.

Координация электрода относительно обрабатываемого штампа осуществляется с помощью установочных шаблонов, универсальных измерительных средств или специальных приспособлений;

последние часто снабжены направляющими колонками и напоминают по конструкции верхнюю и нижнюю плиты вырубных штампов, причем на нижней плите устанавливается обрабатываемый штамп, а на верхней — электрод-инструмент.

Электроды-инструменты имеют профиль, представляющий собой скорректированное негативное изображение обрабатываемой полости. Размеры рабочей части электрода уменьшаются в направлении нормали к поверхности на величину, равную сумме величин межэлектродного зазора и высоты максимальных поверхностных неровностей; в случае применения осциллирующих головок учитывают амплитуду осцилляции.

Иногда при обработке на частоте 400 *имп/сек* часто повторяющихся штампов применяют поочередно литые алюминиевые и графитированные электроды. Алюминиевые электроды отливают в форму неточно с уменьшением размеров (на сторону) на 1,2—1,5 *мм*, что значительно снижает их стоимость. Окончательные размеры обрабатываемой поверхности штампа придают с помощью более точно изготовленных графитированных электродов. В результате предварительной обработки алюминиевыми электродами припуск под точно изготовленные электроды резко сокращается, что дополнительно повышает стойкость графитированных электродов. В этом случае одним электродом из ЭЭГ можно обработать 20—30 штампов.

При электроимпульсной обработке на частотах 50—100 *имп/сек* в связи с уменьшением износа графитированных электродов до ничтожных величин и расширением диапазона реализуемых мощностей применение алюминиевых электродов излишне, и, как правило, обработка осуществляется только электродами из ЭЭГ.

Фигура штампа предварительно обрабатывается на высокопроизводительных режимах, выбираемых исходя из площади обрабатываемой поверхности. В начале операции или после смены электрода сразу работать с полным использованием мощности нельзя, так как перегрузка вступающих в работу участков профиля электрода-инструмента вызывает нарушение стабильности процесса, повышенный износ электрода и шлакование. Работа осуществляется последовательным переходом через ряд ступеней электрического режима, выбираемых в зависимости от площади электрода, уже вступившей в работу. По окончании черновой обработки электрод заменяется новым, чистовым, и снимается оставшаяся часть припуска. Не доходя до окончательной глубины на 0,4—0,5 *мм*, постепенным снижением электрического режима выводят неровности, образовавшиеся после работы на грубых режимах. Окончательная обработка проводится на чистовых режимах в высокочастотном диапазоне.

Номенклатура штампов, обрабатываемых на электроимпульсных станках, весьма широка. В автотракторной промышленности, например, это штампы на шатуны и крышки шатуна, вилки и чер-

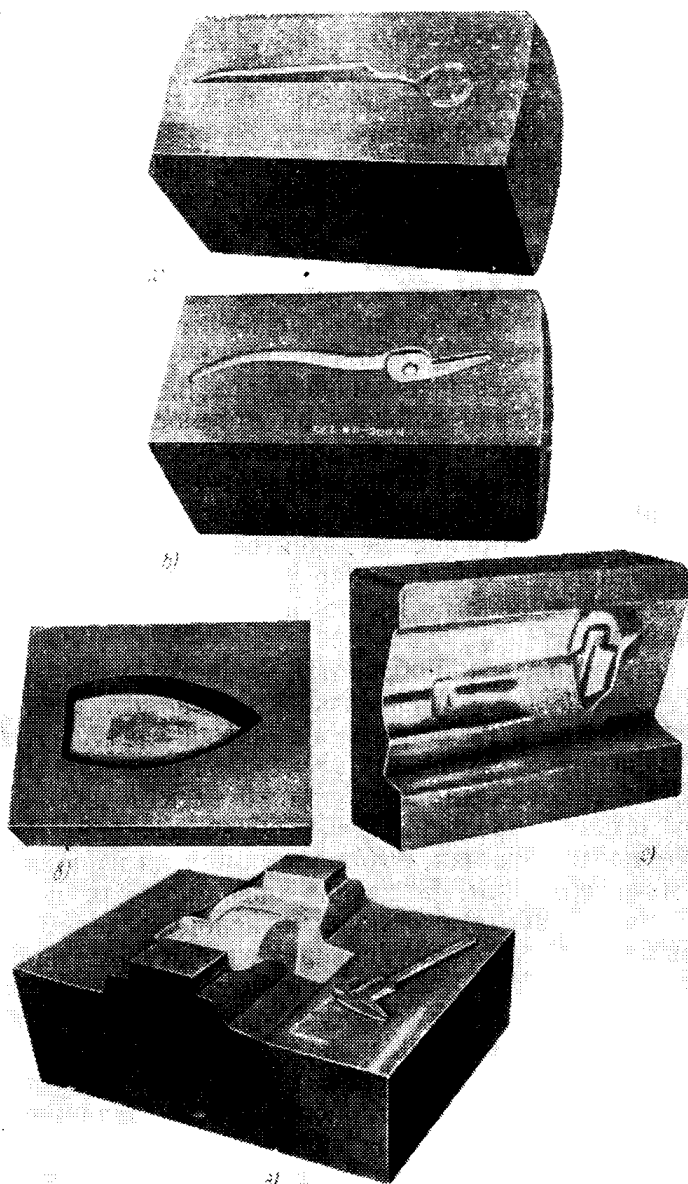


Рис. 116. Штампы на ножницы (а), плоскогубцы (б), утюг (в), турбинную лопатку (г) и поворотный кулак автомобиля (д) после электроимпульсной обработки

вяки рулевого управления, поворотные кулаки, вилки кардана, крестовины дифференциала, коленчатые валы и др. В инструментально-штамповых цехах других отраслей промышленности на электроимпульсных станках обрабатывают штампы на турбинные лопатки, рычаги, крюки, гаечные ключи, ножницы, плоскогубцы, ножи и т. п. (рис. 116).

При изготовлении многоместных штампов, подобных показанным на рис. 117, обработку всех ручьев производят одновременно. При этом применяют многоконтурные наладки, обеспечивающие увеличение производительности в 2—4 раза. К многоконтурным схемам прибегают также при обработке крупных штампов, например, штампов для изготовления коленчатых валов, передней оси и т. п.; в этих случаях обработку ведут секционным электродом, каждая секция которого питается от своего генератора импульсов. Использование секционных электродов обычно целесообразно для фигур штампов, имеющих площадь обрабатываемой поверхности F_p свыше 30—40 тыс. мм².

От величины F_p площади обработки зависит также и целесообразность достижения той или иной чистоты поверхности ручья. Для мелких и средних штампов, обрабатываемых на станках 4Б722 и 4723 площадью $F_p \approx 10 \div 20$ тыс. мм², экономически выгодно получение 5-го класса чистоты поверхности; для средних и крупных штампов, обрабатываемых на станках 4А724 и 4725 с площадью F_p свыше 50—100 тыс. мм² — 4-го класса. После электроимпульсной обработки припуск под последующую слесарную доводку значительно меньше и равномернее, чем после фрезерования, вследствие чего трудоемкость слесарной операции сокращается в несколько раз. Что же касается сокращения трудоемкости обработки ручьев при замене фрезерования, то соответствующие данные приведены в табл. 35.

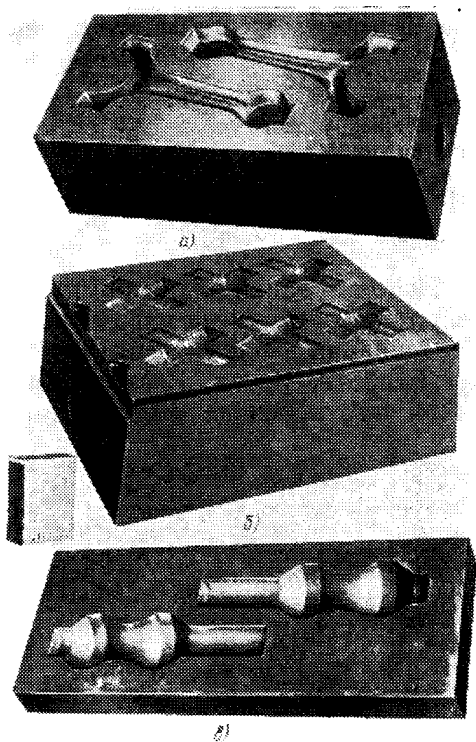


Рис. 117. Многоручьевые штампы на шатун, крестовину и червяк

Ковочный штамп	Время обработки ручьев	
	фрезерованием	электроимпульсным способом
На шатун автомобильного двигателя	7 ч	2 ч 30 мин
На крестовину карданного вала	6 ч	1 ч 30 мин
На вилку карданного вала	8 ч	3 ч
На поворотный кулак грузового автомобиля	21 ч	7 ч
На турбинную лопатку	9 ч	3 ч 30 мин
На червяк рулевого управления	5 ч	2 ч 30 мин
На ножницы	2 ч	15 мин
На плоскогубцы	3 ч	25 мин
На утюг	15 ч	7 ч

Использование электроимпульсной обработки позволяет резко сократить затраты на изготовление кованых штампов.

Основная экономия связана со снижением трудоемкости работ по обработке ручья. Расходы на амортизацию и ремонт оборудования при переходе к электроимпульсной обработке также снижаются в связи с сокращением времени обработки при одновременном уменьшении стоимости оборудования.

Расходы на электроэнергию, потребляемую электроимпульсным станком, часто несколько выше, чем при обработке на копировально-фрезерном станке, но это увеличение не существенно и мало влияет на величину общих затрат. Последнее объясняется тем, что на копировально-фрезерных станках при меньшей мощности установленных двигателей затрачивается больше времени, чем при электроимпульсной обработке.

Расходы на инструмент, используемый при обработке

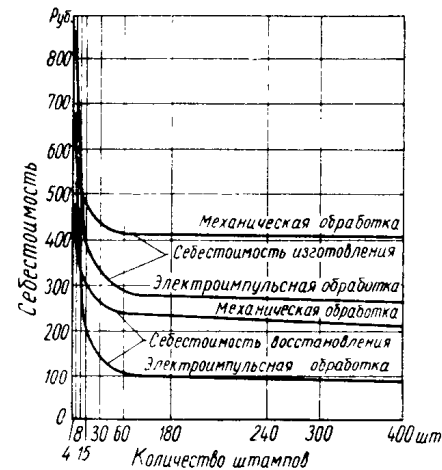


Рис. 118. Зависимость себестоимости восстановления и изготовления штампа для турбинной лопатки от серийности

штампа электроимпульсным способом, близки или несколько превышают аналогичные расходы при механической обработке.

Удельная доля затрат на изготовление электродов-инструментов резко снижается с увеличением серийности и, начиная с серийности 25—30 штампов, мало отражается на стоимости. Влияние серийности на стоимость изготовления и восстановления штампов видно из рис. 118.

Распределение затрат по элементам себестоимости различно для разных штампов, однако известное представление о нем дает калькуляция себестоимости операции на штамп на поворотный кулак грузового автомобиля (табл. 36).

Т а б л и ц а 36

Калькуляция себестоимости операции при механической и электроимпульсной обработке ковочного штампа на поворотный кулак грузового автомобиля

Наименование затрат	Норма в коп./мин		Примечание
	Фрезерование	Электроимпульсная обработка	
Основная и дополнительная заработная плата станочника с начислениями	1,253	0,94	Разряд работы при фрезеровании — 5-й
Стоимость электроэнергии	0,146	0,607	Разряд работы при электроимпульсной обработке — 3-й
Стоимость расхода инструмента	0,26	0,26	Выполнение норм — 120%
Затрата на амортизацию оборудования	0,120	0,105	Электрод-инструмент изготавливается из ЭЭГ
Затраты на содержание станка	0,005	0,004	Расход электродов — 1 шт. на 15 деталей
Стоимость текущего ремонта	0,259	0,317	Стоимость станка модели 4А724—25 тыс. руб.
Итого себестоимость одной станкоминуты	2,044	2,234	
Норма в станкоминутах	1260	420	—
Себестоимость операции	25 р. 40 к.	9 р. 37 к.	

Помимо непосредственного экономического эффекта, переход на электроимпульсную обработку позволяет сократить технологический цикл, уменьшить количество операций, сократить производственные площади (так как один электроимпульсный станок заменяет два-три фрезерных). Кроме того, сокращается потребность в высококвалифицированных кадрах фрезеровщиков и слесарей-инструментальщиков.

Весьма важным является улучшение условий труда. Слесарная обработка ведется обычно абразивным инструментом или шарошками с применением высокооборотных пневмо- и электромашинок. Это приводит к профессиональным заболеваниям — виброболезни и силикозу. Сокращение трудоемкости доводочных

работ, резкое уменьшение их доли в общем объеме слесарных работ по изготовлению штампа позволяет избежать столь тяжелых последствий.

Наибольший технический и экономический эффект достигается при организации в инструментально-штамповом цехе специального участка для электроимпульсной обработки штампов. Участок комплектуется электроимпульсными станками в таком количестве и таких типоразмеров, чтобы обеспечить потребность производства в соответствующей номенклатуре штампов. Кроме электроимпульсных станков, участок оснащается моечной машиной, установкой для очистки масла, вихрекопировальным станком для изготовления электродов, мембранным насосом для откачки отработавшего масла из станков.

Наиболее важным преимуществом размещения электроимпульсных станков на одном участке является удобство для многостаночного обслуживания, один рабочий обслуживает два-три электроимпульсных станка. Кроме того, на участке нет необходимости иметь полный набор всех приспособлений на каждый станок — некоторые из них могут использоваться на разных станках по очереди.

ОБРАБОТКА ФОРМ ДЛЯ ЛИТЬЯ, ПРЕССФОРМ НА ПЛАСТМАССУ И РЕЗИНУ

В промышленности быстро возрастает применение точного литья и расширяется производство пластмасс, что приводит к резкому росту потребности в литейных формах, прессформах на пластмассу и резину.

Литейные формы и прессформы отличают от ковочных штампов более высокие требования к качеству обработки формирующих полостей и повышенная точность. Требуемая чистота поверхности достигает 10-го класса при допусках на размеры формирующих полостей 0,03—0,05 мм.

Обычные методы механической обработки сложных формирующих полостей литейных форм и прессформ малоэффективны: трудоемкость обработки (особенно слесарной) в связи с резким повышением точности и высокими требованиями к чистоте поверхности увеличивается в несколько раз, а нередко и в десятки раз по сравнению с трудоемкостью механической обработки ручьев ковочных штампов близких размеров и формы. При этом время обработки формирующих полостей составляет 70—90 % от общего времени изготовления прессформ.

При использовании в этом случае электроимпульсного способа трудоемкость сокращается (по сравнению с механической обработкой) в значительно большей степени, чем при электроимпульсной обработке штампов. Это объясняется тем, что при электроимпульсном способе с переходом от обработки ковочных штампов к обработке прессформ время черновой обработки не изменяется.

Увеличение трудоемкости обусловлено только возрастанием времени чистовой высокочастотной электроимпульсной доводки (не превышающего 40—50 % от времени черновой обработки) и некоторым сравнительно небольшим увеличением вспомогательного времени, связанного с более тщательной установкой обрабатываемой прессформы и электродов-инструментов, и дополнительными проходами, при которых происходит уточнение профиля без существенного съема металла.

Если форма подвергается термической обработке, то электроимпульсная обработка, как правило, производится после термической обработки и шлифования базовых поверхностей заготовки. При этом в зависимости от конкретной детали обрабатывается либо вся фигура с самого начала, либо более сложная фасонная ее часть, а простая поверхность полости фрезеруется заранее. Когда требуется удалить большой объем металла, под электроимпульсную обработку делается освобождение, т. е. часть припуска снимается заранее.

На рис. 119 показаны различные представители прессформ и литевых форм, обработанных электроимпульсным методом. Трудоемкость изготовления прессформ при замене механической обработки электроимпульсной снижается в отдельных случаях (табл. 37) свыше 10 раз (в зависимости от сложности формующих полостей).

В отношении выбора параметров процесса и его построения электроимпульсная обработка форм не имеет существенных отличий от обработки ковочных штампов.

Т а б л и ц а 37

Наименование форм	Время обработки полостей	
	фрезерованием	электроимпульсным способом
Форма для отливки корпуса электродвигателя	80 ч	12 ч
Форма для литья клеммной коробки	105 ч	7 ч
Прессформа на пластмассовую шестерню	Не изготавливается	45 мин
Прессформа на рукоятку радиоприемника	2 ч 50 мин	1 ч
Прессформа на штепсельную вилку	2 ч	35 мин
Прессформа на подошву альпинистской обуви	20 ч	8 ч
Пуайсон резинообувной прессформы	6 ч	1 ч 50 мин
Прессформа на рукоятки к велосипедам	32 ч	3 ч 20 мин

Прессформы с глянцевыми формирующими поверхностями подвергаются высокочастотной обработке на токах 2—5 а, доводятся до чистоты поверхности, соответствующей 6-му (на границе 7-го) классу, а затем полируются. Припуск после высокочастотной электроимпульсной обработки составляет 0,05—0,1 мм, располагается равномерно и легко удаляется обычными методами полирования. Характер эрозированной поверхности, неровности которой имеют форму неровных острых пичков, облегчает полирование,

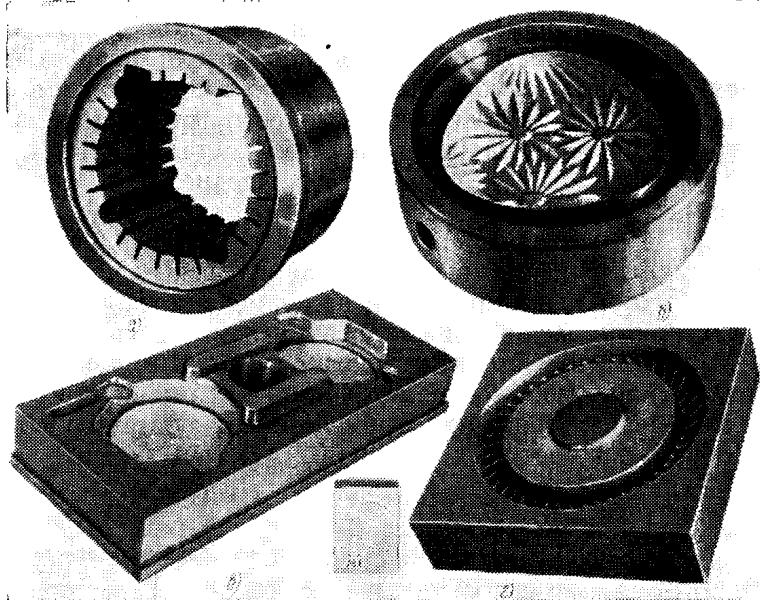


Рис. 119. Формы для литья корпуса электродвигателя (а), пепельницы (б), клеммной коробки (в), прессформы на пластмассовое зубчатое колесо (г)

а легко различима разница между матовой эрозированной и блестящей полированной поверхностями позволяет слесарю избежать многократных проверок размеров по шаблонам, а контролировать форму в ходе ручной обработки в основном визуально, «на блеск».

Часть форм, предназначенная для прессования деталей, допускающих матовую поверхность, может быть изготовлена без полирования. В первую очередь — это формы на резиновые изделия. Требования к чистоте поверхности у них ниже, чем у форм на пластмассу, вследствие чего в большинстве случаев можно с помощью высокочастотных генераторов полностью исключить необходимость в ручной доводке поверхности. Слесарю остается только удалить штырьки или выступы, остающиеся из-за отверстий в электроде для прокачки масла. К этой группе форм относятся

многочисленные формы на детали обуви, вулканизационно-покрышечные прессформы и т. п. (рис. 120).

Весьма удобны электроимпульсные станки при ремонте форм, при подгонке размеров уже готовой формы по прессуемой детали и в случае, когда съем припуска необходимо производить без отжига формы.

Прессформы и формы для литья обрабатываются на универсальных копировально-прошивочных станках. Только для крупных

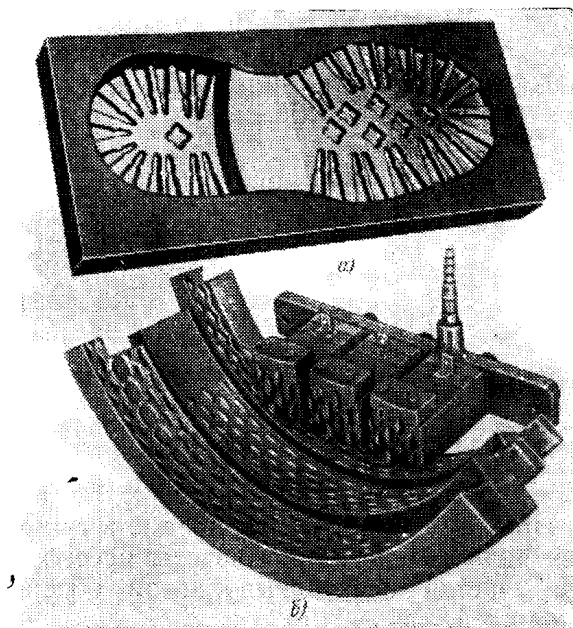


Рис. 120. Прессформа на резиновую альпинистскую обувь и вставки вулканизационно-покрышечной прессформы с электродом

вулканизационно-покрышечных прессформ шинной промышленности применяются специальные станки, работающие по многоконтурным схемам.

В связи с необходимостью изготовления специальных электродов минимальная серийность форм, переводимых на изготовление электроимпульсным способом, обычно не должна быть меньше 5—6 шт. в год. В случае изготовления многоместных прессформ целесообразность применения многоконтурных наладок также определяется в зависимости от серийности.

Увеличение серийности и сопутствующие этому выгоды в наибольшей мере достигаются при организации централизованного производства литьевых форм и прессформ. В табл. 38 дано сопо-

ставление технико-экономических показателей существующего в одном из экономических районов производства форм в инструментальных цехах и показателей централизованного производства с применением электроимпульсного способа (при одинаковом для обоих случаев выпуске 17 500 форм в год.).

Как видно из табл. 38, переход на централизованное производство с применением электроимпульсного способа обработки дает при указанной программе сокращение числа работающих, уменьшение производственных площадей и оборудования примерно в 2 раза при общей годовой экономии 5,9 млн. руб., или 42 % от всей стоимости изготовления. В то же время сокращаются подготовка производства, количество инструмента второго порядка, сроки освоения новых форм, улучшается их качество.

Т а б л и ц а 38

Показатели	Существующее производство	Централизованное производство	Показатели	Существующее производство	Централизованное производство
Количество занятых рабочих	3 100	1600	Количество единиц оборудования в шт.	1200	500
Производственные площади в м ² . .	18 000	9000	Стоимость изготовления в млн. руб.	13,9	8,0

В связи со столь высокой эффективностью в типовых проектах заводов для централизованного производства прессформ и штампов предусмотрены участки электроимпульсной обработки формообразующих полостей.

ОБРАБОТКА РАБОЧИХ КОЛЕС ГАЗОВЫХ ТУРБИН И КОМПРЕССОРОВ

Рабочие колеса работают в тяжелых условиях при больших температурах и нагрузках; они являются наиболее ответственными и в то же время наиболее трудоемкими деталями турбин и компрессоров. Получены хорошие результаты по изготовлению методом прошивания также и в ы р у б н ы х одно- и особенно многопуансонных стальных штампов комбинированным электродоминструментом.

Снижение прочностных характеристик литых заготовок против кованных, дефекты при сварке, применение сплавов, вообще непригодных для литья, — все это заставляет в ряде случаев применять целые диски и обрабатывать их резанием, производительность которого при существующих марках сплавов и в особенности при переходе к новым маркам жаропрочных материалов не может удовлетворить требованиям серийного производства.

Основной операцией механической обработки является фрезерование межлопаточных каналов, формы которых отличаются большой сложностью (рис. 121). Замена этой операции электроимпульсной обработкой позволяет наряду с преодолением трудностей производственного характера решить ряд конструкторских задач по созданию новых конструкций газотурбинных двигателей и других важных объектов.

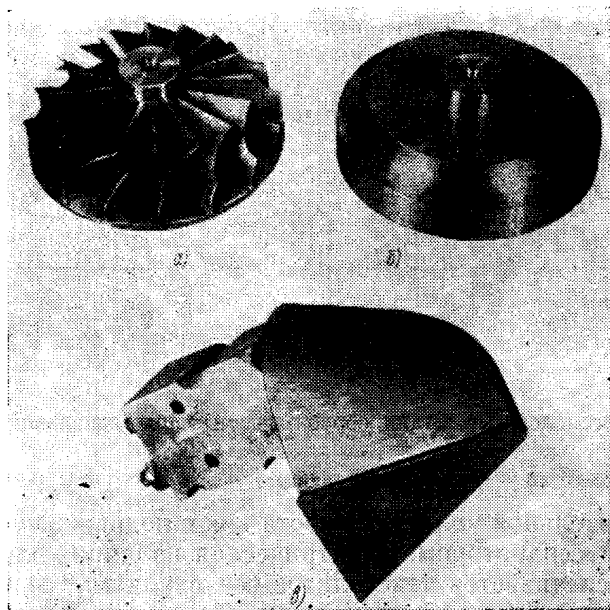


Рис. 121. Рабочее колесо газовой турбины (а), заготовка (б) и электрод-инструмент (в) для ее обработки

Колеса можно изготавливать на универсальных электроимпульсных станках и — при достаточно больших сериях — на специализированных станках (мод. 4723Д и др.).

Обычная схема обработки на универсальных станках такова: заготовка в виде диска (рис. 121, б) соответствующей формы устанавливается на оправке делительного приспособления, фиксируется на время обработки канала и по окончании операции поворачивается на небольшой угол для обработки очередного канала.

Фасонная поверхность изделия получается в результате копирования формы электрода-инструмента (рис. 121, в), который представляет собой негативное изображение полости канала и выполнен с уменьшением размеров рабочей части в перпендикулярном к обрабатываемой поверхности направлении. Величина занижения размеров электрода определяется припуском, оставляемым на последующую обработку поверхности, и величиной рабочего

зазора между инструментом и заготовкой во время эрозионного процесса.

Электрод-инструмент вставляется в патрон станка или устанавливается на двух штифтах и крепится эксцентриком в электрододержателе, выполненном в виде каретки, перемещающейся по направляющим колонкам делительного приспособления. Во избежание заеданий во втулках при попадании в них загрязненной рабочей жидкости применяют шариковые направляющие. При этом

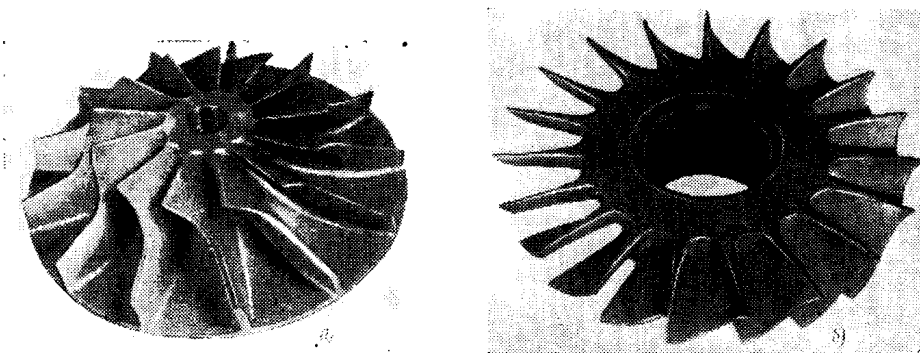


Рис. 122. Многополостные детали, обрабатываемые при радиальной подаче электродов:

а — рабочее колесо; б — спрямляющий аппарат

удовлетворительной является работа как с подвижным, так и с закрепленным сепаратором. Электрическая изоляция электрододержателя обеспечивается текстолитовыми втулками, в которых запрессованы направляющие гильзы. Трущиеся детали приспособления защищаются от попадания эрозированных частиц из рабочей жидкости сальниковыми уплотнениями. Связь каретки со шпинделем станка осуществляется с помощью конического хвостовика, шарнирно закрепленного в электрододержателе.

Наиболее рациональным планом операции является обработка по очереди всех каналов колеса вначале на производительном черновом режиме (при этом в качестве инструмента используется изношенный электрод), а затем на чистовом. Чистовой проход осуществляется новым электродом, который затем может быть либо восстановлен до номинальных размеров, либо использован для чернового прохода при обработке следующей заготовки. Преимущества такого построения технологического процесса наилучшим образом реализуются при использовании высокостойких электродов-инструментов из ЭЭГ, когда становится возможным свести расход электродов до 1 шт. на колесо при одной-двух сменах инструмента. Для удешевления электродов и с целью повышения точности установочная часть их делается металлической, а рабочая часть из ЭЭГ выполняется сменной.

Достигнутая скорость внедрения электрода в детали этого типа при поддержании оптимального режима обычно составляет 0,5—2 мм/мин.

В связи с тем, что обработка резанием затруднена одновременно и сложной формой обрабатываемых поверхностей, и чрезвычайно низкой обрабатываемостью применяемых материалов на основе никеля, титана и т. п., эффективность нового технологического процесса высока: трудоемкость операции снижается в 10 раз. Так, например, время обработки рабочего колеса диаметром около 300 мм из жаропрочного сплава ЭИ661 (рис. 122, а) составило 35 ч вместо 350 ч при фрезеровании, что обеспечивает экономию свыше 400 руб. на деталь. Распределение затрат на операцию при фрезеровании и электроимпульсной обработке приведено в табл. 39.

Наличие у деталей типа рабочего колеса или ротора значительного числа одинаковых полостей — межлопаточных каналов позволяет осуществить обработку нескольких из них одновременно: при этом целесообразное число контуров определяется в зависимости от возможностей оборудования и масштаба производства.

Т а б л и ц а 39

Наименование затрат	Норма в коп/мин		Примечание
	Фрезерование	Электроимпульсная обработка	
Основная и дополнительная заработная плата станочника с начислениями	1,46	0,944	Разряд работы при фрезеровании — 6-й, при электроимпульсной обработке — 3-й
Стоимость электроэнергии	0,156	0,312	Выполнение норм в обоих случаях — 120%
Стоимость расхода инструмента	0,78	0,2	Электрод-инструмент изготавливается из ЭЭГ
Затраты на амортизацию	0,012	0,072	вихревым копированием, расход электродов — 1 шт. на одну деталь
Затраты на содержание станка	0,005	0,005	
Стоимость текущего ремонта	0,259	0,317	Стоимость станка мод. 4723Д — 18 тыс. руб.
Итого себестоимость одной станкоминуты	2,673	1,850	
Норма в станкоминутах	17 460	2100	—
Себестоимость операции	466 р. 65 к.	38 р. 85 к.	

При расположении лопаток не по периферии, а на торце диска (рис. 123, а), обработка производится в осевом направлении, причем в этом случае обрабатываются все каналы одновременно. Электрод может набираться из секций или изготавливаться из одного бруска (рис. 123, в). Поскольку механическая обработка колес с лопатками на торце проще, чем радиальных, выигрыш в произ-

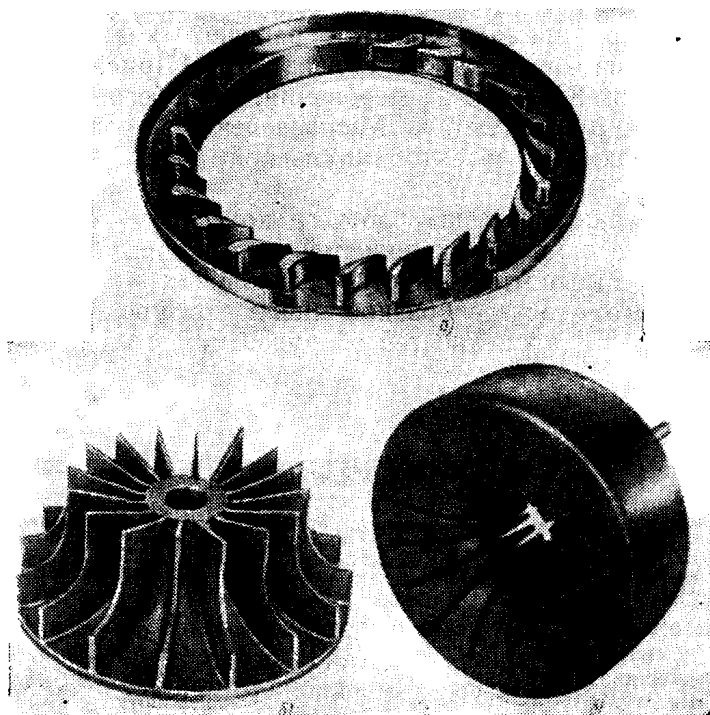


Рис. 123. Сопловой аппарат (а) и рабочее колесо (б), обрабатываемые при осевой подаче электрода (в)

водительности при переходе на электроимпульсную обработку несколько ниже: например, для колеса диаметром около 200 мм из жаропрочного сплава, показанного на рис. 123, б, время электроимпульсной обработки 4 ч вместо 20 ч, затрачиваемых на фрезерование.

ОБРАБОТКА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

Большая доля трудоемкости изготовления газотурбинных двигателей приходится на изготовление турбинных и компрессорных лопаток. С появлением ряда новых жаропрочных сплавов,

применяемых для лопаток, трудности механической обработки непрерывно возрастают: скорости резания снижаются до нескольких метров в минуту, стойкости режущего инструмента между переточками хватает на обработку всего четырех-пяти заготовок. Вследствие указанных обстоятельств обработка лопаток резанием в ряде случаев становится нерентабельной и часть операций заменяется электроимпульсной обработкой.

В зависимости от серийности обработку лопаток можно осуществлять на универсальных электроимпульсных станках типа 4Б722 и 4723 или на специальном оборудовании.

На универсальных станках лопатка обрабатывается последовательно: вначале со стороны корыта, а затем со стороны спинки, или наоборот. На специальном оборудовании применяют либо эту же последовательность операций, либо ведут одновременную обработку лопатки с обеих сторон. Например, на специальном станке модели МЭ-8 спинка и корыто пера лопатки обрабатываются одновременно двумя шпиндельными головками с электродами, подаваемыми навстречу друг другу к лопатке, установленной между ними.

Электроимпульсная обработка турбинных лопаток применяется как в опытном производстве, когда заготовкой служит брусок, так и в серийном производстве при изготовлении лопаток из штамповок. В серийном производстве турбинных лопаток электроимпульсная обработка приобретает большое значение, особенно в тех случаях, когда заготовка лопатки имеет облой и значительный неравномерно распределенный припуск, а форма готовой лопатки характеризуется большим углом закрутки и сложными переходными поверхностями.

На рис. 124 показана лопатка, изготовленная из бруска, причем вследствие наклонной установки детали на столе станка одновременно с обработкой пера обеспечено и необходимое поднутрение на полках. На рис. 125 показана лопатка, изготовленная из штамповки. В настоящее время горячее штампование является основным способом получения заготовок, однако получение точной штамповки оказалось для многих жаропрочных материалов трудной задачей.

Применение электроимпульсной обработки как предварительной в сочетании с последующей электрохимической обработкой позволяет практически исключить из технологического процесса лезвийный инструмент, стойкость которого весьма мала.

В приведенном случае электроимпульсная обработка осуществляется калибровкой неточной штамповки. Она обеспечивает ста-

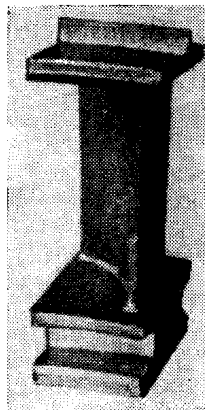


Рис. 124. Лопатка из бруска с наклонной полкой

бильность и равномерность распределения припусков, оставляемых под последующую обработку, и в значительной мере решает проблему получения точной заготовки для тех жаропрочных сплавов, из которых ее не удастся получить штамповкой. Калибрование включает одновременную обработку всех поверхностей лопатки, включая перо и замковую часть, а также снятие облоя, образуемого в процессе штамповки, с оставлением припуска под последующую электрохимическую и абразивную обработку в пределах 0,7—1,0 мм.

Вследствие отсутствия сил резания при электроимпульсном калибровании нет надобности в жестких базах, и базирование

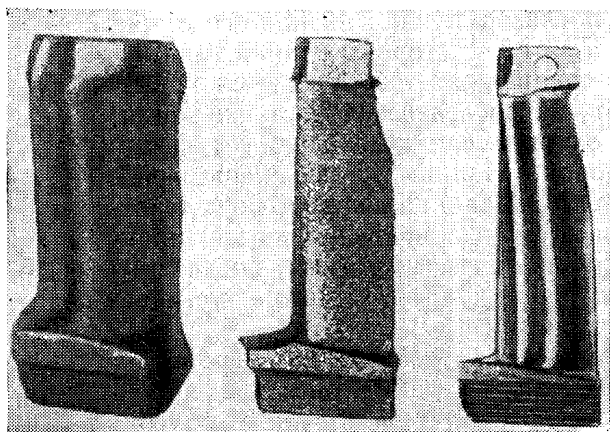


Рис. 125. Штампованная заготовка, лопатка после электроимпульсного калибрования и шлифования

осуществляют по трем центровым отверстиям, два из которых располагается на торце замка и одно — на торце технологической бобышки. Такая установка лопаток может осуществляться в обычных станочных приспособлениях или в приспособлениях-спутниках; последние особенно удобны при обработке лопаток на автоматических линиях.

Если до сих пор автоматизация производства лопаток сдерживалась из-за отсутствия точной заготовки, то с применением электроимпульсного калибрования автоматизация производства лопаток становится вполне осуществимой.

Устойчивость электроимпульсного процесса обработки на низкой частоте и получаемая при этом достаточно большая стойкость электродов дали возможность создать впервые в машиностроении многоконтурную автоматическую линию электроимпульсного калибрования лопаток. Как обычно, при автоматизации производства особо высокие требования предъявляются к инструменту: электроды должны быть взаимозаменяемыми, быстросменными,

должны обеспечивать точное взаимное положение поверхностей корыта и спинки. Для обеспечения этих требований электрод выполняется сборным — рабочая его часть из ЭЭГ соединена с металлической опорной частью при помощи «ласточкина хвоста» и двух штифтов. Рабочие поверхности электрода обрабатываются после сборки, и при дальнейшей его эксплуатации, включая «переточки», разъединение опорной и рабочей частей не допускается. Изношенные электроды допускают 10—15 восстановлений.

При автоматизированном производстве трудоемкость соответствующих операций обработки лопатки снижается от 100—120 до 35 мин при коренном улучшении ряда технологических и эксплуатационных показателей: сокращении числа операций, уменьшении количества потребного оборудования, производственных площадей и т. п. Получающийся в процессе эрозии порошок жаропрочных металлов является ценным сырьем для порошковой металлургии.

ПРОШИВАНИЕ ЩЕЛЕЙ И ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

Электроимпульсным способом прошиваются узкие щели, фрезеровать которые трудно или даже невозможно. Щели шириной 0,4—0,8 мм прошиваются на глубину до 20 мм, при ширине 2,5—10 мм глубина прошивания достигает 80—100 мм. На рис. 126 показано прошивание подковообразной щели в детали типа вилки. Время обработки 15 мин, другими способами щель не изготавливается.

На рис. 127 показана щель глубиной 90 мм переменного сечения, прошиваемая в детали из жаропрочного сплава. Максимальная ширина щели $4 \pm 0,15$ мм и минимальная $0,6 \pm 0,2$ мм. На том же рисунке показаны конструкции электродов, применяемые при прошивании; все они, кроме электродов для окончательного калибрования щели, выполнены с такими отклонениями от формы щели, чтобы облегчить эвакуацию продуктов эрозии. Обычно, если глубина щели превышает 8 мм, электрод делают с занижением от рабочего торца назад или Т-образной формы, чтобы облегчить эвакуацию продуктов эрозии в боковом зазоре между электродом и изделием. Там, где это позволяет ширина щели, электрод-инструмент изготавливается в виде лопатки. Высо-

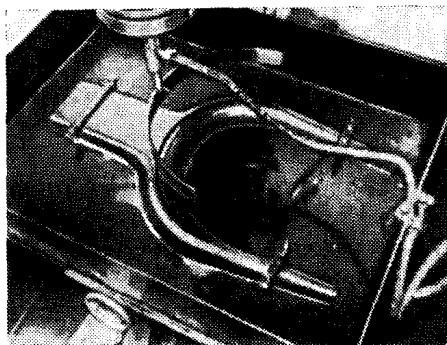


Рис. 126. Прошивание щели на электроимпульсном станке

та рабочей части электрода равна 2—3 мм. Толщина хвостовой части электрода, изготовленного в виде лопатки, уменьшается против рабочей части на несколько десятых миллиметра. Электроды-инструменты, применяемые при прошивании узких (менее 0,6 мм) глубоких щелей, изготавливаются обычно из меди, для увеличения жесткости они хромируются, иногда обыскиваются.

Скорость прошивания щелей по глубине составляет 0,5—0,8 мм. Чистота обработанной поверхности до 5—6-го классов.

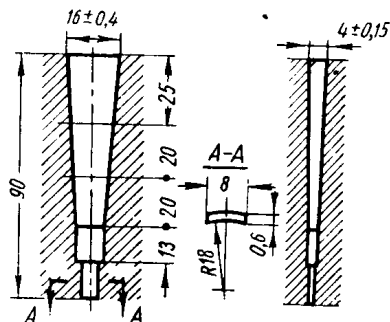
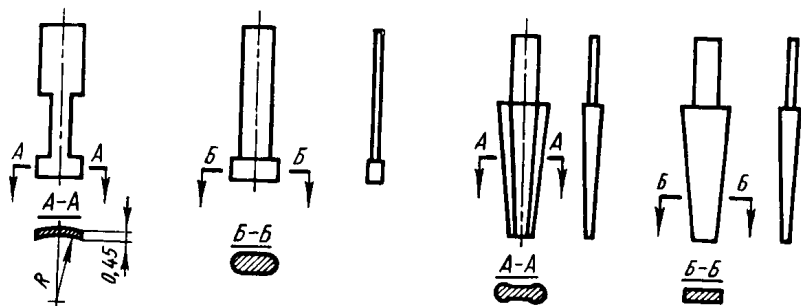


Рис. 127. Щель переменного сечения и электроды для ее изготовления по частям



Аналогичным образом производится обработка глубокого отверстия. Электроды имеют грибообразную форму: у них должен быть утолщенный рабочий конец. Сквозь отверстие в электроде прокачивается рабочая жидкость. Если отверстие круглое, инструменту можно придавать вращательное движение. Величина подачи составляет 0,5—1,0 мм/мин. В тех случаях, когда деталь из материала с пониженной эрозионной обрабатываемостью (например, при обработке вольфрамовых тиглей), подача соответственно снижается.

Прошивание щелей — довольно распространенная операция. Щели прошиваются в дросселях, лопатках, цангах, волноводах и других деталях. Прошивание же глубоких отверстий применяется реже, а изготовление электроимпульсным способом отверстий с отношением длины к диаметру, равным 50—100, вообще является уникальной операцией. Также очень редко обрабатываются отверстия с криволинейной осью.

ОБРАБОТКА ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, РЕШЕТОК, СЕТОК И СИТ

Тонкостенные детали сложны в изготовлении главным образом из-за того, что они легко деформируются силами резания при механической обработке. Особенно сложной является обработка тонкостенных деталей, изготовленных из жаропрочных, нержавеющих и других труднообрабатываемых сталей и сплавов, а также сотовых конструкций. Электроимпульсной обработкой можно

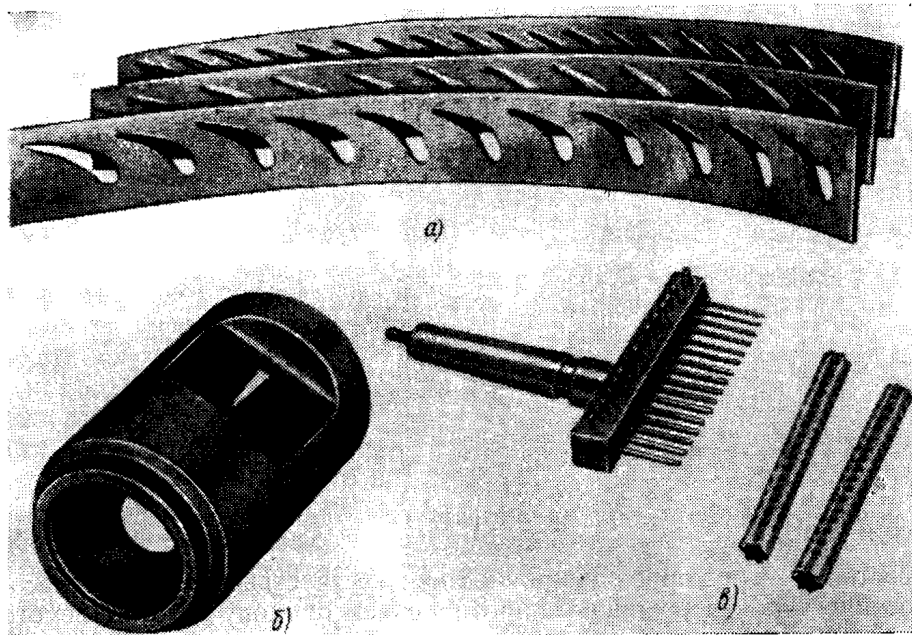


Рис. 128. Тонкостенные детали после электроимпульсной обработки отверстий: а — бандаж турбины; б — деталь дросселя; в — детали фильтра с электродом

прошивать отверстия в таких тонкостенных деталях, как кольца сопловых аппаратов, фильтры, сита для химической промышленности и т. п.

Одновременно обрабатывается большое число отверстий простой формы (круглые, прямоугольные) и фасонного профиля (отверстия под лопатку турбин, треугольные щели и т. п.). Достижимая точность обработки $0,03\text{--}0,1\text{ мм}$ при чистоте поверхности до 5—6-го классов. В качестве примера на рис. 128 показаны бандаж турбин с фасонными отверстиями под лопатки, а также деталь дросселя с треугольной щелью после их электроимпульсной обработки. Время обработки одного отверстия составляет 2—3 мин, причем почти полностью устраняется надобность в ручных слесарных работах. На том же рисунке показана деталь фильтра

с отверстиями, расположенными рядами. Обработка осуществляется с помощью многоэлектродного инструмента на универсальном электроимпульсном станке. Применение электроимпульсной обработки в указанном случае позволило решить проблему изготовления фильтров новой конструкции, для которых механическая обработка и штамповка оказались непригодными в связи с деформацией деталей и появлением на краях отверстий заусенцев.

В химической, бумажной, консервной, пищевой и других отраслях промышленности применяются сита с круглыми и щелевидными отверстиями. Сита должны обладать высокой устойчи-

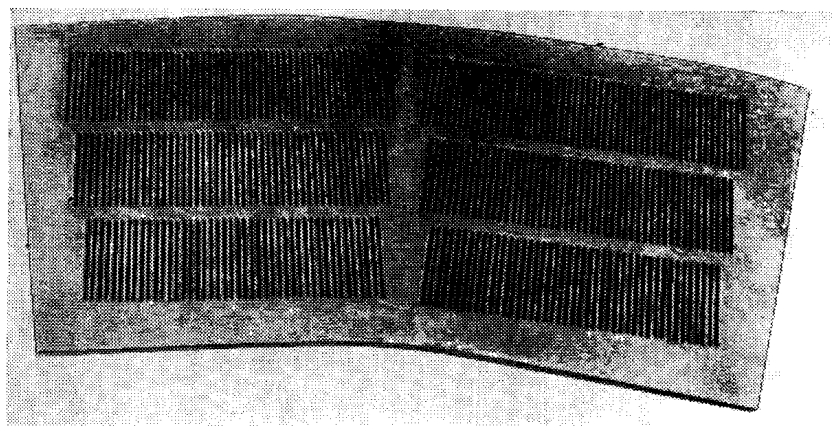


Рис. 129. Сегмент сита на центрифугу

востью против коррозии, прочностью, жесткостью, высокой износостойкостью и небольшим сопротивлением проходу изготавливаемого продукта. Этим требованиям удовлетворяют сита из нержавеющей стали, но из-за трудностей изготовления отверстий в этом материале в промышленности, как правило, применяются сита из цветных сплавов.

Сита небольших размеров могут изготавливаться на универсальных электроимпульсных копировально-прошивочных станках. Однако для полной реализации возможностей электроимпульсного способа и получения высокой производительности созданы специализированные станки (модели 4Ц24 для щелевидных сит и модели МЭ-9 для круглых сит).

Сита из листового материала с щелевидными отверстиями обрабатываются медными или графитированными электродами прямоугольной формы, которые устанавливаются в специальной многоконтурной державке. Комплект сит на центрифугу, состоящий из 24 сегментов (один из них показан на рис. 129) с общим числом около 8000 щелей, изготавливается за 180 ч, что вдвое быстрее механической обработки.

Изготовление сеток с круглыми отверстиями на электроимпульсных станках также весьма эффективно, несмотря на то, что заменяемые операции, такие как сверление или штампование отверстий, достаточно просты. Выигрыш достигается главным образом тем, что одновременно прошиваются сотни, а иногда и тысячи отверстий. Так, например, на станке модели МЭ-9 работают четыре набора медных электродов-проволочек, закрепленных в электрододержателе с помощью заливки припоем. Одновременно обрабатывается около 8000 отверстий диаметром 0,9 мм. Экономический эффект подобных операций может достигать большой величины (для станка МЭ-9 35 тыс. руб. в год). При этом можно увеличить живое сечение сит до 35—38 %, что, в свою очередь, обеспечивает увеличение производительности химических отсадочных и тому подобных машин.

Аналогичные операции могут выполняться и на универсальных станках, включаемых по многоконтурной схеме. В связи с тем, что мощность универсальных электроимпульсных станков достаточно велика, их можно применять для изготовления пазов и отверстий с размерами от нескольких миллиметров и выше.

По характеру операций к изготовлению сеток и сит близка электроимпульсная обработка деталей типа решеток. Одна из таких деталей (рис. 130) диаметром 290 мм из нержавеющей стали 1Х18Н9Т имеет 48 кольцевых пазов шириной 6,4 мм. Время обработки одновременно всех пазов на глубину 18 мм с по-

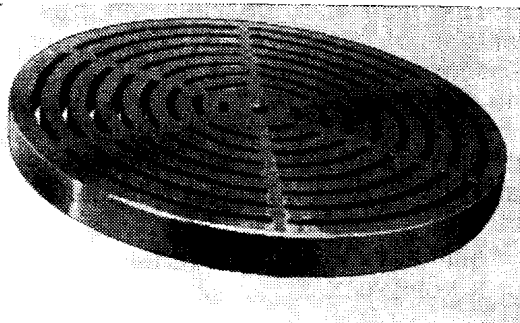


Рис. 130. Решетка запорного устройства: кольцевыми пазами

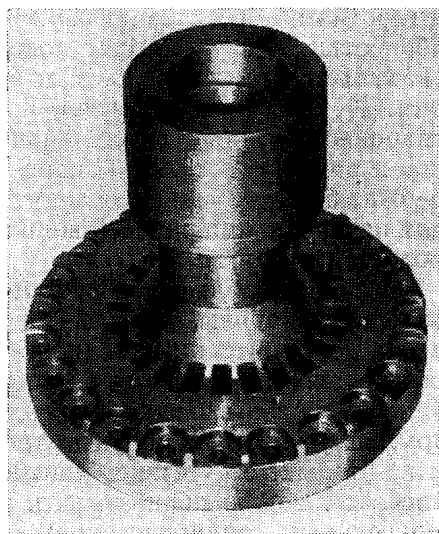


Рис. 131. Фланец с прямоугольными окнами

мощью шестиконтурного графитового электрода 4 ч, что в несколько раз меньше времени фрезерования.

При переходе к большим габаритным размерам выигрыш во времени возрастает в еще большей степени.

Так, при изготовлении 48 прямоугольных окон в детали, показанной на рис. 131, общая трудоемкость при механической обработке в зависимости от размеров детали составляла от 70 до 340 ч, причем расходовалось большое количество режущего инструмента. Многоконтурная электроимпульсная обработка, осуществляемая на специальном станке одновременно 24 электродами из ЭЭГ, сокращает машинное время с 340 до 50 ч.

ОБРАБОТКА СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ В КОРПУСАХ

Известно большое число конструкций, у которых отдельные полости должны соединяться каналами, малодоступными для обычного металлорежущего инструмента. Такие конструкции при использовании обычных методов механической обработки должны выполняться разъемными или со специальными технологическими отверстиями, обеспечивающими доступ инструмента к местам обработки, что усложняет конструкцию, а в ряде случаев резко сказывается на надежности и эксплуатационных качествах изделия. К указанному случаю в первую очередь относятся детали гидронасосов, регуляторов давления, распределительных золотников и ряда других узлов гидро- и пневмоаппаратуры, которые содержат большое число соединительных каналов, предназначенных для перепуска рабочей жидкости или сжатого воздуха из одних полостей в другие.

Электроимпульсная обработка позволяет изготавливать соединительные каналы, не прибегая к усложнению конструкции и не вводя дополнительных технологических отверстий и выемок. Это обеспечивается, во-первых, отсутствием механического контакта между обрабатываемой поверхностью и электродом-инструментом, позволяющим снизить требования к жесткости последнего, и во-вторых, отсутствием движения резания. Электроимпульсным способом можно обрабатывать каналы некруглого сечения (прямоугольные, эллиптические), размещать их в труднодоступных местах, исключать внешние трубопроводы. Непосредственное соединение рабочих полостей без дополнительных сверлений и технологических заглушек дает возможность проектировать и выполнять гидро- и пневмоагрегаты более компактными и обеспечивает полную герметичность каналов.

Обрабатывать можно корпусные детали из черных и цветных металлов, причем чаще в производстве встречаются корпуса из алюминиевых сплавов. Наилучшую стойкость при достаточно высокой производительности по алюминию имеют электроды из

графитированного материала ЭЭГ, в отдельных случаях применяют медные электроды. Это целесообразно, когда размер канала велик и вместо обработки по всему сечению отверстия производят трепанацию пустотелыми (чаще трубчатыми) электродами.

Инструмент, применяемый при обработке гидроаппаратуры, состоит из державки для закрепления в шпинделе электроимпульсного станка и траверсы, в которой крепится сменная часть из эрозионнотойкого материала. На траверсу надевается втулка из изолирующего материала, ограничивающая перемещение инструмента и не допускающая электрического контакта между траверсой и обрабатываемой деталью. Одновременно втулка служит для фиксации положения инструмента относительно обрабатываемой детали.

Инструмент на заданный размер устанавливается двумя способами. Инструмент вводится внутрь расточки обрабатываемой детали до упора торца ограничивающей втулки в наружный торец

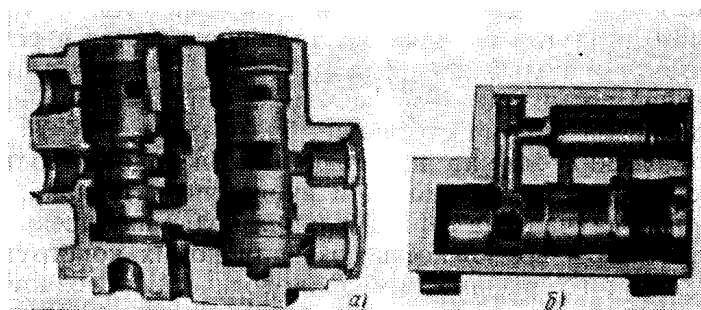


Рис. 132. Корпусы с прямоугольными и круглыми каналами (в разрезе)

обрабатываемой детали. При такой установке выдерживается с необходимой точностью размер от торца втулки до рабочей части электрода. Этот метод применяется, когда координата, фиксирующая положение канала, задается от наружного торца детали.

Если координата положения канала задана от торца внутренней расточки, то используется другой способ. Последовательно с электродом-инструментом включается источник низкого напряжения (3 в) и сигнальная лампочка, причем второй полюс источника напряжения соединяется со столом станка. Момент касания инструмента с одной из стенок расточки в детали определяется по загоранию лампочки, после чего с помощью отсчетных устройств станка инструмент устанавливается на требуемый размер.

На рис. 132 показан в разрезе силуминовый корпус с 16 каналами прямоугольного сечения, обработанными на электроимпульсном станке; там же представлен корпус с двумя круглыми каналами

лами диаметром 10 мм. Подобные каналы можно изготавливать на универсальных копировально-прошивочных станках различных моделей (соответственно габаритам обрабатываемых деталей).

Более крупные детали (а некоторые из обрабатываемых в настоящее время корпусов имеют величину более 1 м) изготавливаются на специальных электроимпульсных станках. Таковы, например, крупные блоки, обрабатываемые на специальных многошпиндельных станках. Эти детали имеют попарно расположенные глухие отверстия, соединенные на глубине 1100 мм прямоугольными каналами. Подобные детали ранее обрабатывались путем фрезерования пазов угловыми фрезерными головками. При этом глубина залегания пазов была только 650 мм. Даже при этих условиях угловая фрезерная головка не имела достаточной жесткости.

При переходе на электроимпульсную обработку были применены электрододержатели, выполненные в виде качающегося рычага, ось которого находится внутри обрабатываемого отверстия в средней его части. Обработка ведется медным полым электродом (трепанация). Отверстие предварительно заполняется индустриальным маслом, в других случаях масло прокачивается через отверстие в штанге и полый электрод.

Машинное время на обработку одной детали с тремя-шестью соединительными окнами составляет 11—15 мин.

Экономический эффект на подобных операциях достигается за счет снижения трудоемкости и экономии материала.

Во многих случаях на первый план выходят повышение надежности агрегатов и возможность создания новых конструкций на базе достигнутого расширения технологических возможностей.

ОБРАБОТКА РУЧЬЕВ В ВАЛКАХ И КОВОЧНЫХ СЕКТОРАХ ДЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОКАТА

В промышленности освоен прокат профилей переменного сечения для осей электродвигателей, полуосей и шатунов автомобиля и т. п. В больших количествах (около 5 млн. т в год) выпускается арматурная сталь периодического профиля с поперечными винтовыми канавками для армирования железобетонных конструкций.

Механическая обработка ручьев в прокатных валках представляет большую трудность для инструментальных цехов, во-первых, из-за сложных форм ручьев и, во-вторых, из-за необходимости выполнять валки возможно более твердыми.

Электроимпульсная обработка не только позволяет гораздо производительнее, чем фрезерование, изготавливать ручьи, но и снимает ограничения в твердости валка. Последнее обстоятельство особенно важно, так как таким путем достигается значительное повышение стойкости валков и увеличивается производительность прокатных станов вследствие сокращения потерь времени на пере-валку.

Обработка ручьев осуществляется копированием формы электрода при периодическом повороте валка (метод деления), либо методом обкатки.

На рис. 133 показан валок с диаметром бочки 320 мм из отбеленного чугуна с твердостью до *HV* 510, изготовленный электроимпульсным способом. Валок имеет 21 ручей для проката арматурной стали с профилем № 12. Электроимпульсная обработка валка производится на специальном электроимпульсном одиннадцатипиндельном полуавтомате модели МА-53. Этот станок позволяет обрабатывать валки с диаметром бочки до 400 мм для профилей арматурной стали от № 12 до 45, причем все ручьи валка обрабатываются одновременно.

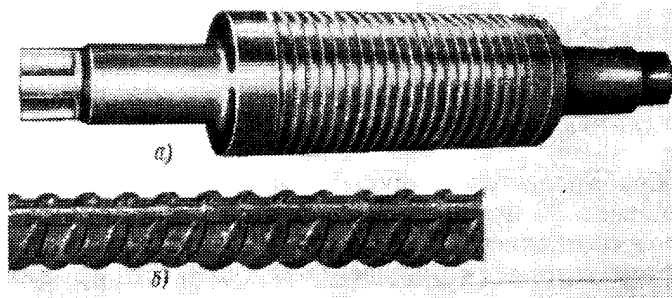


Рис. 133. Прокатный валок (а) и образец проката (б)

Электрод-инструмент представляет собой стальную гребенку, в пазы которой запрессованы диски из графитированного материала. Гребенки по 2 шт. закрепляются в державке и вместе с ней устанавливаются на шпинделе станка. Изношенные диски при такой конструкции гребенок могут легко заменяться новыми. Производительность этого станка на профиле № 12 достигает 700 канавок в час, а время обработки валка с 21 ручьем для этого же профиля составляет около 4 ч вместо 31 ч фрезерованием. Возможность обрабатывать валки высокой твердости с наплавленным на изношенные ручьи высокотвердым сплавом позволяет повысить их стойкость вдвое, сократить парк валков металлургического завода.

Электроимпульсная обработка может быть использована и при изготовлении вставок (секторов) к ковочным вальцам.

На рис. 134 справа изображено боковое звено тяговых цепей, выпускаемых в больших количествах для нужд угледобычи. Эти звенья изготавливаются на ковочных вальцах с помощью вставок. Расход вставок только по одному из заводов достигает 3 тыс. шт. в год, а трудоемкость механической и слесарной обработок одной вставки составляет 4,8 ч. На рис. 134 изображена вставка с двумя фигурами, слева показан электрод, которым они обрабатывались на универсальном электроимпульсном станке. Время обработки

при 5-м классе чистоты поверхности не превышает 1,5 ч, причем при использовании специального электроимпульсного станка оно может быть снижено до 15—20 мин.

На универсальных станках могут изготавливаться и небольшие валки. Так, валок для печений (рис. 135) с размером по диаметру

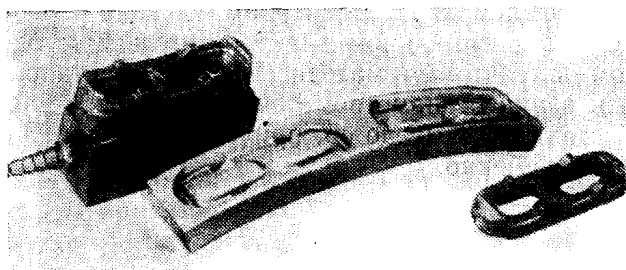


Рис. 134. Сектор ковочных вальцов: слева электрод, справа — боковое звено цепи (прокат)

180 мм обрабатывается в приспособлении на станке 4723. Время обработки всех 36 формующих полостей с чистотой поверхности 5-го класса составляет 7,5 ч вместо 50 ч при механической обработке. Кроме того, если раньше из-за сложности обработки такие

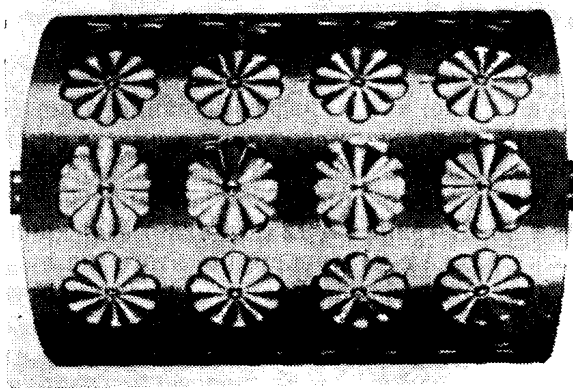


Рис. 135. Валок для печенья

валки изготавливались из оловянистого сплава, то при электроимпульсной обработке переходят на более дешевые и долговечные стальные валки.

Детали, подобные валкам для периодического проката, имеются не только в металлургической промышленности и машиностроении; они применяются, как это видно на последнем примере, и в конди-

терской промышленности, и в угольной промышленности при брикетировании угля, и в ряде других производств.

На некоторых валках периодического проката, имеющих повторяющиеся сложные фасонные поверхности, целесообразно производить электроимпульсную обработку обкаткой. Преимуществом такой схемы обработки являются упрощение и снижение стоимости обработки. При работе по принципу обкатки между инструментом

и обрабатываемой деталью обеспечивается жесткая связь, люфты недопустимы. Электрод-инструмент выполняется прямым и соответствует профилю проката, но имеет необходимые занижения по размерам, требующим коррекции.

Разумеется, электроимпульсная обработка обкаткой применяется не только для валков, но и для других деталей. Впервые она была использована для профилирования копиров к ленточным шлифовальным станкам, предназначенным для шлифования корыта турбинных лопаток. Шлифование на этих станках осуществляется движущейся абразивной лентой толщиной 0,7—0,8 мм, прижимаемой копиром к поверхности лопатки. Во время шлифования копир и шлифуемая лопатка непрерывно обкатываются друг по другу; при этом копир и лопатка сближаются (автоматически или вручную).

Ввиду сложности профиля корыта лопатки профиль копира изготовлялся с большими затратами высококвалифицированного труда. Электроимпульсная обработка копиров производилась электродами-инструментами, представляющими собой мастер-лопатку, изготовленную из серого чугуна.

ОБРАБОТКА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Детали, армированные твердым сплавом либо изготовленные из него целиком, широко используются в различных отраслях техники. Одной из основных проблем на пути внедрения твердых сплавов является чрезвычайно плохая их обрабатываемость. Особые трудности возникают при изготовлении деталей с фасонными поверхностями.

Среди технологических процессов, применяемых для размерной обработки твердосплавных деталей, имеет место электроимпульсный способ. Как правило, электроимпульсная обработка в зависимости от конкретных условий и требований дополняется абразивной или ультразвуковой, может сочетаться с электроискровым вырезанием профильных отверстий электродом-проволокой и т. д.

При электроимпульсной обработке на серийном оборудовании (станки моделей 4Б722 и 4723) могут быть получены скорости съема металла на черновых режимах до 120—220 мм³/мин. Скорость углубления электрода при этом сравнительно велика (0,2—0,5 мм/мин), что предопределяет получение высокой эффективности процесса. Указанную производительность получают при работе с машинными генераторами на токах до 30—50 а. Дальнейшее повышение режима нецелесообразно, так как из-за образования поверхностных трещин пришлось бы оставлять на чистовую обработку излишне большой припуск.

После черновой обработки переключением на высокочастотный генератор производится зачистка поверхности до 6—7-го классов. Такая чистота поверхности достаточна для изготовления крепеж-

ных отверстий, смазочных канавок, пазов, рифлений в зажимных кулачках и т. п. Если это допускается профилем изделия, вместо копировально-прошивочной операции следует применять «шлифование» электродом с помощью придаваемого к станкам вращающегося шпинделя; и производительность процесса, и достигаемая чистота поверхности при этом увеличиваются, значительно возрастает и срок службы инструмента. На рис. 136 показан твердосплавный башмак до и после обработки пазов и электрод-инструмент из ЭЭГ, применяемый на этой операции.

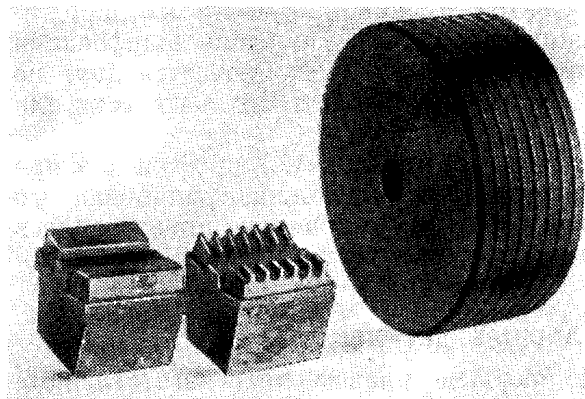


Рис. 136. Твердосплавный башмак до и после обработки и графитовый электрод

Весьма актуальна проблема изготовления твердосплавных штампов и фильер. Один штамп для штамповки из листовой заготовки, армированный твердым сплавом надлежащего качества, заменяет 20—25 обычных стальных штампов. При замене стальных высадочных штампов твердосплавными стойкость повышается до 200 раз.

Поскольку требования к чистоте поверхности штампов и фильер не позволяют удовлетвориться 6—7-м классами, электроимпульсная обработка для них является предварительной операцией, после которой требуется доводка.

При работе на электроимпульсном станке с высокочастотным генератором величина припуска на доводку составляет всего 0,02—0,03 мм; однако удаление и этого припуска все же является весьма трудоемкой операцией. Поэтому целесообразно комбинировать предварительное профилирование электроимпульсным способом с последующей доводкой на ультразвуковых станках. При такой технологии обработку ведут с машинным генератором на токах до 20—50 а, оставляя на ультразвуковую обработку припуск 0,2—0,3 мм на сторону.

Производительность новых моделей ультразвуковых станков может достигать 150—200 мм³/мин, точность обработки 0,02 мм, чистота обрабатываемой поверхности 8-й класс. Такие показатели, особенно на чистовых режимах, много лучше того, что может дать электроэрозионная (электроимпульсная и электроискровая) обработка твердых сплавов, ибо при 6—7-м классах чистоты лучшие высокочастотные генераторы обеспечивают производительность 15—30 мм³/мин.

После полного цикла обработки с применением ультразвукового метода получают на боковых поверхностях чистоту поверхности до $\nabla 8$ и на поверхностях, отклоняющихся от вертикали, — до $\nabla 10$. Дефектный слой после ультразвуковой обработки отсутствует, погрешность обработки составляет 0,01—0,02 мм. Таким образом, для большой номенклатуры штампов полный цикл обработки с применением ультразвуковой доводки обеспечивает требуемое качество поверхности и точность при хорошей производи-

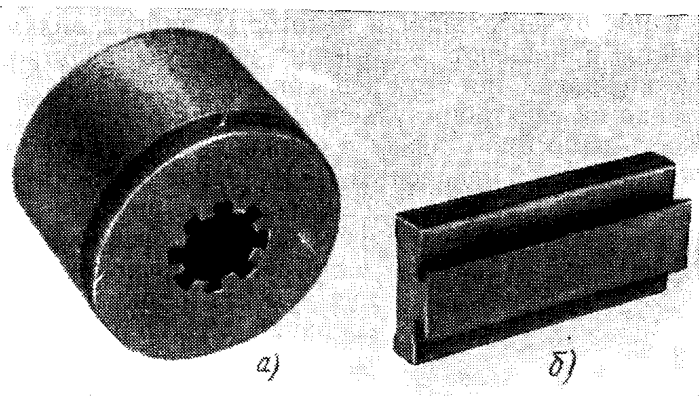


Рис. 137. Твердосплавные детали, предварительно обработанные электронимпульсным способом:

а — матрица для вырубki пружинных шайб; *б* — пуансон для вырубki коллекторных пластин

тельности. Так, например, время изготовления шлицевой матрицы (рис. 137) из сплава ВК15 для вырубki пружинных шайб с наружным диаметром 13,5 мм составило 4,5 ч, из которых 1 ч заняла ультразвуковая доводка, обеспечившая необходимую точность 0,02 мм на диаметр и чистоту поверхности $\nabla 8$. В тех случаях, когда обрабатываются наружные поверхности твердосплавных деталей, доступ к которым прост (рис. 137, б), после электроимпульсной обработки можно производить окончательную обработку абразивным шлифованием.

Разработанная технология, основанная на использовании серийного оборудования, применима для изготовления разнообразных поверхностей рабочих деталей вырубных, высадочных, чеканочных, вытяжных и ковочных штампов, а также твердосплавных фильер. Технологический процесс, использующий электроимпульсную обработку в сочетании с ультразвуковой и для некоторых видов штампов и фильер — с абразивным методом, проверен при изготовлении большого количества штампов и фильер различного назначения и конструкции. Электроимпульсная обработка твердосплавных штампов и фильер, переделка изношенных фильер

на очередной размер освоена рядом заводов. Стойкостные испытания показали, что штампы и фильеры, обработанные электроимпульсным и ультразвуковым методами, имеют достаточно высокую стойкость, соответствующую применяемому для их изготовления твердому сплаву.

КЛЕЙМЕНИЕ И ГРАВИРОВАНИЕ

Нанесение различных знаков на металлические поверхности закаленных и особо точных деталей при помощи клеем невозможно. Поэтому в инструментальном и некоторых других видах производств часто применяют клеймение вручную электрографом, хотя качество знаков при этом невысокое.

Клеймение на электроимпульсных станках обеспечивает большую четкость наносимого знака и снижение трудоемкости операции: время клеймения надписи из 1—10 знаков составляет обычно 1—2 сек. По сравнению с клеймением на электроискровых станках достигается большая стойкость инструмента и сокращается время операции, однако при мелких знаках четкость изображения ниже.

Электроды для нанесения знаков изготавливаются из материала ЭЭГ или из меди. В последнем случае электроды можно изготавливать штампованием или протягиванием металлической ленты через фильеры. Обычно электроды собираются в кассету, и все знаки наносятся одновременно. Поверхность маркируемого изделия не

требуется погружать в масло, достаточно предварительно смазать его тонким слоем индустриального масла. В тех же случаях, когда требуется нанесение более глубокого рисунка или надписи, т. е. гравирование, обработка ведется при погружении в масло или при подаче его поливом. Электроды в связи с увеличением глубины прошивания желательно выполнять из ЭЭГ. Если гравирование ведется не на открытой поверхности, а, скажем, на дне полости, то гравировать следует после того, как будет прошита полость. При этом полость прошивается электродом, не имеющим никаких знаков, а гравюра выполняется специальным электродом с соответствующим профилем. Такая последовательность связана с тем, что утоненные участки электродов (выпуклый рельеф) имеют повышенный износ, в несколько раз превышающий износ электрода в обычных условиях работы.

Особенно сокращается трудоемкость обработки, если на изделии необходимо получить выпуклый рисунок. На рис. 138 пока-

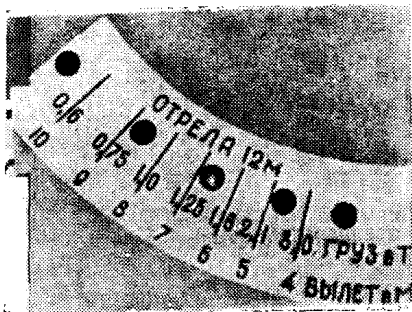


Рис. 138. Графитовый электрод для изготовления выпуклой надписи на чеканочном штампе

заны электроды из ЭЭГ для обработки чеканочного штампа для нанесения надписи на сектор грузоподъемности экскаватора. Время электроимпульсной обработки 3 ч, кроме того, 4 ч идет на изготовление электрода. Ранее же на гравировку штампа требовалось до 10 смен.

ИСПРАВЛЕНИЕ БРАКА ЗАКАЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗВЛЕЧЕНИЕ СЛОМАННОГО ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛЕЙ КРЕПЛЕНИЯ

Возможность обрабатывать электроимпульсным способом закаленные детали в ряде случаев позволяет исправить брак, доделать ошибочно пропущенную операцию, внести изменения в уже готовую деталь. Последнее особенно важно при подгонке штампов и форм непосредственно по получаемой (штампуемой, прессуемой, отливаемой) детали, когда конструктор не может заранее учесть деформации изделия в результате усадки, при гибке и т. д. и размеры инструмента уточняются при первом изготовлении. Так же, как и при ремонте закаленных деталей, в этом случае может быть сэкономлено время на термическую обработку, а в ряде случаев, когда отжиг производить нельзя, сохраняются такие сложные изделия, как матрицы и пуансоны штампов, прессформы, валы, зубчатые колеса и другие детали.

Этой же цели — исправлению брака — служит простая, но весьма распространенная операция: извлечение сломанных инструментов (метчиков, сверл) и деталей крепления.

Практически изделие с внедренными в него остатками сломанного инструмента подается на электроимпульсный станок в тех случаях, когда другие методы исправления брака не дали положительных результатов. Таким образом, применение электроимпульсного метода позволяет спасти почти готовые изделия (нарезание резьбы и сверление глубоких отверстий, т. е. операции, которые наиболее часто сопровождаются поломками инструмента, обычно следуют в конце технологического процесса). В связи с этим экономический эффект от столь простой операции весьма велик, он исчисляется десятками, а в ряде случаев и сотнями рублей на один час работы электроимпульсного станка, занятого на операции извлечения сломанного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА *

1. Аронов А. И. и Лившиц А. Л. Применение углеграфитированных электродных материалов при электроимпульсной обработке металлов, ОНТИ ЭНИМС, М., 1959.

2. Аронов А. И. Корочкин П. Е. и Кравец А. Т. Вибрационно-копировальный станок. Авторское свидетельство № В-141, 1961.

3. Аронов А. И., Лившиц А. Л., Кравец А. Т. и Сосенко А. Б. Способ многоконтурной электроэрозионной обработки поверхностей. Авторское свидетельство № В-750, 1962.

4. Астахов Ю. В. Изготовление сит из нержавеющей сталей электроэрозионным способом. «Передовой научно-технический и производственный опыт», вып. 7, ГОСИНТИ, М., 1962.

5. Бейли С. Я. Электроимпульсная обработка деталей пневмо- и гидроаппаратуры. «Станки и инструмент», 1962, № 3.

6. Бейли С. Я. и Полоцкий В. Е. Направление подачи инструмента при электроимпульсной обработке фасонных поверхностей. «Станки и инструмент», 1965, № 5.

7. Гершман М. С. Опыт применения электроимпульсного метода на Московском автомобильном заводе им. Лихачева в сб. «Опыт применения электрофизических и электрохимических методов обработки в промышленности», ГОСИНТИ, № 35-64-1311/5, М., 1964.

8. Гусев В. Н. Авторское свидетельство № 34253, 1931 и № 90516, 1943.

9. Гусев В. Н. «Анодно-механическая обработка металлов». М. Машгиз, 1952.

10. Гуткин Б. Г. «Автоматизация электроискровых и анодно-механических станков», М. Машгиз, 1952.

11. Гришин В. М., Гуткин Б. Г., Лившиц А. Л. и Яхимович Д. Ф. Электроэрозионная размерная обработка металлов. ВИНТИ, М., 1958.

12. Зингерман А. С., Лившиц А. Л., Сосенко А. Б. О физических факторах, определяющих производительность электроимпульсной обработки металлов. В сб. «Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов», ЭНИМС, М., 1962.

13. Коминар С. И., Цирлин М. И. Электроимпульсная обработка штампов на Горьковском автомобильном заводе. «Автомобильная промышленность», 1964, № 7.

* Ввиду недостатка места указана только основная литература по электроимпульсному способу и относящиеся к нему общим проблемам электроэрозионной обработки.

14. Кравец А. Т. Качество поверхности при электроимпульсной обработке металлов. «Станки и инструмент», 1960, № 6.
15. Кравец А. Т. Восстановление и изготовление молотовых штампов электроимпульсным способом, ЦБТИ, М., 1958.
16. Кравец А. Т. Электроимпульсная обработка жаропрочных сплавов. В сб. «Обработка жаропрочных сплавов». Изд-во АН СССР, М., 1960.
17. Кравец А. Т., Лившиц А. Л., Мечетнер Б. Х., Сосенко А. Б. Электроэрозионные, ультразвуковые и электрохимические станки СССР, НИИМАШ, М., 1965.
18. Кравец А. Т., Мечетнер Б. Х., Лившиц А. Л., Технология электроимпульсной и ультразвуковой обработки твердосплавных штампов и фильер. ЦБТИ ГК АиМ, М., 1961.
19. Лазаренко Б. Р. и Лазаренко Н. И. Способ обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов. Авторское свидетельство № 70010, 1943.
20. Лазаренко Б. Р. и Лазаренко Н. И. Электрическая эрозия металлов, Госэнергоиздат, Вып. 1, 1944.
21. Лившиц А. Л. Электроэрозионная обработка металлов. «Большая Советская энциклопедия», т. 48, 1957.
22. Лившиц А. Л. Электроэрозионная обработка металлов, Машгиз, М., 1957.
23. Лившиц А. Л. Новые физико-химические методы размерной обработки материалов. «Машиностроитель», 1965, № 6.
24. Лившиц А. Л. Гамма дроссельных регуляторов. В Сб. «Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов». Изд. ЭНИМС, М., 1962.
25. Лившиц А. Л., Способ настройки регуляторов подачи электроэрозионных станков. Авторское свидетельство № 147908, 1961.
26. Лившиц А. Л. Устройство для автоматического регулирования режимов обработки на электроимпульсных станках. «Бюллетень изобретений» № 14, 1961. Авторское свидетельство № 139911, 1960.
27. Лившиц А. Л. Униполярный генератор постоянного тока. «Бюллетень изобретений» № 10, 1951. Авторское свидетельство № 104347. 1951.
28. Лившиц А. Л., Аронов А. И., Зингерман А. С. Износ электродов-инструментов из графитированного материала при электроимпульсной обработке металлов. «Станки и инструмент», 1961, № 7.
29. Лившиц А. Л., Брискман М. О. Электроимпульсный копировально-прошивочный станок. «Станки и инструмент», 1957, № 5.
30. Лившиц А. Л., Брискман М. О., Подлазов С. М., Яхимович Д. Ф., Кравец А. Т., Соловов В. П., Блитштейн Н. И. Электроимпульсный станок для размерной обработки токопроводящих материалов. Авторское свидетельство № 126735, 1959.
31. Лившиц А. Л., Бурда М. И. Характеристики электроимпульсной обработки на высокой частоте. В сб. «Электроимпульсная обработка металлов», ЦИНТИМАШ, М., 1960.
32. Лившиц А. Л., Зингерман А. С. О физической природе электроэрозионной обработки металлов. Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1959, № 7.
33. Лившиц А. Л., Кравец А. Т., Ополинский А. Ш. Электроимпульсная обработка методом обкатки. В сб. «Электроимпульсная обработка металлов», вып. 1, ЦИНТИМАШ, М., 1960.
34. Лившиц А. Л., Кравец А. Т., Подлазов С. С., Аронов А. И. Некоторые вопросы технологии и конструирования станков для

электроэрозионной обработки металлов. В сб. «Новое в электрической и ультразвуковой обработке металлов», Лениздат, Л., 1959.

35. Лившиц А. Л., Кравец А. Т., Титов А. И. Основы технологии и станки для электроимпульсной обработки металлов. Сб. «Электроимпульсная обработка металлов», ЦИНТИМАШ, М., 1960.

36. Лившиц А. Л., Полоцкий В. Е. Гидросолеоидная головка для электроэрозионной обработки. Авторское свидетельство по заявке № 736206, 1961.

37. Лившиц А. Л., Рогачев И. С. Генераторы для электроимпульсной обработки металлов. «Электричество», 1957, № 3.

38. Лившиц А. Л., Рогачев И. С. Генераторы периодических импульсов сильного тока. Госэнергоиздат, М., 1962.

39. Лившиц А. Л., Рогачев И. С. Машинный генератор для электроимпульсной обработки металлов. «Станки и инструмент», 1956, № 11.

40. Лившиц А. Л., Рогачев И. С., Кравец А. Т., Ткаченко А. Н., Титов А. И. Индукторные генераторы. В сб. «Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов», Изд. ЭНИМС, М., 1962.

41. Лившиц А. Л., Рогачев И. С., Макаренко В. А., Сосенко А. Б. Новые коммутаторные генераторы импульсов. В сб. «Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов», ЭНИМС, М., 1962.

42. Лившиц А. Л., Сосенко А. Б. Способ электроимпульсной обработки, Авторское свидетельство по заявке № 763369, 1962.

43. Лившиц А. Л., Сосенко А. Б. Расширение технологических возможностей электроимпульсной обработки. «Приборостроение», 1961, № 7.

44. Лившиц А. Л., Устьянцев А. А., Полоцкий В. Е. Электроимпульсный гидрофицированный многошпиндельный полуавтомат для обработки, например, валков. Авторское свидетельство № 147441, 1961.

45. Ополиский А. Ш., Корочкин П. Е., Аронов А. И. Способ обработки объемных поверхностей. Авторское свидетельство № 140656, 1960.

46. Писаревский М. М. Способ обработки металлов и сплавов. Авторское свидетельство № 80718, 1948.

47. Подлазов С. С. Новое оборудование для электрофизических и электрохимических методов обработки. Сб. «Опыт применения электрофизических и электрохимических методов обработки в промышленности». ГОСИНТИ, № 35-64-1311/5, М., 1964.

48. Пятисотников А. И. Опыт применения электрофизических и электрохимических методов обработки. Сб. «Опыт применения электрофизических и электрохимических методов обработки в промышленности», ГОСИНТИ, № 35-64-1311/5, М., 1964.

49. Рогачев И. С. Коммутаторный генератор унополярных импульсов. Изв. ВУЗ «Электромеханика», 1959, № 12.

50. Рогачев И. С., Перчик Л. Д., Лившиц А. Л. Электромашинный генератор униполярных импульсов, Авторское свидетельство № 126176, 1959.

51. Рогачев И. С., Ткаченко А. Н. Индукторный генератор импульсов с внешним выпрямлением. Изв. ВУЗ «Электромеханика», 1960, № 4.

52. Рогачев И. С., Ткаченко А. Н. Расчет режимов работы генератора импульсов на эрозионный промежуток. Изв. ВУЗ. «Электромеханика», 1962, № 6.

53. Рогачев И. С., Лившиц А. Л., Перчик Л. Д., Борисенко Н. И. Машинный генератор униполярных импульсов. «Бюллетень изобретений», № 9, 1955, Авторское свидетельство № 101332, 1952.

54. Сигарев А. М., Лившиц А. Л., Банников Г. К. Высоко-стойкие электроды для электроимпульсной обработки металлов. «Станки и инструмент», 1958, № 5.

55. Сосенко А. Б. Электроимпульсный метод обработки: область применения, технология и оборудование. Сб. «Опыт применения электрофизических и электрохимических методов обработки в промышленности», ГОСИНТИ, № 35-64-1311/5, М., 1964.

56. Сосенко А. Б. Применение электрофизических и электрохимических методов обработки металлов и инструментально-штамповом производстве. В сб. «Инструментально-штамповое производство на заводах автотракторного и сельскохозяйственного машиностроения», ГОСИНТИ, № 6-64-1147/26, М., 1964.

57. Сосенко А. Б. Электроимпульсная обработка рабочих колес газовых турбин. «Станки и инструмент», 1962, № 6.

58. Сосенко А. Б. Многоинструментальная обработка на электроимпульсных станках. «Станки и инструмент», 1963, № 2.

59. Сосенко А. Б. Электрод-инструмент. «Бюллетень изобретений», № 14, 1965. Авторское свидетельство № 173117, 1962.

60. Сосенко А. Б., Аронов А. И. Способ электроимпульсной обработки сложных поверхностей объемными фасонными электродами-инструментами. Авторское свидетельство № 147440, 1961.

61. Сосенко А. Б., Лившиц А. Л. Способ изготовления изделий импульсами тока. «Бюллетень изобретений», № 16, 1960. Авторское свидетельство № 131211, 1959.

62. Яхимович Д. Ф. Автоматический регулятор подачи для многоконтурной электроэрозионной обработки. Передовой научно-технический и производственный опыт, Филиал ВИНТИ, тема 8, № М-59-377/8, 1959.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
I. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки материалов	7
Классификация методов и способов размерной обработки	7
Общая характеристика электрофизических и электрохимических методов размерной обработки	12
II. Физико-технологические основы электроимпульсного способа обработки	22
Физические условия осуществления размерной электроэрозионной обработки	22
Условия осуществления объемного формообразования	31
Физический механизм электроимпульсной обработки	34
Взаимосвязь электрических режимов и геометрических характеристик изделия	61
Частотные характеристики электроэрозионной обработки	64
Общая характеристика диапазонов электроимпульсной обработки	69
III. Электротехнологические характеристики электроимпульсной обработки	72
Схемы формообразования	72
Производительность процесса	73
Качество обработанной поверхности	82
Точность размеров	94
IV. Генераторы периодических униполярных импульсов сильного тока	108
Методы получения периодических униполярных импульсов	108
Магнитонасыщенные генераторы для низкочастотной электроимпульсной обработки	110
Коммутаторные машинные генераторы для среднечастотной электроимпульсной обработки	120
Генераторы импульсов для высокочастотной электроимпульсной обработки	134
V. Автоматическое регулирование и управление электроимпульсными стаиками	144
Электроимпульсный станок как объект автоматического регулирования	145
Требования к автоматическим регуляторам зазора	164
Схемы автоматических регуляторов зазора	169
Экстремальные регуляторы	174
Системы программного регулирования режимов	181

VI. Электроимпульсные станки	183
Универсальные копировально-прошивочные электроимпульсные станки	183
Специальные станки	197
VII. Электроды-инструменты	206
Особенности конструкции и материал электродов-инструментов	206
Методы изготовления и восстановления электродов-инструментов	215
VIII. Проектирование технологических процессов (электроимпульсной обработки)	226
Выбор режима при черновой обработке	226
Связь производительности процесса и чистоты поверхности с режимом обработки	230
Расчет числа проходов	234
Расчет припусков	238
Расчет машинного времени на обработку	240
IX. Многоинструментальная обработка	243
Многоконтурные схемы	243
Необходимые соотношения параметров многоконтурных схем для станков с одним генератором	245
Многоинструментная одноконтурная обработка	247
Влияние общего генератора на электротехнологические характеристики многоконтурной обработки	249
Многоконтурная обработка на одношпиндельных станках	250
Обработка на электроимпульсных станках с несколькими генераторами	254
X. Типовые технологические процессы	257
Изготовление и восстановление ковочных штампов	257
Обработка форм для литья, прессформ на пластмассу и резину	264
Обработка рабочих колес газовых турбин и компрессоров	268
Обработка турбинных лопаток	272
Прошивание щелей и глубоких отверстий	275
Обработка тонкостенных деталей, решеток, сеток и сит	277
Обработка соединительных каналов в корпусах	280
Обработка ручьев в валках и ковочных секторах для периодического проката	282
Обработка твердосплавных деталей	285
Клеймение и гравирование	288
Исправление брака закаленных деталей, извлечение сломанного инструмента и деталей крепления	289
Л и т е р а т у р а	290

Абрам Лазаревич Лившиц,
Аркадий Тимофеевич Кравец,
Иван Сергеевич Рогачев
Александр Борисович Сосенко

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Редактор издательства *Н. А. Иванова*
Технический редактор *Л. П. Гордеева*
Корректор *И. М. Борейша*
Переплет художника *А. С. Рыбакова*

Сдано в производство 18 /XI 1966 г.

Подписано к печати 24/V 1967 г.

Т-08130. Тираж 13 000 экз.

Печ. л. 18,5.

Бум. л. 9,25

Уч.-изд. л. 19,5. Формат 60×90¹/₁₆. Бум. № 1

Темплан 1967 г., № 251. Цена 1 р. 16 к. Зак. 1356

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ»,
Москва, Б-66, 1-й Басманный пер., 3.

Ленинградская типография № 6
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Моисеенко, 10