

А56
585

НА ДОМ БИБЛИОТЕКА

ЧИТ. ЗАЛ



ОБЗОР

ЗАРУБЕЖНОЙ

ТЕХНИКИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

МАШГИЗ

1958

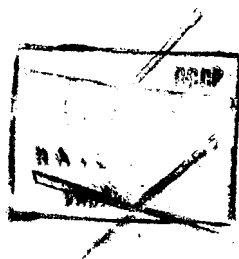
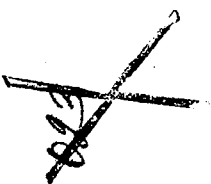
НА ДОМ БИБЛИОТЕКА

Л. Я. ПОПИЛОВ, Е. М. ЛЕВИНСОН

ЧИТ. ЗАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

(ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ТЕХНИКИ)



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

ГОС ПУБЛИЧНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

3239 $\frac{25}{59}$

Книга является обзором современного развития и промышленного внедрения электрических методов обработки металлов за рубежом.

В книге освещаются вопросы теории электрических методов обработки, приводятся описание оборудования, выпускаемого заграничными фирмами, и многочисленные технологические процессы электрической обработки металлов с сопоставлением их технико-экономических показателей.

Книга рассчитана на инженеров, техников и квалифицированных рабочих машиностроительной промышленности, а также работников научно-исследовательских институтов и студентов вузов.

$\frac{21}{11237}$

$\frac{156}{58-5}$

Рецензент канд. техн. наук Б. Г. Гуткин

Редактор инж. И. Г. Космачев

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Редакция литературы по технологии машиностроения
Заведующий редакцией инж. Е. П. Наумов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из направлений развития техники является совершенствование технологии обработки материалов.

Послевоенный период характеризуется широким применением в технике металлов и сплавов, плохо поддающихся обработке резанием.

В этот же период большое развитие в СССР и за границей получили электрические методы обработки металлов, которые создали новые технологические возможности, позволив ликвидировать в промышленности ряд узких мест, возникших вследствие недостаточности средств механической технологии.

Содержанием настоящего сборника является систематизированный обзор иностранной технической периодики и патентов, освещающих вопросы электрической обработки металлов.

Обилие публикаций, особенно за последнее трехлетие, и ограниченность объема данного обзора, естественно, не позволили с достаточной полнотой отразить все детали рассматриваемого вопроса, однако, авторы полагают, что приводимые сведения дадут читателям достаточное представление о современном состоянии этого раздела техники за рубежом.

Следует подчеркнуть, что авторы не ставили своей задачей критическое рассмотрение освещаемых материалов и не считали нужным полемизировать с авторами источников даже в тех случаях, когда последние заведомо неправильно трактуют тот или иной вопрос.

Подобный подход обусловлен как ограниченностью объема книги, так и тем, что она предназначена главным образом для специалистов, работающих в области электрической обработки и имеющих достаточно правильные представления о современном состоянии теории вопроса по обширной отечественной литературе.

Данный обзор состоит из трех глав.

В первой главе собраны материалы о теоретических основах электроэрозионной обработки.

Вторая глава содержит сведения о характеристиках оборудования, выпускаемого различными фирмами и организациями для промышленного использования электроэрозионной обработки.

Третья глава рассматривает вопросы, относящиеся непосредственно к технике применения электроэрозионной обработки. В ней приведены многочисленные конкретные примеры электроискровой и анодно-механической обработки и данные, характеризующие техническую и экономическую эффективность их применения.

ВВЕДЕНИЕ

Область электрических методов обработки, несмотря на свою новизну, является уже сейчас весьма широкой по диапазону охватываемых технологических процессов и разнообразию выполняемых работ. К ней относятся столь разнообразные по назначению и содержанию методы, как например, электрохонингование, сопровождающееся практически неощутимым съемом металла и достижением чистоты поверхности, превышающей 12—13-й классы; электроискровое шлифование, позволяющее удалить 15 000—20 000 мм³ металла в минуту с поверхности металла; нагрев в электролите. При применении последнего метода удается за 2—3 мин. нагреть поверхность металлического изделия до расплавления.

Кроме перечисленных, ряд других методов широко и всесторонне описан в литературе [86—92].

Одним из ведущих направлений этой обширной области являются электрические методы обработки, использующие для целей разрушения и удаления металла электрическую эрозию, вызываемую импульсными электрическими разрядами.

После создания и развития в Советском Союзе электроискрового, анодно-механического и других методов электрической обработки металлов и их промышленного применения, за рубежом появились работы, описывающие всевозможные технологические процессы и оборудование для электрической обработки, а также исследования теоретического характера.

Сообщения иностранной печати позволяют сделать вывод о быстро прогрессирующем развитии и промышленном применении электрических методов обработки. Ряд институтов и лабораторий США, Англии, Франции, Германии, Японии и других стран заняты изучением и разработкой электрических методов обработки металлов. Многочисленные фирмы в этих странах выпускают разнообразное оборудование, что является базой широкого промышленного внедрения новой высокоэффективной технологии.

Как в области теоретических разработок, так и в практическом применении электрических методов обработки многие зарубежные работы дублируют отечественные разработки прошедших лет. Вместе с тем имеются новые разработки, представляющие значительный интерес главным образом в области генерирования импульсных разрядов.

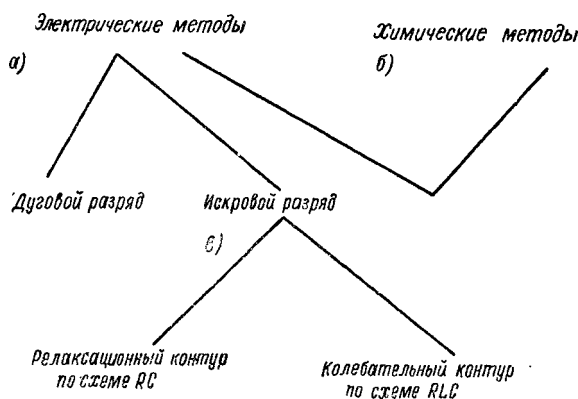
ГЛАВА I

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

1. Общие сведения

В современной зарубежной периодической печати большое количество работ посвящено вопросам физических и технологических основ электрических методов обработки металлов.

Выдвигаемые различными авторами теории (точнее, гипотезы), описывающие природу съема металла, часто находятся в глубоком противоречии между собой. Обращает на себя внимание и отсут-



Фиг. 1. Классификация электрических способов обработки.

ствие единства терминологии, касающейся классификации способов электрической обработки.

Своеобразную, но нечеткую классификацию применяемых способов (фиг. 1) дает Н. Ахер [12]. Как нетрудно заметить, приводимая схема весьма ограничивает разнообразие электрических способов обработки и не дает четкого представления об их взаимосвязи.

Общепринятые классификация применяемых способов электрической обработки и терминология отдельных разновидностей обработки за рубежом отсутствуют. Перечень наиболее употребительных

наименований отдельных процессов и видов обработки приведен в табл. 1.

Табл. 2 воспроизводит по данным Adcock [8] одну из схем, группирующих основные разновидности способов электрической обработки.

Таблица 1

Варианты терминологии отдельных разновидностей электроэрозионной обработки

Применяющаяся терминология	Содержание терминов
Arcing Arc Machining Electroarcing	Электроэрозионная обработка импульсным дуговым разрядом
Sparking Electrospark method Electroerosion Machining Electromechanical „Method X“ Electrofragmentation process Electric Spark Cutting Electric Spark Machining Electrospark Machining Spark Sharpening	Электроэрозионная обработка импульсным искровым разрядом

Adcock [8] в табл. 2 делает попытку разграничить способы электрической и ультразвуковой обработок и определить область их применения.

При электролитическом методе обработки жидкость, омывающая деталь и электрод, является обычно водным раствором металлической соли или слабой кислоты и, следовательно, обладает электропроводностью. При прохождении постоянного тока между деталью и электродом материал с детали (анода) снимается пропорционально времени и току в соответствии с законом Фарадея. Этот способ может применяться только для обработки деталей из проводящего материала, причем между элементами цепи должен существовать зазор, чтобы ток шел по электролиту. Недостатки способа — его малая производительность по сравнению с другими и недостаточная точность, неизбежная вследствие того, что ток через электролит проходит не только в месте наибольшего сближения катода и анода, но по всей поверхности электродов, погруженных в электролит. Для уменьшения рассеяния тока электрод и деталь покрываются изолирующей пленкой по всей поверхности, кроме места обработки. Кроме того, во время обработки появляется оксид металла детали обычно в форме пленки, покрывающей деталь,

Способ	Ультразвуковой	Электроискровой	Электродуговой	Электролитический
Жидкая среда		Изолирующая		
			Проводящая	Проводящая
	Абразивная			
Действие		Электрическое	Электрическое	Электрическое
			Химическое	Химическое
	Механическое	Механическое	Механическое	
Применение		Электропроводные металлы, мягкие и твердые	Электропроводные металлы, мягкие и твердые	Электропроводные металлы, мягкие и твердые
	Проводники и непроводники, керамика, стекло, только твердые материалы			
Рабочие условия		Зазор	Зазор	Зазор
	Контакт		Контакт	
Преимущества	Способность обрабатывать непроводники	Скорость резания и чистота могут быть выбраны по необходимости Точность стабильная	Высокая производительность	
Недостатки	Трудность применения удовлетворительного регулирования	Большой износ электрода	Плохая поверхность Низкая точность	Низкая производительность Трудность получения плоскости и малая точность Склонность к поляризации

которая препятствует увеличению силы тока при продолжении процесса обработки. Для того, чтобы избежать полного прекращения процесса, необходимо периодически или непрерывно очищать деталь от этой пленки механическими средствами.

В электродуговом способе дуговой разряд между электродом и изделием поддерживается постоянно или с перерывами. Зона дуги либо погружена в жидкость, либо поливается ею. Жидкость обычно электропроводна, так как основой ее является вода. Это позволяет использовать высокую теплоемкость воды для эффективного охлаждения.

Съем металла происходит в результате электрохимического и электромеханического эффектов: электрохимический эффект имеет место вследствие электролиза благодаря проводимости межэлектродной среды, электромеханический вызывается интенсивным местным нагревом с последующим расплавлением малых площадок на поверхности детали. Попеременные интенсивные разогрев и охлаждение образуют места разрыхления и раскрашивания металла, затем эти разрыхленные частицы удаляются. Деталь должна быть изготовлена из электропроводного материала; контакт между электродом и деталью происходит в начале процесса и периодически возобновляется. Это необходимо для возбуждения прерывистой дуги. Данный способ эффективнее всех остальных, но характеризуется очень грубой поверхностью металла после его обработки. Кроме того, поскольку дуга, раз возникнув, стремится сохранить свой ионизированный путь, она плавит одно и то же место на детали, хотя это место уже не является ближайшей к электроду точкой, что снижает точность обработки.

Электронисковой способ отличается от описанных выше применением непроводящей жидкости или диэлектрика, а параметры электрического контура выбираются так, чтобы был гарантирован режим повторяющихся искровых разрядов, причем возникновение устойчивой дуги было бы невозможно.

Искровой разряд сосредоточивается на очень малом участке. Он возникает там, где градиент потенциала наибольший, т. е. между наименее удаленными точками на электродах.

Практическим следствием этого является точность и самокоррекция способа, обеспечивающие воспроизводство требуемой формы электрода на детали.

Последний (ультразвуковой) способ не является по существу электрообработкой и мы не останавливаемся на описании его, так как он не имеет прямого отношения к теме данного обзора.

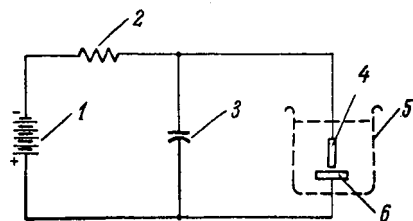
2. Электронисковая обработка

Среди рассматриваемых способов электрической обработки наибольший удельный вес по уровню развития и масштабам внедрения получила электронисковая обработка металлов.

Процесс съема металла определяется различными исследователями как действие электрического поля, отрывающего частицы ме-

талла, как результат расплавления и испарения под воздействием теплоты, выделяющейся в межэлектродном промежутке, и как механическое раздробление металла.

Hinüber и Rüdiger [23] считают процесс съема металла комплексным, в котором сочетаются термическое воздействие с механическим раздроблением, причем один из факторов является доминирующим в зависимости от крутизны фронта импульса, физико-механических свойств металла и других факторов.



Фиг. 2. Схема генератора импульсов Лазаренко:

1 — источник тока; 2 — сопротивление;
3 — конденсатор; 4 — электрод-инструмент;
5 — ванна; 6 — обрабатываемая деталь.

Эти различные точки зрения на природу электрической эрозии отражены в многочисленных работах, опубликованных в США, Англии, Франции, Бельгии, Швейцарии и др. [2, 34, 46, 60, 67].

Рассматривая работу релаксационного генератора импульсов, ссылаясь на схему (фиг. 2), предложенную Лазаренко, Williams описывает процесс электроискровой обработки как результат пробоя межэлектродного промежутка величиной около 0,075 мм на

100 в, приложенных к электродам, причем напряжение на них колеблется в пределе $40 \div 400$ в. Проведенные осциллографические исследования показали, что разряд имеет колебательный характер, причем амплитуда тока меняется от нескольких сот до 20 000 а, а частота от 10 до 100 кГц. Автор предполагает, что деионизации промежутка способствует освобождение водорода при разложении диэлектрика. Обычно частота разрядов лежит в пределах от 50 до 5000 в 1 сек.

Оторванные частицы металла электродов удаляются из зоны разряда вследствие местных давлений, носящих взрывной характер. Продолжительность полезной работы мала вследствие больших пауз между разрядами, так как велика постоянная времени зарядки конденсатора.

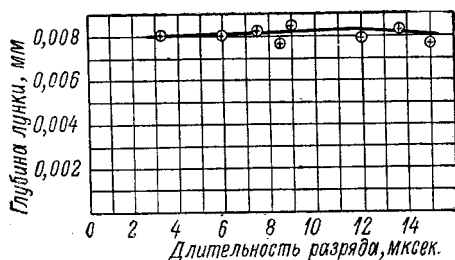
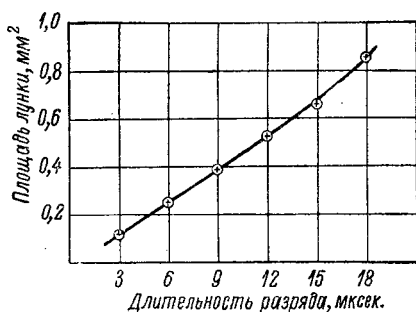
Большая пауза необходима, чтобы успел произойти процесс деионизации во избежание дугообразования между электродами. Удалению продуктов эрозии и деионизации промежутка весьма сильно способствует нагнетание жидкости через межэлектродный промежуток.

Отверстие в детали превышает размеры электрода на величину, равную искровому промежутку.

Исследования эрозии при единичном разряде между электродом и плоской пластинкой из твердого сплава в среде трансформаторного масла на жестких режимах позволили определить ряд зависимостей от амплитуды тока, частоты колебаний в разряде и длины промежутка.

В каждом опыте лунка получалась почти постоянной глубины. Глубина и площадь лунки измерялись при помощи микроскопа.

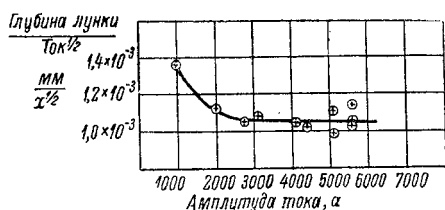
Результаты опытов приведены на фиг. 3, 4, 5 и 6. Опыты, представленные на фиг. 3 и 4, производились при следующих условиях. Электрод-катод изготовлен из латуни. Длительность разряда указана для одного полупериода, разряд колебательный, сильно затухающий. Амплитуда тока — 5600 а. Опыты позволили определить, что глубина лунки зависит от тока разряда, а площадь лунки почти



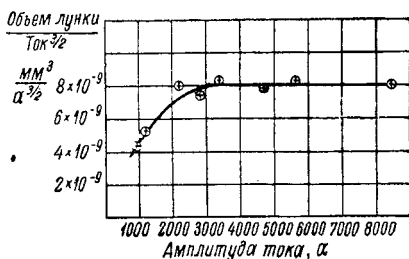
Фиг. 3. Площадь лунки в твердом сплаве при единичном разряде.

Фиг. 4. Глубина лунки в зависимости от продолжительности разряда.

пропорциональна длительности разряда. Объем удаленного металла при переменной амплитуде тока и постоянной длительности приблизительно пропорционален амплитуде тока в степени $3/2$. Другие опыты показали, что длина промежутка мало сказывается на глубине и площади лунки, но имеет большое влияние на положение



Фиг. 5. Зависимость отношения глубины лунки к квадратному корню из амплитуды тока в единичном разряде, при постоянной частоте колебаний в разряде.



Фиг. 6. Зависимость отношения объема лунки к амплитуде тока в степени $3/2$ при тех же условиях, что и на фиг. 5.

лунки относительно катода, причем с увеличением длины промежутка положение лунки становится менее определенным, что снижает точность обработки.

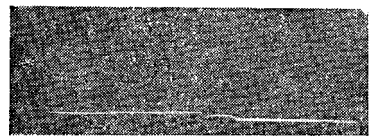
Материал катода мало сказывается на размерах лунки на аноде (обрабатываемой детали). Эрозия катода в большой степени зависит от его формы и материала.

Основываясь на якобы отсутствующих физико-химических превращениях в поверхностном слое металлов, подвергнутых искровой обработке, автор утверждает, что съем происходит в результате

разрушения металла механическими силами. По выводам автора хорошее количественное согласие теории с экспериментом можно получить если предположить, что эрозия является результатом действия сил электрического поля. Эти силы возникают вследствие очень высокой плотности тока на поверхности материала, следовательно, больших градиентов и больших сил, действующих на положительные ионы кристаллической решетки.

Эрозия катода объясняется как результат перемены полярности тока при колебательном разряде и механического воздействия твердых частиц, отделившихся от анода и ударяющихся о катод.

Исследования отдельных лунок, образованных единичными разрядами, основываются на большом количестве опытов, в которых производился единичный разряд между полированными электродами в углеводородном диэлектрике, причем длительность разряда и величина тока разряда измерялись с большой точностью.



Фиг. 7. Осциллограмма напряжения. Приложенное напряжение 500 в. Продолжительность разряда около 1 мксек, ток 18 а.

После каждого разряда лунки на аноде и на катоде подвергались микроскопическому исследованию. В зависимости от тока и от продолжительности разряда изменялись глубина, диаметр и объем лунки на электродах.

Кроме того, было установлено, что размеры лунок также зависят от материала электродов.

На основании полученных зависимостей выведены экспериментальные формулы, определяющие съем металла с анода и с катода. Авторы отмечают, что эти исследования подтверждают выдвинутую гипотезу съема металла силами электрического поля.

При подаче напряжения на электроды разряд возникает с запазданием, зависящем от того, насколько приложенное напряжение выше необходимого для пробоя промежутка.

Типичная осциллограмма напряжения на электродах при промежутке между ними 0,025 мм в керосине показана на фиг. 7. Длительность формирования разряда около 10^{-2} мксек. После формирования разряда напряжение на промежутке составляет от 20 до 40 в в зависимости от длины промежутка. В описываемых опытах продолжительность разряда изменялась от $17 \cdot 10^{-3}$ до $1500 \cdot 10^{-3}$ мксек.

Площадь лунки на аноде равна или несколько меньше площади лунки на катоде.

Если материалы катода и анода одинаковы, объем лунки анода больше, чем лунки катода (при упомянутой продолжительности импульса).

Ниже приведены значения отношения объема лунки на аноде к объему лунки на катоде для латунных электродов при токе разряда 15 а.

Продолжительность разряда 10^{-3} мксек . .	150	300	900	1500
Объем лунки анода				
Объем лунки катода	2,02	1,97	1,98	1,68

Если материалы электродов разные, это отношение может меняться в очень широких пределах, причем величина лунки на аноде не зависит от материала катода. С другой стороны, величина лунки на катоде существенным образом зависит от материала анода. Например, при продолжительности разряда 1500 мксек и токе 11 а получены следующие данные:

Материал катода	Объем лунки на аноде
Латунь	$3,75 \cdot 10^{-7}$ мм ³
Карбид вольфрама	$3,75 \cdot 10^{-7}$ мм ³
Материал катода	Объем лунки на катоде
Латунь	$5,75 \cdot 10^{-10}$ мм ³
Карбид вольфрама	$21 \cdot 10^{-10}$ мм ³

Очевидно, что эрозия анода по своей природе проще, чем эрозия катода.

Можно показать, что эрозия анода тесно связана с распределением тока по поверхности анода.

Ниже приведены объемы лунки анода при токе разряда 11 а для двух образцов из различной стали, при продолжительности разряда 150 и 1500 мксек.

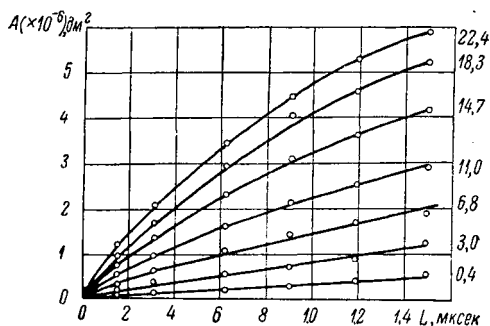
Материал анода	Продолжительность разряда в мксек	Объем лунки на аноде в мм ³
Сталь 18-8 закаленная (немагнитная)	150	$1,3 \cdot 10^{-7}$
	1500	$3,1 \cdot 10^{-6}$
Сталь 416 закаленная (магнитная)	150	$4,8 \cdot 10^{-8}$
	1500	$1,95 \cdot 10^{-6}$

Предел прочности на разрыв и проводимость обеих сталей одинаковы, но объем лунки у ферромагнитной стали меньше, особенно при коротких импульсах. Это подтверждает влияние плотности тока под поверхностью на величину лунки при прочих равных условиях.

Глубина лунки на аноде зависит от материала. Площадь лунки определяется только продолжительностью разряда и величиной тока. На фиг. 8 и 9 приведены соответствующие кривые. Площадь лунки представляет особый интерес, так как по ней можно судить о плотности тока в разряде. Однако считать, что плотность тока можно получить делением силы тока на площадь лунки было бы ошибочным. Площадь лунки растет линейно с увеличением продолжительности разряда, глубина же почти не меняется. Возможно, поэтому, что плотность тока постоянна и что увеличение площади со временем объясняется прогрессирующим перемещением разрядного канала постоянной плотности тока и площади, по мере того как многочисленные мелкие частички отрываются от катода и анода. Во всяком случае отношение тока к внутренней площади лунки даст возможность подсчитать нижний предел возможной плотности

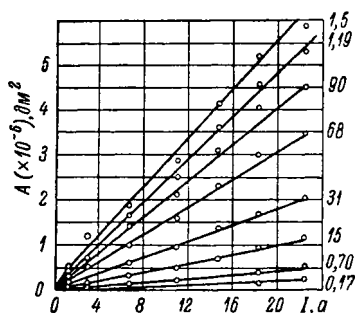
тока, причем точность этого определения возрастает с уменьшением продолжительности тока, например:

Продолжительность импульса в мксек	Сила тока в а	Кажущаяся плотность в а/мм ²
17	18,3	$116,8 \cdot 10^{-2}$
17	22,4	$106,6 \cdot 10^{-2}$



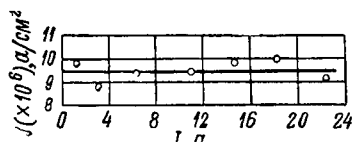
Фиг. 8. Зависимость площади анодной лунки A от продолжительности импульса L для различных значений тока.

При таких коротких импульсах величина тока в опытах была ограничена. При большей длительности (в широких пределах по току) кажущаяся плотность тока не зависит от действительного тока в разряде (фиг. 10).



Фиг. 9. Зависимость площади анодной лунки от величины тока при различной длительности разрядов.

Съем материала с анода при заданной продолжительности и величине тока разряда определяет обрабатываемость электронским процессом. Данные табл. 3 полу-



Фиг. 10. Кажущаяся плотность тока j а/см² в зависимости от действительного тока разряда (из опытов с продолжительностью разрядки 70 мксек).

чены при токе 11 а и продолжительности 1,5 мксек.

Результаты опытов с единичным разрядом представляют простую картину явления искрового резания. Станок, однако, работает на повторяющихся разрядах. Это для большинства станков вносит осложнения: необходимость быстрой деионизации и удаления продуктов эрозии.

Съем материала с анода при заданной продолжительности импульса и величине тока

Материал	Объем лунки на аноде в мм ³	Прочность на разрыв в кг/см ²
Алюминий 2	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^3$
Фосфористая бронза	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^3$
Латунь	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^3$
Алюминий 17	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^3$
Латунь	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^3$
Сталь 18-8	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^3$
Вольфрам-карбид	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$12,5 \cdot 10^3$

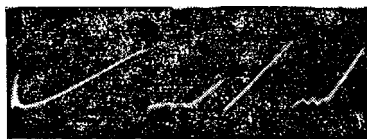
Станки, работающие при повторяющихся разрядах, вызываемых пробоем (Voltage initiated discharges), осуществляются в различных формах исполнения.

В станках, описанных Лазаренко [109] и Teubner [110], последовательность разрядов получают при помощи релаксационного контура. Источник постоянного тока заряжает конденсатор, который разряжается на промежуток, когда напряжение на нем поднимается до величины пробивного.

Авторы называли эти станки релаксационными. Для малых промежутков частота разрядов велика, а ток каждого разряда невелик. С увеличением промежутка частота падает, но ток импульса растет.



Фиг. 11. Осциллограмма напряжения на межэлектродном промежутке релаксационного станка Лазаренко.



Фиг. 12. Осциллограмма напряжения на промежутке станка Лазаренко с индуктивностью в зарядном контуре.

На фиг. 11 показана осциллограмма зарядки — разрядки на станке Лазаренко. Так как источник питания всегда связан с конденсатором, то для прерывания появляющегося сопровождающего тока надо либо разрывать цепь, либо поднимать электрод. Этот недостаток усугубляется быстрым начальным возрастанием напряжения на конденсаторе, что характерно для контура RC. Вгума, Magat и др. включили в зарядный контур индуктивность, которая уменьшила скорость подъема напряжения в начале заряда и увеличила ее в конце заряда.

Осциллограмма релаксационного станка с контуром RLC приведена на фиг. 12. Станки этого типа имеют производительность

приблизительно в четыре раза большую, чем станки Лазаренко. Однако и для них характерно колебание частоты разрядов, напряжения и тока разряда и неопределенность в точности обработки. Вгута и Magat [111] указали на преимущества станка, в котором длительность разряда регулируется независимо, но не опубликовали схемы такого станка.

Контур с импульсами тока постоянной амплитуды от вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого периодически возбуждается от специального устройства, формирующего импульсы, был описан Вильямсом [59].

Этот станок дает высокую производительность при хорошей чистоте поверхности.

Благодаря независимости от деионизации промежутка в нем может быть реализована большая мощность, причем проявление сопровождающих токов исключается. Такие «разобщенные» станки дороже и сложнее по конструкции, а также в изготовлении, чем релаксационные станки.

Если рассматривать результаты исследований единичных разрядов, может показаться, что производительность может быть увеличена беспредельно с увеличением амплитуды и частоты разрядов. Действительно, определенные успехи были достигнуты в этом направлении. Управляемое разрядное устройство дает возможность достичь высокой частоты разрядов. Проблемы, возникающие при конструировании таких станков — это обеспечение необходимой средней мощности разрядной системы и охлаждение при обработке. Испытаны станки, работающие при частоте 12 000 *гц*, токе разряда до 50 000 *а* и средней мощности до 15 *квт*. Во всех случаях предел по скорости резания достигается раньше предела по частоте и по мощности разряда, что объясняется накоплением продуктов эрозии в промежутке. Накопление это имеет место несмотря на интенсивную прокачку диэлектрической жидкости. При обычной обработке штампов из вольфрам-карбида съем составляет 1600 *мм*³ в 1 *мин*. при заторе 0,025 *мм* и при давлении в системе циркуляции 2 *кг/см*² на внутренней поверхности площадью 6—12 *см*². Представляется неизбежным засорение диэлектрика в промежутке продуктами эрозии как анода так и катода, что приводит к резкому уменьшению съема с анода. Причина этого резкого уменьшения не полностью понятна, тем более, что нежелательная эрозия катода падает не так резко. В глубоких прорезях поверхность имеет характерный грубый вид (*Splatter*).

Из-за накапливания частичек — продуктов эрозии — во время обработки представляется вероятным, что производительность, достигнутая сейчас, близка к предельной для операции внутренней обработки. Для наружной обработки, например, обдирки или шлифования, накопление частичек не является проблемой и не ограничивает дальнейшего повышения производительности. Во всяком случае возможно, например, превзойти производительность, достигнутую любым другим способом на шлифовании вольфрам-карбида.

Совершенно отличная трактовка физической природы процесса электронисковой обработки металлов дается W. Ullmann [22]. Автор различает четыре способа обработки:

- 1) дуговой способ, приписываемый авторами Лазаренко;
- 2) искровой способ, основанный на применении релаксационного генератора, работающего с частотой до 5 кГц, предложенный Лазаренко;
- 3) способ, основанный на использовании колебательного контура, с частотой до 50 кГц, разработанный Высшим техническим училищем в Аахене;
- 4) «агитронный» способ, разработанный Всеобщей компанией индустриальной электроники в Локарно (Швейцария).

Станки, в основу которых положен «агитронный» способ, работают на частотах свыше 200 кГц.

Последние два способа, как указывает автор, обеспечивают высокую интенсивность съема металла ($500 \text{ мм}^3/\text{мин}$) при высокой чистоте поверхности (шероховатость 1 мк и менее). При проведении исследований установлено, что в межэлектродном промежутке при разряде имеют место следующие явления:

- 1) выделение энергии вследствие торможения электронов на аноде;
- 2) развивающиеся в металле давления, достигающие нескольких десятков тысяч атмосфер;
- 3) возникновение в межэлектродном промежутке мощных магнитных полей;
- 4) на поверхности металла происходят термодинамические процессы, которые идут адиабатически вследствие кратковременности разряда, по длительности не превышающего 10^{-4} сек.

По Inoue [104] имеют место три разновидности действия импульсного разряда на поверхность электродов:

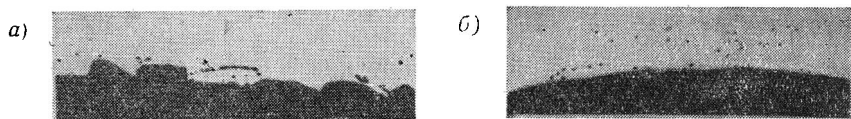
- 1) когда электроды накоротко замыкаются образовавшимся мостиком из выплеснутого металла. При этом высота валиков, окружающих лунку, больше длины промежутка между электродами;
- 2) когда электроды замыкаются выплеснутым из лунки металлом на очень короткий промежуток времени, после чего снова размыкаются, и конденсатор сохраняет остаточный заряд; расплавление мостика происходит за счет тока, создаваемого этим остаточным зарядом;
- 3) когда между электродами вовсе не образуется мостиков.

Суммарная эрозия электродов является результатом теплового разрушения (размягчения, расплавления и испарения) металла и механического разрушения за счет возникающих в зоне разряда высоких давлений.

Подсчет выделяющегося в разряде тепла приводит Inoue к следующим величинам: при емкости конденсатора $C = 100 \text{ мкф}$, заряде $V_0 = 100 \text{ в}$ и остаточном напряжении $V_1 = 27 \text{ в}$, энергия разряда $E = \frac{1}{2} C (V_0^2 - V_1^2) = 0,46 \text{ дж}$. Эта энергия, выделив-

шись в канале разряда объемом $0,14 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3$, создает тепловое напряжение в 10^6 кал/см^3 .

Качество поверхности. Влияние интенсивности режима электроискровой прошивки на чистоту обработанной поверхности, при использовании конденсаторной релаксационной схемы (RC), иллюстрируется данными Hinnüber и Rüdiger [23], содержащимися в приводимой ниже табл. 4 и на микрофотографии фиг. 13.



Фиг. 13. Качество поверхности стенок отверстия $\varnothing 6 \text{ мм}$, обработанного в твердом сплаве толщиной 4 мм :

а) $C = 39 \text{ мкф}$; $I = 3 \text{ а}$, длительность обработки 5 мин. ; б) $C = 16 \text{ мкф}$; $I = 1,5 \text{ а}$, длительность обработки 25 мин.

Напряжение зарядки во всех случаях составляло 220 в .

Принудительная циркуляция рабочей жидкости в межэлектродном зазоре, осуществляемая прокачкой ее через полый электрод-инструмент при прочих равных условиях, значительно повышает чистоту обработанной поверхности.

Таблица 4

Чистота поверхности и съем металла при обработке пластины толщиной 5 мм на различных режимах [23]

Диаметр электрода в мм	Диаметр отверстия в мм	Сечение электрода в мм ²	Сила тока в а	Емкость в мкф	Время в мин.	Съем в мм ³ /мин	Шероховатость в мк
1,0	1,05—1,1	0,79	0,05	5,0	56	0,07	40
1,0	1,15	0,79	0,25	8,5	10	0,4	100
2,0	2,10	3,14	0,1	5,0	32	0,5	40
2,0	2,15	3,14	0,6	15,0	10	1,6	100
5,0	5,1	19,7	0,5	13,0	50	2,0	40
5,0	5,2	19,7	4,0	52,2	7,6	13,0	100
10,0	10,1	78,5	1,0	15,0	131	3,0	40
10,0	10,25	78,5	4,0	52,0	26	15,0	150

На фиг. 14 представлены профилограммы [10, 12] поверхности стали и твердого сплава, обработанных латунным электродом диаметром 1 мм с использованием схемы RLC, при напряжении 40 в , силе тока $0,2 \text{ а}$ и частоте $1,12 \text{ кгц}$.

Из приведенных профилограмм видно, что чистота поверхности в условиях прокачки жидкости резко улучшается.

В значительной степени это, очевидно, происходит вследствие того, что при отсутствии движения жидкости и повышенной частоте разрядов, по мере углубления электрода в отверстие усиливается тенденция к образованию дуги. Подобный пример иллюстрирован [10, 12] осциллограммой (фиг. 15).

Чистота обработанной поверхности при электроискровой обработке с использованием схемы RLC [10, 12] в значительной мере зависит от частоты следования разрядов (при постоянной мощности). Зависимость чистоты поверхности от параметров разрядов для различных марок сталей представлена графически на фиг. 16.

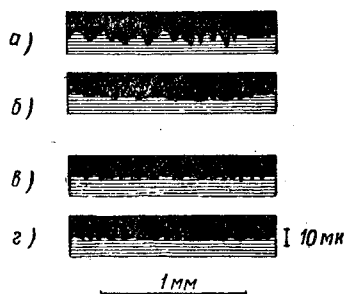
На фиг. 17 изображены профилограммы чистоты поверхности стенок отверстий в стали, обработанных на различных частотах.

Как видно из профилограмм, повышение частоты следования разрядов при искровой обработке во всех случаях влечет за собой улучшение чистоты поверхности. Абсолютные значения шероховатости отличны при этом для разных материалов.

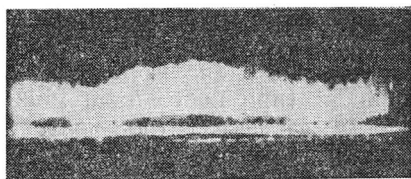
В одной из новых моделей станков, работающих по «Методу X», осуществлены некоторые изменения в схеме, позволяющие получить значительно более крутой фронт нарастания и спада тока (фиг. 18), благодаря чему межэлектродный промежуток быстрее деионизируется, что позволяет значительно повысить частоту разрядов.

Сообщается [23], что в этом случае применена разрядка конденсатора на импульсный трансформатор, а в зарядной цепи конденсатора применен вращающийся искровой разрядник и настроенная линия (Laufzeitkette). Авторы отмечают, что при частоте разрядов 3000 гц затрачивается мощность 12 квт, за счет чего резко повышается производительность по сравнению с простыми схемами. Например, обработка отверстия диаметром 6,3 мм в твердосплавной пластинке толщиной 5,3 мм длится от 35 до 38 сек. (что в 10—15 раз быстрее, чем на станке с генератором RC), а при снижении индуктивности вторичной обмотки импульсного трансформатора это время можно снизить до 22 сек. Нарезка 16-миллиметровой резьбы в твердосплавной пластинке толщиной 12,5 мм занимает по «Методу X» 10 мин., а на станке с генератором RC — 90 мин. Указывается, что несмотря на значительное повышение производительности, чистота и качество обработанной поверхности заметно не ухудшаются, хотя мелкие дефекты на них наблюдаются.

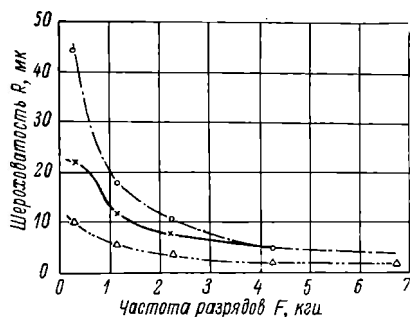
Рассматривая вопрос о структурных изменениях, происходящих на поверхности твердого сплава при электроискровой обработке, отмечают, что поверхность твердого сплава оплавляется. Явления



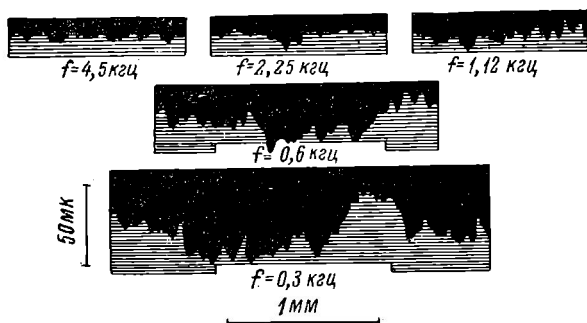
Фиг. 14. Профилограммы чистоты поверхности при обработке без прокачки жидкости через электрод (а — сталь; б — сталь; в — твердый сплав; г — твердый сплав); и с прокачкой жидкости через электрод.



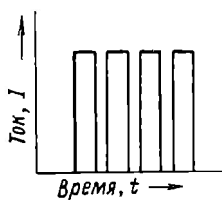
Фиг. 15. Осциллограмма, показывающая образование дуги при отсутствии диэлектрической жидкости в месте прохождения разрядов.



Фиг. 16. Чистота поверхности в зависимости от частоты разрядов.



Фиг. 17. Чистота поверхности стенок отверстий, обработанных на различных частотах.

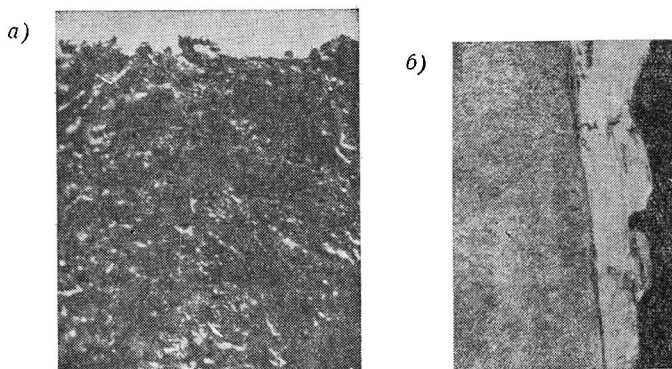


Фиг. 18. Схематическое изображение повторения импульсов тока.

плавления захватывают не только кобальт, но также и карбиды вольфрама.

Явления расплавления наблюдаются более отчетливо при обработке металлов с меньшей температурой плавления, например, на фиг. 19 показана поверхность хромованадиевой стали, обработанной искровыми разрядами. Условия работы: $U = 220$ в; $I = 2$ а; $C = 50$ мкф; толщина пластинки 6 мм; диаметр электрода-инструмента 6 мм. Длительность обработки 15 мин.

Высокая температура вызывает в этой стали образование специфической структуры поверхности, причем любопытными являются



Фиг. 19. Качество поверхности стенок отверстия в хромованадиевой стали: а — оплавленная поверхность; б — микрошлиф поверхности.

отдельные вкрапления частиц меди. Эти частицы меди переносятся с катода на анод, внедряются в его поверхность и прочно привариваются к ней. При прошивании электролитического железа с микротвердостью в 170 кг/мм^2 (при нагрузке 20 г) поверхностный слой приобретает твердость в 790 кг/мм^2 . В этом поверхностном слое обнаруживается некоторое количество цементита и отдельные иглы мартенсита; основная же часть, согласно рентгенографическому исследованию, является аустенитом. Так как эта фаза устойчива только при высоком содержании углерода, то очевидно, что произошло интенсивное науглероживание.

Такое повышение поверхностной твердости может быть использовано при изготовлении некоторых инструментов.

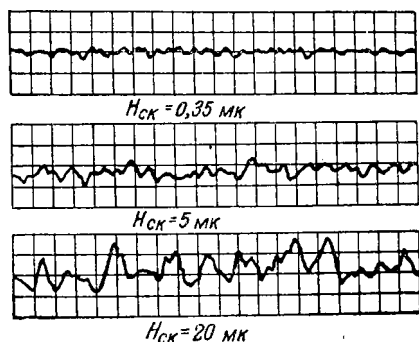
Авторы считают, что процесс съема металла при искровой обработке имеет комплексную природу и протекает различно в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

Основную роль играют разнообразные явления, как, например, термические напряжения, испарение и катодное распыление, но более точный анализ этих явлений требует постановки тщательных исследований. В то же время авторы считают твердо установленным, что изменения поверхностного слоя имеют столь ограниченную глубину, что он удаляется при последующей обработке, не оказывая существенного влияния на эксплуатацию детали.

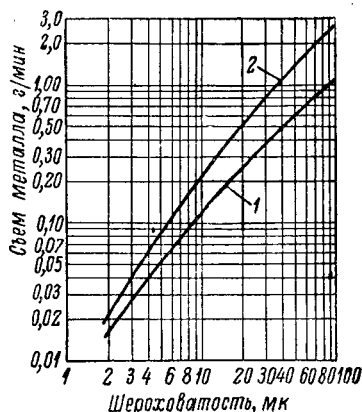
Несколько другие данные о чистоте поверхности закаленной стали приводит фирма «Charmilles».

На фиг. 20 представлены профилограммы поверхности стальных изделий после обработки на станке Eleroda D-1.

Отмечается, что чистота поверхности, обработанной электроискровым способом с использованием схемы RLC, выше, чем при схеме RC, хотя скорость прошивания в последнем случае выше.



Фиг. 20. Примеры чистоты поверхности закаленной стали.



Фиг. 21. График зависимости чистоты поверхности и производительности при обработке на станке ND-5 (1) и D-101 (2).

В табл. 5 приведены данные о чистоте поверхности при обработке по схеме RC [10—23].

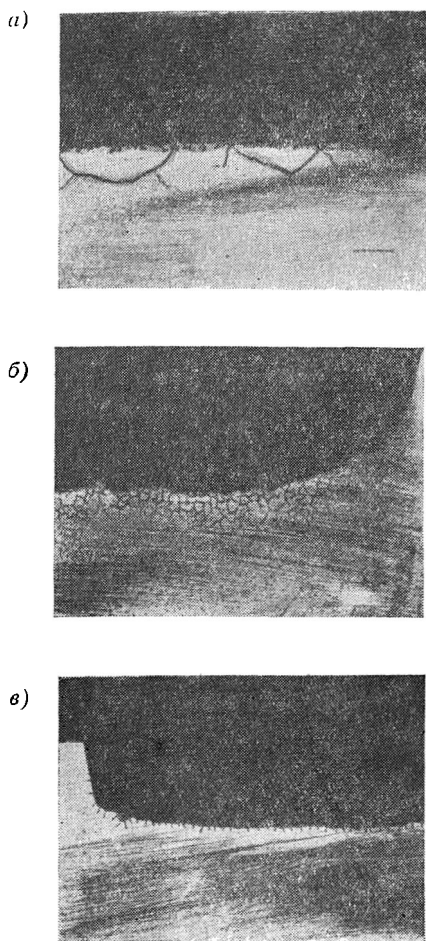
На фиг. 21 показана зависимость между чистотой поверхности и производительностью, установленная при обработке на станках моделей ND-5 и D-101 фирмы Ikegai Jарах [108] для электроискрового прошивания.

Таблица 5

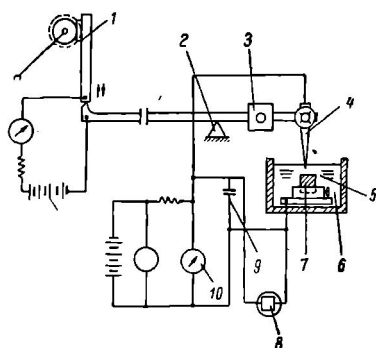
Чистота поверхности при обработке по схеме RC

Диаметр отверстия в мм	Сила тока в а	Скорость прошива- ния в мм/мин	Шероховатость по- верхности в мк
1,1	0,05	0,09	40
1,15	0,25	0,5	100
2,1	0,1	0,156	40
2,15	0,6	0,5	100
5,1	0,5	0,1	40
5,2	4,0	0,6	100
10,1	1,0	0,038	40
10,25	4,0	0,192	150

Изучение характера сетки трещин, получающихся при электроискровом шлифовании на твердом сплаве, проведенное Кига-фуи [103], показало, что трещины могут быть трех разновидностей, как это показано на фиг. 22.

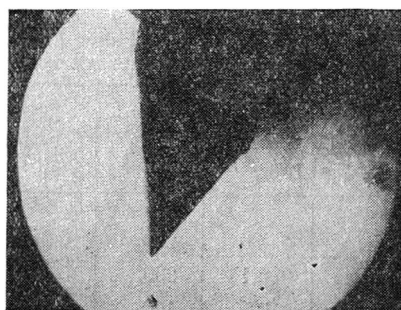


Фиг. 22. Типичные разновидности трещин на твердом сплаве после электроискрового шлифования.



Фиг. 23. Схема установки для проведения опытов по износу электродов:

1 — индикатор; 2 — призма; 3 — противовес; 4 — исследуемый электрод; 5 — межэлектродный промежуток; 6 — рабочая жидкость; 7 — электрод-анод; 8 — осциллограф; 9 — конденсатор; 10 — вольтметр.

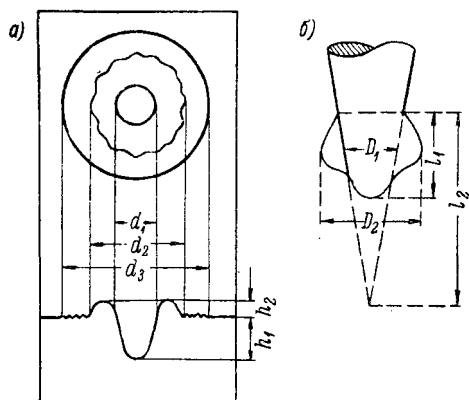


Фиг. 24. Острые электрода при увеличении.

Износ электродов. Иноуэ [104] провел серию опытов, в которых изучался характер разрушения поверхности электродов, связь между величиной и характером эрозии и энергией разряда и влияние полярности электрода на его эрозию.

Исследование выполнялось с плоскими и игольчатыми электродами строго определенных размеров, при помощи установки, схематически представленной на фиг. 23.

При помощи микрометрического устройства в этой установке была создана возможность измерять перемещение электродов с точностью до 0,001 мм. Контроль электродов перед разрядом производился с помощью оптических приборов. Глубина лунки и высота выплесков металла после разряда измерялась при помощи оптико-механического прибора при увеличениях $\times 1000$ и $\times 5000$.



Фиг. 25. Размеры электродов, измерявшиеся после разряда:

а) лунка на плоском электроде: d_1 — диаметр кратера; d_2 — диаметр выплесков; d_3 — диаметр кольца брызг; h_1 — глубина лунки до поверхности металла; h_2 — высота выплеска; б) конец игольчатого электрода: l_1 — длина после разряда; l_2 — длина до разряда; D_1 — диаметр части, на которой образовался нарост после разряда; D_2 — диаметр части вместе с наростом после разряда.

На фиг. 24 показан вид острия электрода при увеличении, а на фиг. 25 измерявшиеся при исследовании размеры лунки (а) и конца электрода (б).

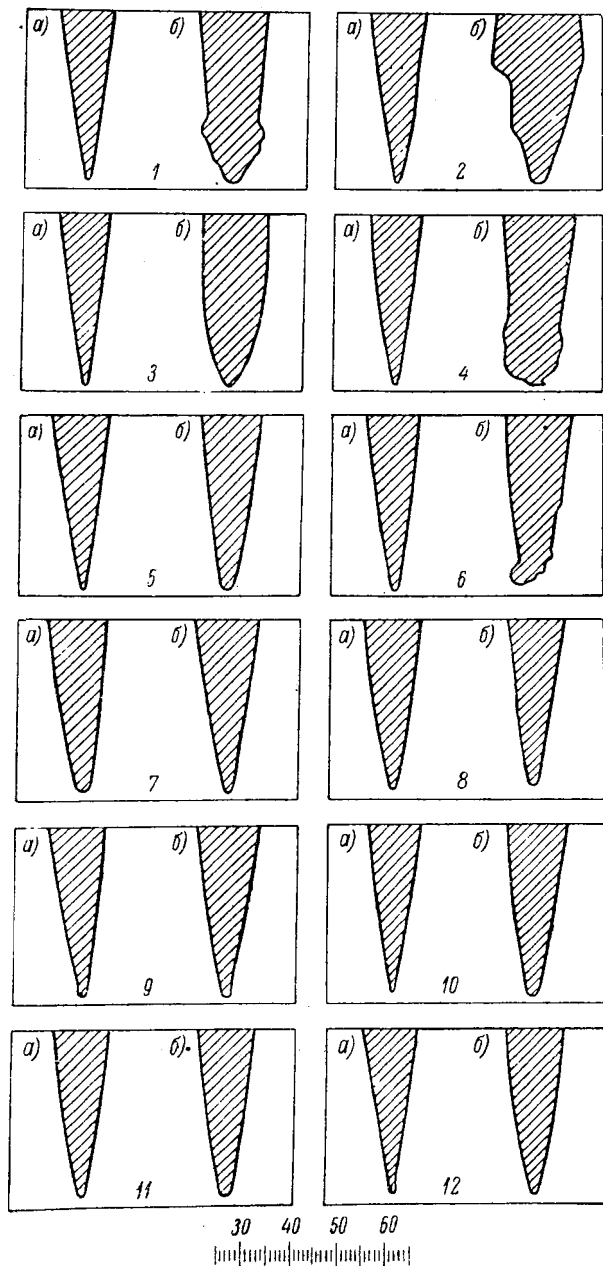
На фиг. 26 представлен вид концов игольчатых электродов после воздействия на них разрядов.

Условия опытов и данные замеров сведены в табл. 6.

Износ игольчатых электродов
Напряжение зарядки конденсатора — 150 в, среда — масло

Таблица 6

№ пози- ций по фиг. 26	Начальное напряже- ние раз- рядки в в	Емкость конденса- тора в мкф	Энергия разряда в вт-сек	$l_2 - l_1$ в мм	$D_2 - D_1$ в мм	Поляр- ность включения электрода
1	90	200	$6,8 \cdot 10^{-1}$	1,56	0,159	Катод
2	91	200	$5,8 \cdot 10^{-1}$	1,45	0,099	Анод
3	100	100	$4,6 \cdot 10^{-1}$	1,45	0,091	Катод
4	100	100	$3,6 \cdot 10^{-1}$	1,20	0,101	Анод
5	98	10	$4,4 \cdot 10^{-2}$	0,82	0,083	Катод
6	98	10	$4,0 \cdot 10^{-2}$	0,50	0,061	Анод
7	100	1	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,56	0,032	Катод
8	90	1	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0,22	0,045	Анод
9	100	0,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,55	0,041	Катод
10	92	0,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,053	Анод
11	98	0,02	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,48	0,022	Катод
12	100	0,02	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0,135	0,022	Анод



Фиг. 26. Внешний вид игольчатых электродов до (а) и после (б) разряда при увеличении (см. табл. 6).

На фиг. 27 приведен внешний вид кратеров на плоских электродах. Условия опытов и данные замеров сведены в табл. 7.

На фиг. 28 показаны внешние виды лунок при увеличении $\times 50$ после различных по мощности разрядов и профилограммы этих лунок — при увеличении $\times 50$ горизонтально и $\times 1000$ вертикально.

Таблица 7

Изменение размеров лунок и износ электродов в зависимости от параметров схемы и энергии разряда

Электроды плоские. Среда — масло. Напряжение заряда конденсатора — 150 в.

№ позиции по фиг. 27	Начальное напряжение разряда в в	Емкость конденсатора в мкф	Энергия разряда в вт-сек	d_1 в мм	d_2 в мм	d_3 в мм	h_1 в мм	h_2 в мм	Полярность включения электрода
1	90	200	$6,8 \cdot 10^{-1}$	0,94	1,22	1,5	0,016	0,008	Катод
2	91	200	$5,8 \cdot 10^{-1}$	0,56	1,08	1,72	0,029	0,015	Анод
3	100	100	$4,6 \cdot 10^{-1}$	0,74	0,98	1,31	0,014	0,007	Катод
4	100	100	$3,6 \cdot 10^{-1}$	0,41	0,80	1,3	0,026	0,013	Анод
5	98	10	$4,4 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,3	—	0,008	0,002	Катод
6	98	10	$4 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,22	0,29	0,018	0,006	Анод
7	100	1	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,13	—	—	—	Катод
8	90	1	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,11	0,12	0,007	—	Анод
9	100	0,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,11	—	—	—	Катод
10	92	0,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,10	—	0,005	—	Анод
11	98	0,02	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,03	0,07	—	—	—	Катод
12	100	0,02	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0,05	0,08	—	—	—	Анод

Как видно из данных табл. 7 и фиг. 27, наблюдается закономерное изменение размеров лунки (диаметр, глубина, объем выплеснутого металла и др.) с изменением энергии разряда.

Эти изменения носят одинаковый характер (хотя различны по абсолютным величинам) как у катода, так и у анода в широком диапазоне параметров режима.

В табл. 8 даны условия получения разрядов.

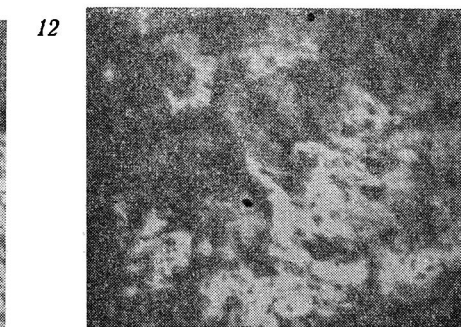
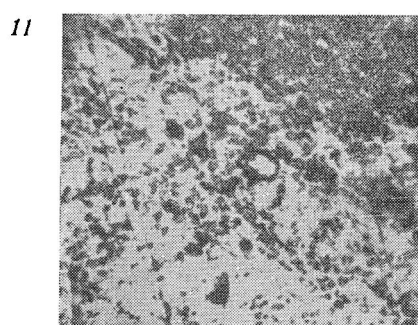
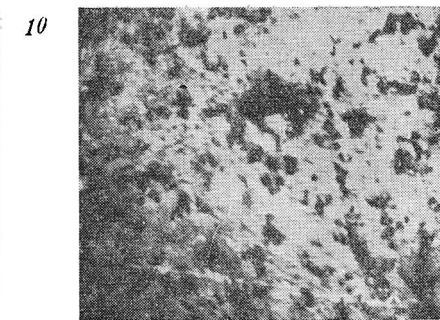
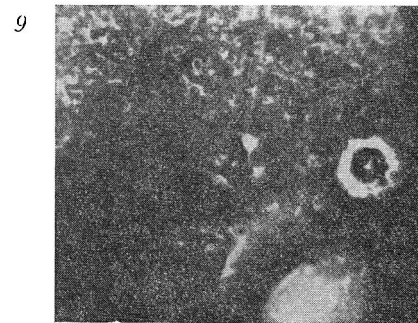
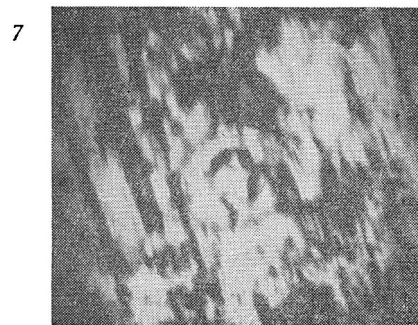
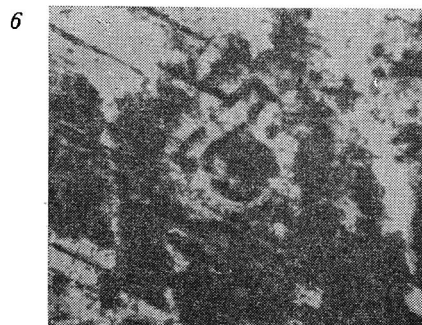
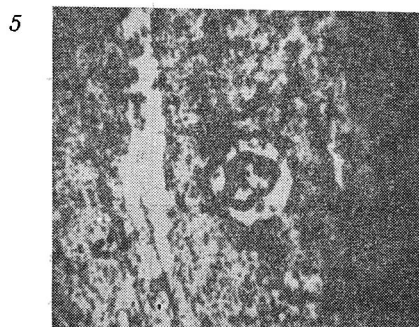
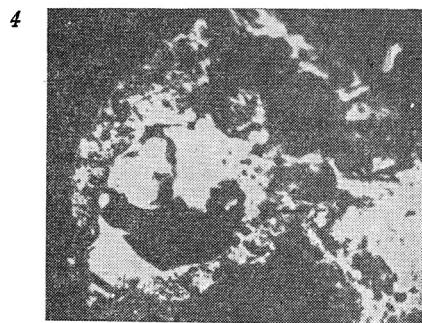
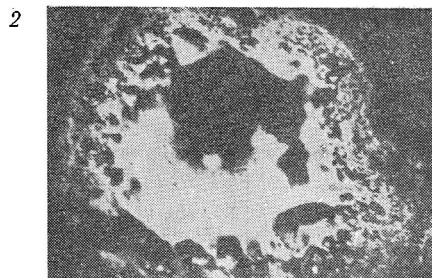
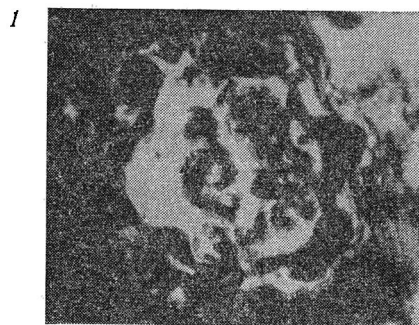
В табл. 9—12 и на фиг. 29 приведены представляющие значительный интерес для уточнения технологических характеристик электроискровой обработки данные [104] о зависимости износа электродов, при различной форме и полярности их, от энергии разряда и других электрических параметров процесса.

Таблица 8

Характеристика условий получения разрядов при исследовании зависимости эрозии электродов от параметров режима

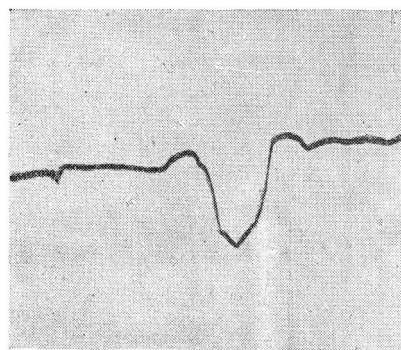
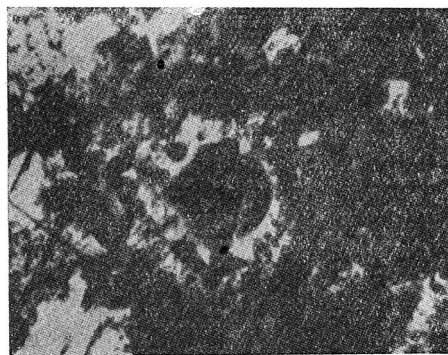
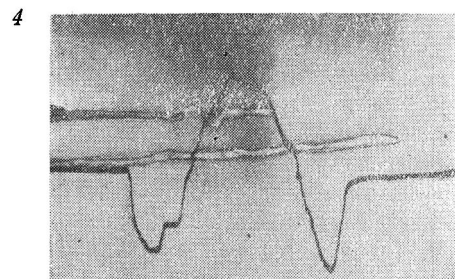
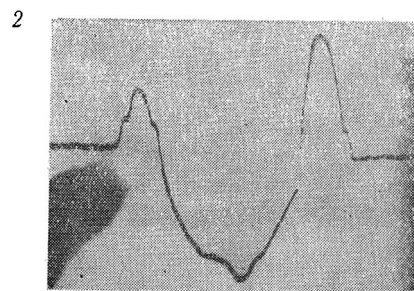
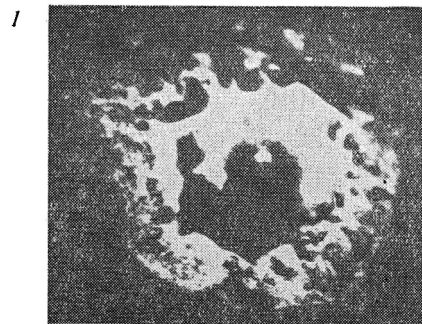
№ позиций на фиг. 28	Емкость конденсатора в мкф	Напряжение начала разряда в в	Энергия разряда в вт-сек	Полярность включения электрода
1 2	200	91	$5,8 \cdot 10^{-1}$	Катод
3 4	100	100	$3,6 \cdot 10^{-1}$	Катод
5 6	10	98	$4 \cdot 10^{-2}$	Катод
7 8	200	90	$6,8 \cdot 10^{-1}$	Анод
9 10	100	100	$4,6 \cdot 10^{-1}$	Анод
11 12	10	98	$4,4 \cdot 10^{-2}$	Анод

Как видно из графиков фиг. 29, во всех случаях сохраняется отмеченный выше характер закономерного изменения количества удаленного металла (диаметра и глубины лунки, высоты валика и т. д.) в зависимости от энергии разряда. Изменяются лишь абсолютные значения величин с изменением формы электродов, их полярности и мощности.

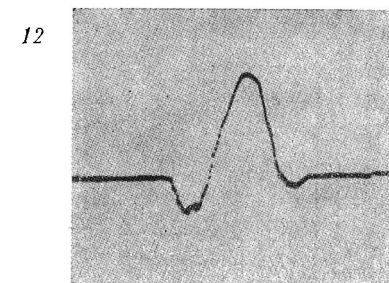
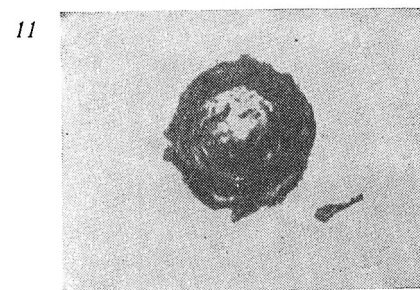
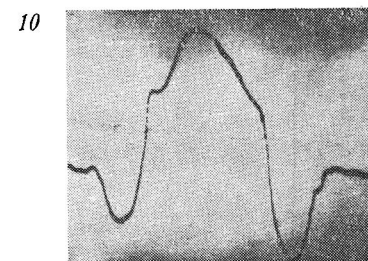
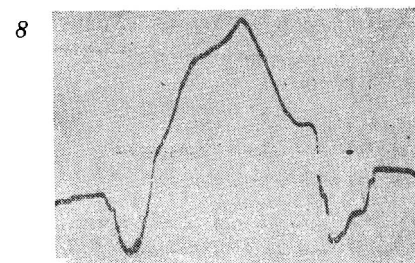


Фиг. 27. Внешний вид кратеров на плоских

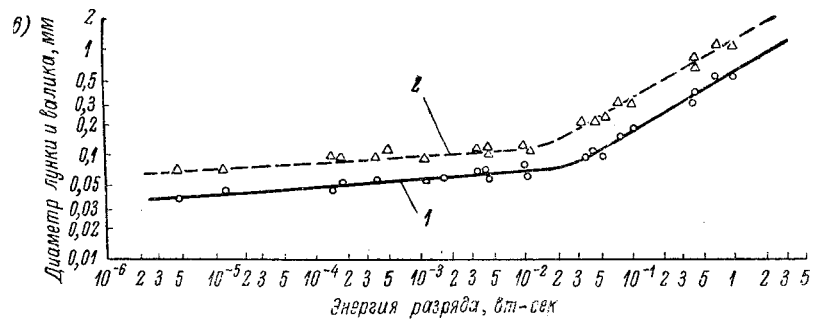
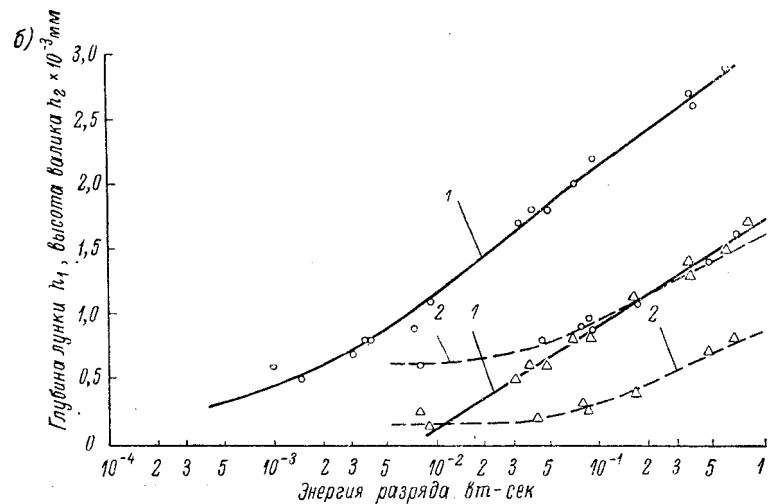
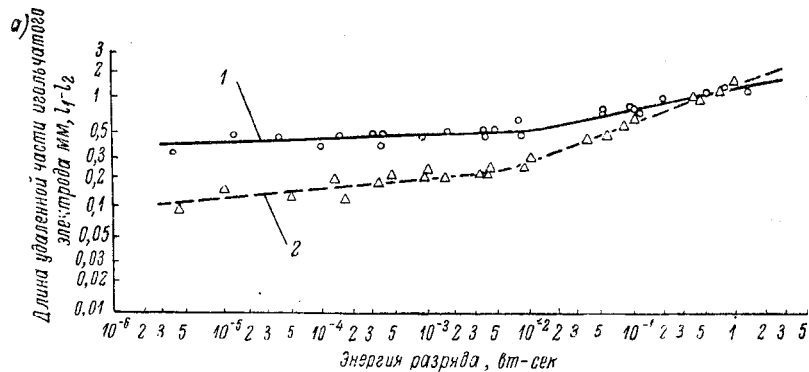
электродах $\times 20,5$ (см. табл. 7.).



Фиг. 28. Внешний вид и профиллограммы

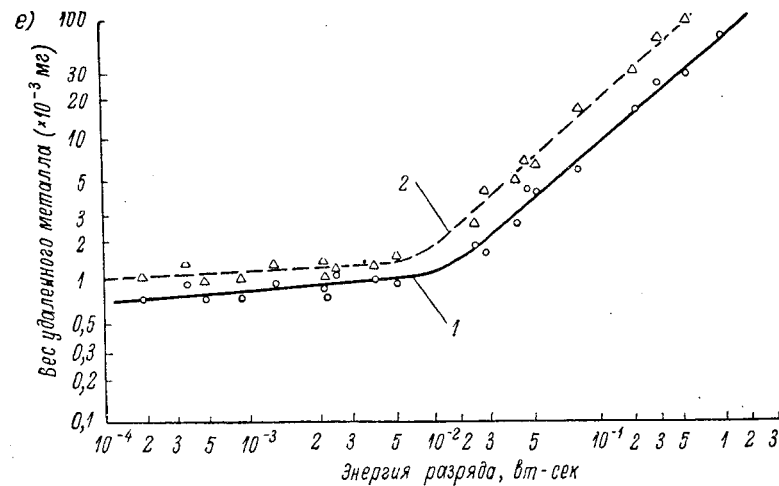
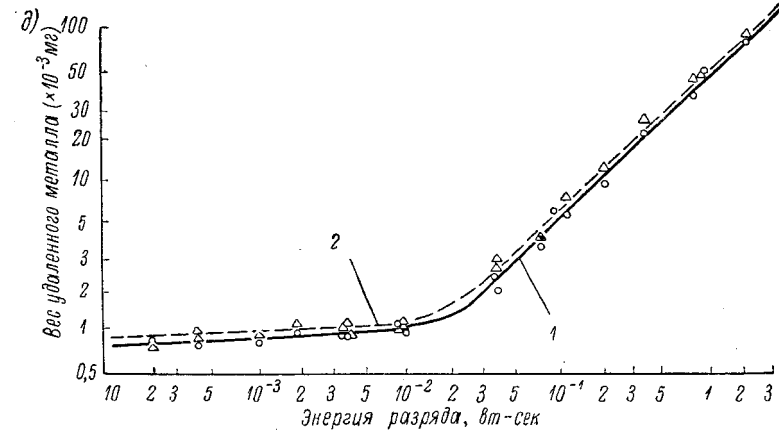
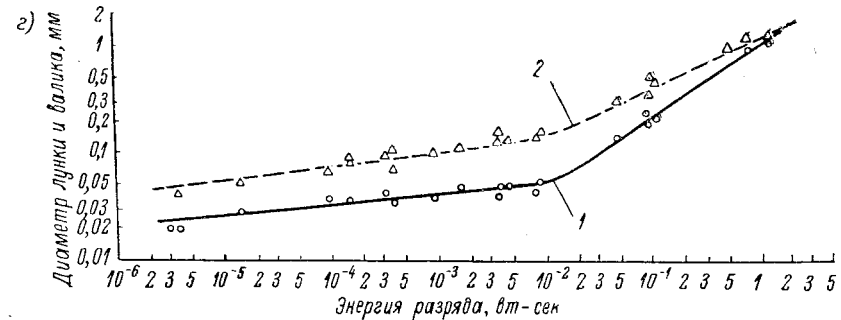


кратеров на плоских электродах (см. табл. 8).



Фиг. 29. Графики зависимости длины разрушения электрода (а), глубины лунки и высоты выплеска (б), диаметра лунки и выплеска (в и г) от энергии разряда:

а) 1 — игольчатый электрод (+); 2 — игольчатый электрод (—); б) 1 — плоский электрод (+); 2 — плоский электрод (—); в) 1 — игольчатый электрод (+); 2 — плоский электрод (—); г) 1 — игольчатый электрод (—); 2 — плоский электрод (+).



ны лунки и высоты выплесков (б), диаметра лунки и выплеска (в и г) (д и е) от энергии разряда:

электрод (—); 2 — плоский электрод (+); в и г) 1 — диаметр лунки; 2 — диаметр выплеска; д) 1 — игольчатый электрод (—); 2 — плоский электрод (+).

Износ электродов при разных условиях

Емкость конденсаторов в мкф	Напряжение начала разряда в в	Остаточное напряжение в в	Энергия разряда в вт-сек	Деформация плоского электрода (катод) в мм				Деформация игольчатого электрода (анод) в мм	
				d_1	d_2	h_1	h_2	l_1-l_2	D_2-D_1
200	150	78	1,6	0,82	1,44	0,032	0,019	1,92	0,168
	91	30	$5,8 \cdot 10^{-1}$	0,56	1,08	0,029	0,015	1,45	0,099
	69	30	$3,5 \cdot 10^{-1}$	0,32	0,65	0,027	0,014	1,30	0,144
	31	16,5	$6,9 \cdot 10^{-2}$	0,18	0,30	0,020	0,008	0,62	0,110
100	150	80	$8,1 \cdot 10^{-1}$	0,55	1,12	0,032	0,017	1,83	0,095
	100	53	$3,6 \cdot 10^{-1}$	0,41	0,80	0,026	0,013	1,20	0,101
	37	20	$4,8 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,21	0,018	0,006	0,50	0,060
	30	16	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,095	0,20	0,017	0,005	0,46	0,094
10	150	66	$9,1 \cdot 10^{-2}$	0,18	0,36	0,022	0,008	0,75	0,78
	98	41	$4,1 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,22	0,018	0,006	0,50	0,061
	47	18	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,11	0,011	0,002	0,30	0,053
	30	12,5	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,11	0,008	—	0,22	0,054
1	150	75	$8,4 \cdot 10^{-3}$	0,08	0,10	0,009	—	0,25	0,065
	90	43	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,1	0,007	—	0,22	0,045
	48	15	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,09	0,006	—	0,23	0,037
	30	14,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,055	0,09	—	—	0,17	0,039
0,5	150	81	$4 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,10	0,008	—	0,25	0,060
	92	51	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,10	0,005	—	0,20	0,053
	45	15	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,11	—	—	0,21	0,033
	30	16,5	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,05	0,09	—	—	0,12	0,027
0,02	150	96	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,05	0,09	—	—	0,18	0,026
	100	70	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0,05	0,08	—	—	0,35	0,032
	38	15	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,04	0,07	—	—	0,5	0,022
	29	20,5	$4,3 \cdot 10^{-6}$	0,037	0,07	—	—	0,09	—

Износ электродов при разных условиях

Емкость конденсаторов в $\mu\text{кф}$	Напряжение разряда в в	Остаточное напряжение в в	Энергия раз- ряда в вт-сек	Плоский электрод (анод) в мм				Игольчатый электрод (катод) в мм	
				d_1	d_2	h_1	h_2	l_1-l_2	D_2-D_1
200	155	55	1,9	1,94	2,42	0,018	0,010	1,80	0,097
	90	36	$6,8 \cdot 10^{-1}$	0,94	1,20	0,016	0,008	1,56	0,159
	44	16,5	$1,7 \cdot 10^{-1}$	0,33	0,52	0,010	0,004	1,22	0,092
	31	12	$8,2 \cdot 10^{-2}$	0,24	0,36	0,009	0,003	0,98	0,084
100	150	33	1,1	0,74	1,22	—	—	1,52	0,111
	100	27	$4,6 \cdot 10^{-1}$	0,74	0,98	0,014	0,007	1,45	0,091
	45	17	$8,7 \cdot 10^{-2}$	0,19	0,52	0,009	0,004	0,93	0,058
	31	8,1	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,30	0,008	0,002	0,90	0,060
10	150	44	$1,0 \cdot 10^{-1}$	0,22	0,38	—	—	0,89	0,056
	98	28	$4,4 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,30	0,008	0,002	0,82	0,083
	42	12	$8,1 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,16	0,006	0,002	0,75	0,055
	30	8,5	$4,1 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,13	—	—	0,58	0,055
1	150	87	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,14	—	—	0,53	0,046
	100	57	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,13	—	—	0,56	0,032
	43	11	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,04	0,11	—	—	0,48	0,031
	30	17	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,04	0,09	—	—	0,50	0,021
0,5	150	94	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,16	—	—	0,53	0,047
	100	63	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,11	—	—	0,54	0,041
	40	12	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,04	0,08	—	—	0,39	0,034
	30	19	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,035	0,08	—	—	0,48	0,027
0,02	150	115	$9,3 \cdot 10^{-5}$	0,04	0,07	—	—	0,41	0,022
	98	75	$3,9 \cdot 10^{-5}$	0,03	0,07	—	—	0,48	0,022
	40	15	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,03	0,05	—	—	0,48	0,017
	30	23	$3,7 \cdot 10^{-6}$	0,02	0,04	—	—	0,32	—

Зависимость между энергией разряда и потерей в весе плоского электрода
(анод железо, разряд в масле)

Емкость конденсатора в мкф	Напряже- ние начала разряда в в	Остаточ- ное на- пряжение в в	Энергия раз- ряда в вт-сек	Потеря в весе иголь- чатого электрода (катод) $\times 10^{-3}$ мг	Потеря в весе плос- кого электрода (анод) $\times 10^{-3}$ мг	Число опытов для получе- ния средних значений
	Средние значения					
200	150	55	1,9	58	115	100
	90	34	$6,9 \cdot 10^{-1}$	26	52	100
	50	22	$2,0 \cdot 10^{-1}$	6,2	17	200
	31	15	$7,4 \cdot 10^{-2}$	2,6	5,2	500
100	150	33	1,1	30,5	73	100
	100	22	$4,8 \cdot 10^{-1}$	17	32	200
	45	17	$8,7 \cdot 10^{-2}$	4,5	7,0	500
	30	12	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,8	2,6	1000
10	150	44	$1,0 \cdot 10^{-1}$	4,3	6,8	500
	90	28	$4,5 \cdot 10^{-2}$	1,6	4,5	1000
	50	15	$1,1 \cdot 10^{-2}$	0,95	1,5	1000
	30	10	$4,0 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,15	1000
1	150	87	$7,5 \cdot 10^{-3}$	1,0	1,3	1000
	100	59	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,88	1,4	1000
	43	11	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,78	1,05	5000
	32	8,5	$4,8 \cdot 10^{-4}$	0,85	1,0	5000
0,5	150	94	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,76	1,1	1000
	100	64	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,92	1,3	1000
	40	12	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,95	1,4	5000
	30	13	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,75	1,1	5000

Таблица 12

Зависимость между энергией разряда и потерей в весе плоского электрода
(катод железо, разряд в масле)

Емкость конденсатора в мкф	Напряже-ние начала разряда в в	Остаточное напряже-ние в в	Энергия раз-ряда в вт-сек	Потеря в весе игольчатого электрода (анода) $\times 10^{-3}$ мг	Потеря в весе плоского электрода (катода) $\times 10^{-3}$ мг	Число опытов для получения средних значений
	Средние значения					
200	150	78	1,6	82	91	100
	100	52	$7,3 \cdot 10^{-1}$	36	45	100
	50	24	$1,9 \cdot 10^{-1}$	9,2	11,5	200
	30	12,5	$7,4 \cdot 10^{-2}$	3,5	4	500
100	150	80	$8,1 \cdot 10^{-1}$	52	48	200
	100	55	$3,5 \cdot 10^{-1}$	21	24	200
	50	20	$1,1 \cdot 10^{-1}$	6,0	7,5	500
	30	13	$3,7 \cdot 10^{-2}$	2,4	2,5	500
10	150	66	$9,1 \cdot 10^{-2}$	6,2	5,8	500
	97	42	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,8	2,9	1000
	47	18	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,95	1,1	5000
	30	12,5	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,90	1,05	5000
1	150	75	$8,4 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,0	5000
	100	49	$3,8 \cdot 10^{-3}$	0,88	1,1	5000
	48	15	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,82	0,91	5000
	30	9,5	$4,1 \cdot 10^{-4}$	0,79	0,95	10 000
0,5	150	81	$4 \cdot 10^{-3}$	1,0	0,95	5000
	100	54	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,95	1,1	5000
	42	13	$4,0 \cdot 10^{-4}$	0,81	0,90	10 000
	30	9,5	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,82	0,80	10 000

Зависимости, установленные Ипопе [104] в отношении связи результатов эрозии и энергии разряда (A , *вт-сек*), выражаются следующими уравнениями.

1. Высота валика ($D_2 - D_1$) игольчатого электрода:

$$D_2 - D_1 = 0,14A^{0,2} \quad (1 \cdot 10^{-5} < A < 1)$$

при электроде (+) и

$$0,14A^{0,15} \quad (1 \cdot 10^{-5} < A < 1)$$

при электроде (-).

Длина ($l_1 - l_2$) удаленной части игольчатого электрода (в мм):

$$\left. \begin{array}{l} l_1 - l_2 = 0,7A^{0,05} \quad (5 \cdot 10^{-6} < A < 5 \cdot 10^{-3}) \\ \text{или} \\ 1,6A^{0,24} \quad (2 \cdot 10^{-2} < A < 1) \\ l_1 - l_2 = 0,38A^{0,1} \quad (5 \cdot 10^{-6} < A < 3 \cdot 10^{-3}) \\ \text{или} \\ 1,8A^{0,42} \quad (1 \cdot 10^{-2} < A < 1) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{при электроде (+)} \\ \\ \\ \text{(при электроде (-)).} \end{array}$$

2. Глубина (h_1) лунки и высота (h_2) валика плоского электрода (в 1/1000 мм):

$$\left. \begin{array}{l} h_1 \approx 6,5 \lg A + 16 \quad (3 \cdot 10^{-1} < A < 1) \\ h_2 \approx 5,5 \lg A + 8,5 \quad (3 \cdot 10^{-1} < A < 1) \end{array} \right\} \text{при электроде (+)}$$

$$\left. \begin{array}{l} h_1 \approx 10 \lg A + 31 \quad (5 \cdot 10^{-3} < A < 1) \\ h_2 \approx 8 \lg A + 17 \quad (1 \cdot 10^{-2} < A < 1) \end{array} \right\} \text{при электроде (-).}$$

Диаметр (d_1) лунки и (d_2) валика плоского электрода в мм:

$$\left. \begin{array}{l} d_1 \approx 0,1 A^{0,08} \quad (5 \cdot 10^{-6} < A < 5 \cdot 10^{-3}) \\ \text{или} \\ d_1 \approx 0,68 A^{0,56} \quad (3 \cdot 10^{-2} < A < 1) \\ d_2 \approx 0,15 A^{0,007} \quad (5 \cdot 10^{-6} < A < 5 \cdot 10^{-3}) \\ \text{или} \\ d_2 \approx 1,3 A^{0,56} \quad (2 \cdot 10^{-2} < A < 1) \end{array} \right\} \text{при электроде (-)}$$

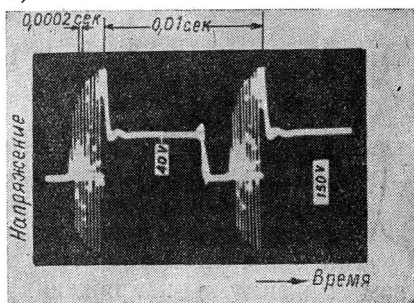
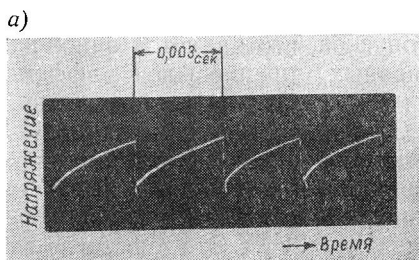
$$\left. \begin{array}{l} d_1 \approx 0,08 A^{0,1} \quad (3 \cdot 10^{-6} < A < 3 \cdot 10^{-3}) \\ \text{или} \\ d_1 \approx 1,1 A^{0,17} \quad (1 \cdot 10^{-2} < A < 1) \\ d_2 \approx 0,25 A^{0,15} \quad (3 \cdot 10^{-6} < A < 3 \cdot 10^{-3}) \\ \text{или} \\ d_2 \approx 1,2 A^{0,47} \quad (1 \cdot 10^{-2} < A < 1) \end{array} \right\} \text{при электроде (+).}$$

3. Вес (W) металла, удаленного с электродов (в 10^{-3} мг), равен:

$$\begin{array}{l}
 W \approx 1,4 A^{0,075} (2 \cdot 10^{-4} < A < 8 \cdot 10^{-3}) \\
 \text{или} \\
 W \approx 55 A (3 \cdot 10^{-3} < A < 1,6) \\
 W \approx 1,4 A^{0,006} (2 \cdot 10^{-4} < A < 8 \cdot 10^{-3}) \\
 \text{или} \\
 W \approx 5,9 A^{0,99} (3 \cdot 10^{-3} < A < 1,6) \\
 W \approx 1,7 A^{0,006} (2 \cdot 10^{-4} < A < 8 \cdot 10^{-3}) \\
 \text{или} \\
 W \approx 6,8 A^{0,96} (3 \cdot 10^{-2} < A < 1,9) \\
 W \approx 1,4 A^{0,07} (2 \cdot 10^{-4} < A < 8 \cdot 10^{-3}) \\
 \text{или} \\
 W \approx 31 A^{0,96} (4 \cdot 10^{-2} < A < 1,9)
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{при игольчатом} \\ \text{электроде (+),} \\ \\ \text{при игольчатом} \\ \text{электроде (-),} \\ \\ \text{при плоском} \\ \text{электроде (+),} \\ \\ \text{при плоском} \\ \text{электроде (-).} \end{array}$$

Методика получения этих данных аналогична описанной выше.

Производительность. Одним из существенных преимуществ схемы RLC перед схемой RC является возможность получения в первом случае повышенной частоты разрядов в межэлектрод-



Фиг. 30. Изменение напряжения:

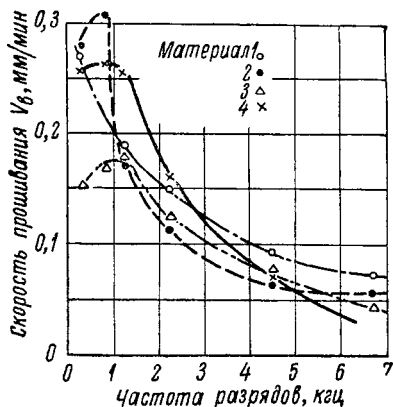
а) в релаксационной схеме; б) в схеме с осциллятором.

ном зазоре. Эта особенность схемы RLC, естественно вытекающая из принципа ее действия, неоднократно подтверждалась в различных работах. На фиг. 30 даны [10 и 12] осциллограммы разрядов, наглядно иллюстрирующие указанное выше различие.

Влияние частоты разрядов на скорость электроискровой обработки при использовании схемы RLC представлено на фиг. 31 [10, 12] для нескольких материалов. Электродом служил латунный прут $\varnothing 1$ мм, напряжение составляло 40 в, сила тока — 0,2 а.

Как видно из кривых (фиг. 31), для всех исследованных материалов максимальная производительность падает с повышением

частоты разрядов. При очень низких частотах также имеет место падение производительности. Для каждого из исследованных материалов имеется оптимум частоты, при которой скорость обработки максимальна. Так, например, для стали V2A это 300 гц, для твердого сплава S4 — 1120 гц. Авторы отмечают, что абсолютные значения скорости прошивания, представленные на фиг. 31, не являются максимальными для данного способа вообще, а действительны лишь для данного напряжения и мощности. В других условиях скорости обработки совершенно отличны.



Фиг. 31. Скорость обработки отверстия в зависимости от частоты:

1 — хромоникелевая сталь V2A; 2 — твердый сплав РМС с титаном; 3 — твердый сплав S4; 4 — хромоникелевая сталь V4A.

Эффективный способ значительного повышения производительности электроискровой обработки предложен L. R. Blake [40]. Автор исходит из следующего: в станках с генераторами импульсов по схеме RC не менее 75% энергии теряется в балластных сопротивлениях и выделяется в виде тепла.

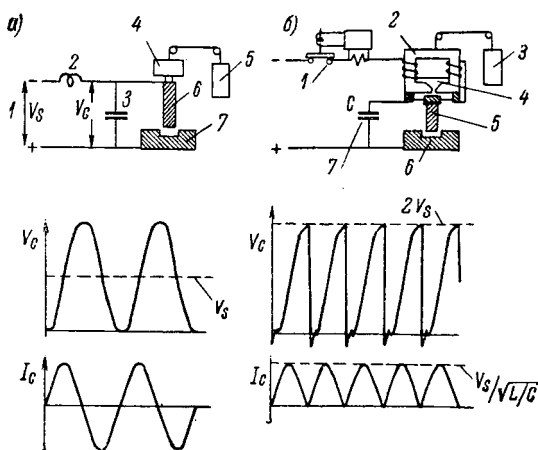
Балластное сопротивление может быть из схемы генератора импульсов исключено, если зарядку конденсаторов вести через индуктивность L. При этом необходимо, чтобы электрод-инструмент вибрировал, чем обеспечивается четкое повторение разрядов без пропусков, что является одной из основных предпосылок эффективной реализации мощности в межэлектродном промежутке.

Принципиальная схема генератора LC показана на фиг. 32 и 33.

На фиг. 34 показано V_c , колеблющееся около напряжения питания V_s и синусоидальный ток заряда с амплитудой $V_s (L/C)^{1/2}$.

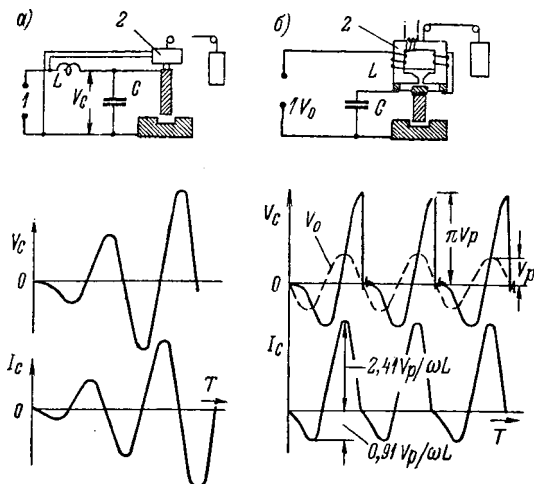
Для наилучшей работы желательно обеспечить разрядку на первом максимуме напряжения когда $V_c \cong 2V_s$. Это достигается вибрацией электрода с двойной частотой. Разрядка начинается как раз перед соприкосновением электродов, и разряды повторяются через точно отмеренные промежутки времени.

При таком методе зарядки через индуктивность и вибрации электрода-инструмента можно обеспечить его автоматическое продвижение (подачу) очень простым способом — при помощи уравнивания корпуса вибратора, предоставив ему двигаться под действием силы тяжести. Электрод ударяет по детали и отскакивает при каждом цикле, аналогично пневматическому инструменту. При этом возникают некоторые механические силы, но они невелики, если уравнивание почти полное. Хотя соприкосновение электродов при каждом цикле неизбежно, но это, в отличие от работы генератора с контуром RC, не снижает заметно эффективности зарядки, так как ток вначале зарядки мал, и энергия, вве-



Фиг. 32. Генератор LC , питаемый постоянным током:

а) схема генератора импульсов LC : 1 — источник постоянного тока; 2 — индуктивность; 3 — емкость; 4 — механический вибратор; 5 — противовес; 6 — электрод-инструмент; 7 — изделие, внизу — осциллограммы напряжения (V_c) и тока (I_c) на электродах в контуре LC ; б) — схема генератора импульсов с индуктивностью и электромагнитным вибратором, включенным в цепь зарядки: 1 — максимальный выключатель; 2 — электромагнитный вибратор; 3 — противовес; 4 — якорь; 5 — электрод-инструмент; 6 — обрабатываемая деталь; 7 — конденсатор; внизу осциллограмма изменения напряжения на электродах станка с генератором LC и электромагнитным вибратором.



Фиг. 33. Генератор LC , питаемый переменным током:

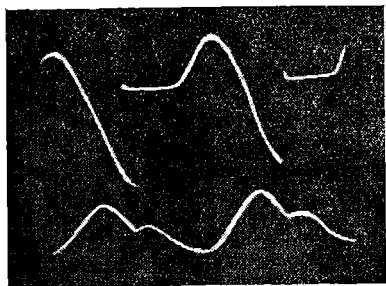
а) схема электромагнитного вибратора с подмагничивающей обмоткой: 1 — источник переменного тока; 2 — синхронизированный механический вибратор; внизу — осциллограмма тока и напряжения для схемы LC ; б) схема электромагнитного вибратора с независимым питанием: 1 — источник переменного тока; 2 — обмотка подмагничивания. Внизу — осциллограмма тока и напряжения.

денная в контур и накопленная в индуктивности, будет затем передана в конденсатор, когда электроды разойдутся.

Очень простое устройство выполняет функции одновременно индуктивности и вибратора, так как обмотка его включена последовательно в цепь. Перемещение якоря находится в фазе с магнитной силой, и желаемое движение электрода будет достигнуто, если собственная частота механической системы

$$f_m = \frac{1}{2} \pi (Kg/M)^{\frac{1}{2}}$$

(где K — жесткость; M — вибрирующая масса) высока по сравнению с собственной частотой контура $f = \frac{1}{\pi} (LC)^{1/2}$.



Фиг. 34. Оциллограмма напряжения на конденсаторе (верхняя) и зарядного тока (нижняя) у электроискрового станка LC на переменном токе.

Практически наилучшая работа обеспечивается при механической резонансной частоте, которая равна или меньше электрической, хотя конденсатор при этом стремится разрядиться до или за максимумом напряжения.

Для получения требуемой амплитуды вибрации порядка $\pm 0,25$ мм при высоких частотах необходима работа вблизи механической резонансной частоты.

Для ликвидации случайных коротких замыканий, неизбежных в процессе обработки, в цепи электромагнитного вибратора предусмотрен последовательно включенный максимальный выключатель. При возникновении короткого замыкания ток в контуре возрастает по закону

$$\frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right),$$

где R — полное сопротивление цепи (включая электроды).

Максимальное значение тока короткого замыкания значительно больше максимума рабочего тока $V / \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2}$, что используется для приведения в действие максимального выключателя (фиг. 32, б), прерывающего ток в цепи. После ликвидации короткого замыкания выключатель мгновенно включается снова. Таким способом можно ликвидировать короткое замыкание в несколько миллисекунд и этим избежать потери рабочего времени. При этом даже во время короткого замыкания энергия накапливается в индуктивности и затем реализуется конденсатором.

Williams, Woodford и Smith [34] установили, что загрязнение диэлектрика в зазоре является основной причиной ограничения

скорости резания. Загрязнение жидкости увеличивает частоту коротких замыканий. Однако при зарядке через индуктивность в зазоре можно реализовать 10 кВт в то время как при зарядке через сопротивление — менее 1 кВт.

Высокая эффективность эрозии была достигнута на этой мощности при обработке твердых сплавов различными электродами. Интенсивность съема твердого сплава составила 0,5 см³/мин, а сплава нимоник 80 достигла 2 см³/мин. При прошивании глубоких отверстий такая интенсивность обработки не достигается из-за необходимости очищать межэлектродный промежуток.

Коэффициент полезного действия станков с генератором LC составляет около 95%.

Если индуктор-вибратор поляризован при помощи обычной обмотки возбуждения, питаемой постоянным током, или при помощи постоянного магнита, можно пользоваться источником переменного тока. При этом собственная частота зарядной индуктивности и емкости $\dot{f} = \frac{1}{2\pi} (LC)^{-1/2}$ должна быть равной частоте источника.

Тогда напряжение на конденсаторе колеблется, если оно не ограничено разрядами между электродами, причем первый максимум сдвинут на $\frac{\pi}{2}$ от максимума напряжения источника, второй максимум на π и т. д., и величина каждого максимума меняется. Для того чтобы изделие было всегда анодом, необходимо разряд затормозить до второго максимума напряжения. Это может быть сделано при вибрации электрода с частотой источника при использовании комбинированного индуктора-вибратора (см. фиг. 33), причем вибратор поляризован для того, чтобы его частота была равна частоте намагничивающего тока.

Однако не имеет смысла работать с редко повторяющимися разрядами (50 или 60 гц), несмотря на то, что такой станок был бы дешев.

Благодаря тому, что среднее значение напряжения на конденсаторе может быть равным нулю, работа на переменном токе допускает применение импульсного трансформатора (matching transformer) с малой индуктивностью рассеяния, присоединяемого между зарядным конденсатором и электродами. Тогда может быть применен разрядный конденсатор малой емкости и высокого напряжения, дающий большую частоту при оптимальном значении напряжения.

При зарядке постоянным током применение импульсного трансформатора без синхронизации включения и отключения первичной обмотки трансформатора от контура невозможно, так как среднее напряжение на емкости не равно нулю. Если частота источника питания велика, импульсный трансформатор становится нежелательно большим, так как его величина определяется средним напряжением конденсатора и средне-квадратичным значением разрядного тока, который, как уже указывалось, намного больше средне-квадратичного значения зарядного тока.

При использовании генератора высокой частоты контур с зарядкой через индуктивность с импульсным трансформатором между конденсатором и электродами может быть успешно применен для электроискровой обработки на высокой мощности.

Изучением механизма электроэрозионных процессов систематически занимался Институт технической физики Чехословацкой Академии наук.

В одном из обширных исследований, проведенных в этом институте В. Н. Zitka [2], изучались: влияние материала электродов на величину эрозии, зависимость суммарной эрозии от расстояния между электродами, влияние геометрии междуэлектродного пространства на величину эрозии, зависимость суммарной величины эрозии от рабочей емкости и напряжения.

Исследования проводились на специально сконструированной установке.

В результате экспериментального изучения перечисленных выше зависимостей автор пришел к следующим представлениям о механизме электроэрозионного процесса при конденсированных разрядах в диэлектрической среде.

Энергия, первично освобожденная ударами носителей, вызывает на электродах изменения агрегатного состояния. При этом, вследствие термоионной эмиссии, на катоде освобождается меньше энергии, чем на аноде.

Влияние расстояний между электродами на величину их эрозии В. Н. Zitka изучал для различных материалов. Результаты экспериментов приведены на фиг. 35.

Величина искрового промежутка в этих экспериментах широко изменялась при рабочей емкости 500 мкф и рабочем напряжении 500 в.

Изучая влияние материала электродов на величину съема металла в процессе электрической эрозии, В. Н. Zitka установил зависимость, приведенную в табл. 13.

Таблица 13

Съем металла (в 10^{-4} г/1 разряд) с электродов при различных комбинациях электродного материала

Разряды — в воздухе; расстояние между электродами — 0,25 мм; рабочая емкость — 500 мкф; напряжение 500 в

	Pb	Sn	Zn	Cu	Al	Ni	Fe
Pb	50,5	52,2	10,0	12,2	8,8	6,5	3,9
	41,3	22,7	35,0	24,4	15,2	22,8	28,2
Sn	28,2	10,4	6,4	8,3	7,1	6,2	4,0
	59,5	15,2	33,0	14,5	9,8	11,5	12,5

	Pb	Sn	Zn	Cu	Al	Ni	Fe
Zn	41,8	22,5	8,7	6,4	5,9	2,0	2,2
	8,4	1,5	6,9	1,2	0,4	0,6	1,7
Cu	21,9	9,7	2,8	0,3	0,9	0,2	0,2
	6,1	1,6	1,1	0,6	0,9	0,8	0,9
Al	21,9	14,5	2,6	1,4	1,4	0,0	0,2
	8,8	2,8	5,9	2,2	2,9	1,3	1,8
Ni	25,5	7,3	5,1	2,5	1,3	1,1	0,1
	3,9	0,9	0,7	0,6	0,3	0,9	0,7
Fe	45,0	11,5	2,7	5,5	1,4	2,7	0,1
	3,8	2,3	0,7	0,9	0,3	1,1	0,8

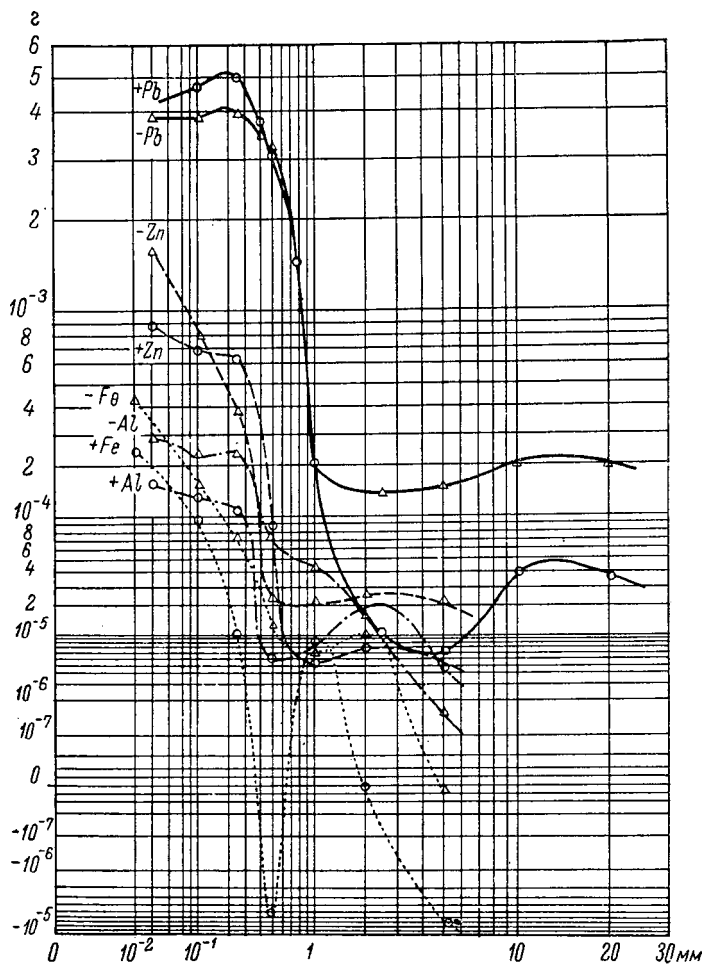
Примечание. Верхняя величина съема металла относится к аноду, а нижняя — к катоду.

Анализируя табл. 13, автор приходит к заключению, что съем, при одинаковых материалах обоих электродов, приблизительно обратно пропорционален теплоте плавления материалов электродов, причем этому правилу довольно хорошо подчиняются легкоплавкие металлы, тогда как у металлов более тугоплавких заметны довольно существенные отклонения. Отмечается также, что съем с анода у некоторых материалов убывает по направлению к более «твердым» материалам катода.

Предположение о том, что металл удаляется в процессе электрической эрозии с электродов в жидком виде, подтверждается тем обстоятельством, что удаленный металл застывает главным образом в виде правильных шариков.

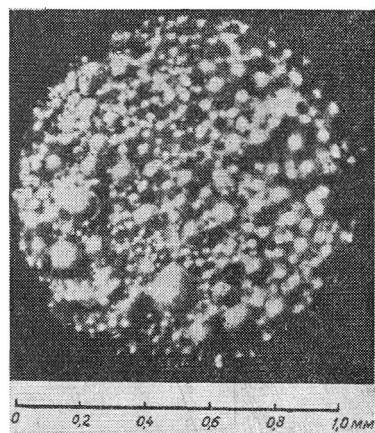
На фиг. 36 показан вид цинковых шариков, образовавшихся в результате электроэрозионного разрушения цинкового электрода [2].

Влияние рабочей жидкости на процесс. Исследования электроискрового прошивания, выполненные в лаборатории Kugafuyi [103], привели к результатам, показанным на фиг. 37 и в табл. 14—16. Линия 4 на фиг. 37 представляет деионизационную характеристику, а линии 1, 2, 3 — потенциал, до которого заряжается конденсатор

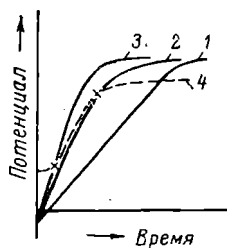


Фиг. 35. Зависимость величины износа от расстояния между электродами.

в схеме РС. Пересечение кривой 4 с кривыми 1—3 (знак X) соответствует началу разряда. На фиг. 38 даны зависимости, полученные в результате этих исследований при погружении электродов в различные жидкости.



Фиг. 36. Цинк, распыленный путем электроэрозии.

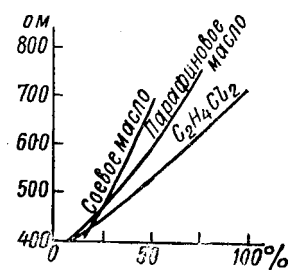
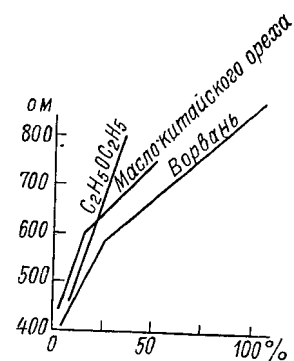
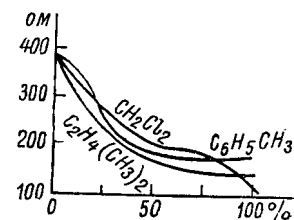
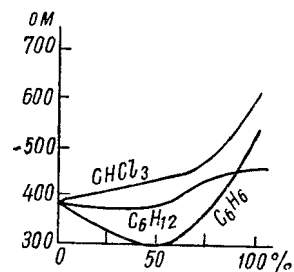
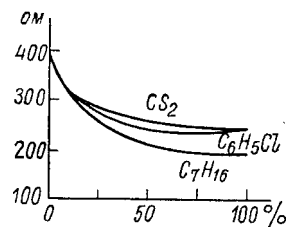
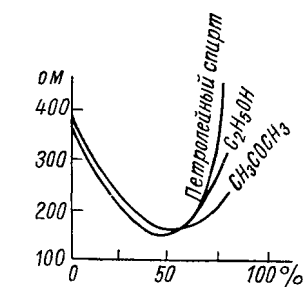


Фиг. 37. Зарядные кривые и характеристики деионизации.

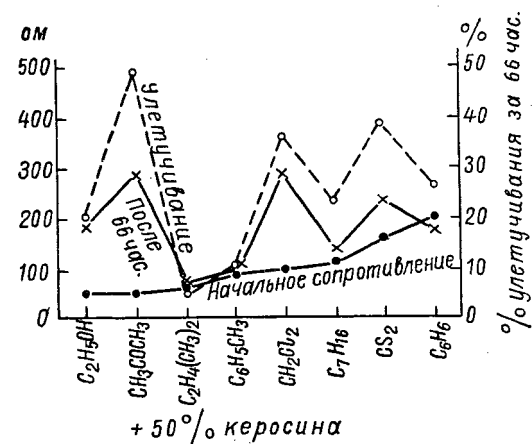
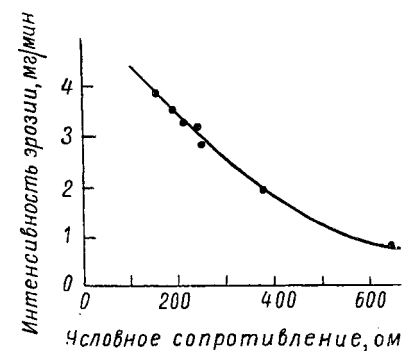
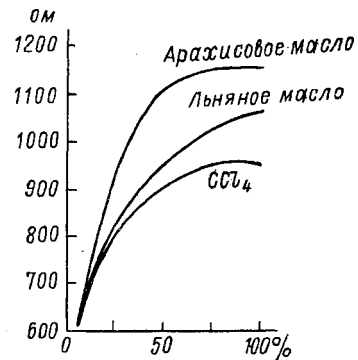
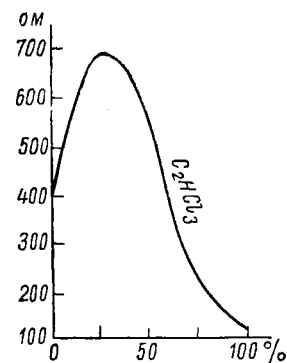
Таблица 14

Сравнительные деионизационные характеристики

Рабочая жидкость	Условное сопротивление в ом	Рабочая жидкость	Условное сопротивление в ом
Дистиллированная вода	60	Петролейный спирт . .	950
$C_2H_5Cl_3$	110	CCl_4	950
CH_2Cl_2	120	Масло китайского ореха	960
$C_2H_4(CH_3)_2$	140	Машинное масло . . .	970
$C_6H_5CH_3$	180	Жидкий парафин . . .	980
C_6H_{10}	190	Силиконовое масло . .	1000
CS_2	240	Скипидар	1010
$C_{16}H_{33}Cl$	250	Льняное масло	1050
Керосин	380	Масло	1150
C_6H_{12}	460	Масло	1170
$CHCl_3$	610	Масло	1280
C_2H_5OH	640	C_6H_6	1280
$C_2H_4Cl_2$	720	CH_3COCH_3	1515
CH_3OH	760	Масло	2030
Масло	840	Масло	2180
Масло	840	$CH_3COC_2H_5$	2600
Трансформаторное масло	920	$C_2H_5OC_2H_5$	4800



Фиг. 38. Влияние концентрации и состава среды на
Электрод — латунная проволока $\varnothing$ 1,5 мм; изделие — сталь с 1,3% С, емкость
промежут



Денонизационные характеристики.

6 мкф, напряжение постоянного тока — 100 в, среднее напряжение на
ке 45 в.

Скорость эрозии и сравнительные деионизационные характеристики

Рабочая жидкость	Условное сопротивление в ом	Скорость эрозии в мг/мин
$C_2H_4Cl_2$	640	0,8
Керосин	380	2,0
C_6H_5Cl	250	2,8
Керосин + C_6H_6 (1 : 1)	240	3,2
" + C_6H_5 (1 : 1)	210	3,4
" + C_7H_{16} (1 : 1)	190	3,5
" + $C_2H_4 (CH_3)_2$ (1 : 1)	150	3,9

Таблица 16

Добавка графитового порошка

Состав среды	Условное сопротивление в ом	Скорость эрозии в мг/мин
Керосин	300	4
" + графит 10 г/л	15	94
" + $C_2H_4 (CH_3)_2$ (1 : 1)	200	7
" + $C_2H_4 (CH_3)_2$ (1 : 1) + графит 10 г/л	10	112
" + C_7H_{16} (1 : 1)	180	8
" + C_7H_{16} (1 : 1) + графит 10 г/л	13	82

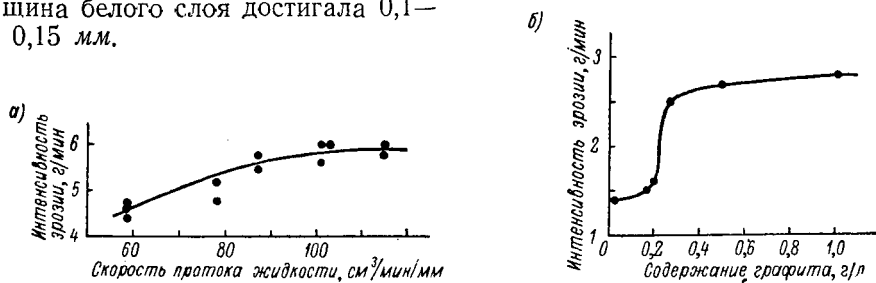
Для сохранения периода деионизации Kugaſuyi (103) было проведено нагнетание жидкости под повышенным давлением через трубчатый электрод. Это повысило частоту разрядов до нескольких сот килогерц (!) и чистоту поверхности до 0,4 мк ($H_{\text{макс}}$) при использовании обычного генератора РС.

Для образования прерывистой дуги Kugaſuyi были выполнены опыты с введением в нагнетаемую через электрод (или всасываемую) жидкость различных токопроводящих порошков.

В качестве материала электродов применялись латунь, уголь и графит.

Изучалось влияние наружного и внутреннего диаметра электрода на скорость эрозии и было установлено, что для нормальной работы необходимо пропускать 100 см³ жидкости в минуту через 1 мм² сечения электрода. Зависимость интенсивности съема металла от скорости рабочей жидкости показана на фиг. 39, а.

В качестве токопроводящих порошков испытывались железо, латунь, медь и графит. Наиболее удобным, с точки зрения осаждения, оказался графит. Количество вводимого графита влияет на интенсивность эрозии, как показано на графике. фиг. 39, б. Наибольшая интенсивность — 18 г/мин — была получена при 100 а. При этом чистота поверхности составляла 0,1—0,2 мм ($H_{\text{макс}}$), а толщина белого слоя достигала 0,1—0,15 мм.



Фиг. 39. Зависимость интенсивности съема металла от скорости потока рабочей жидкости (а) и содержания графитового порошка (б).

Исследования японской лаборатории электроискровой обработки. Обширные исследования в области механизма электрической эрозии и влияния различных факторов на результаты эрозии были выполнены Kiyoshi Inoue [104].

Исследовались величины токов и напряжений разряда при различных величинах промежутка и других параметрах цепи, длительность импульса, влияние формы и материала электродов на начальное напряжение пробоя, характер и интенсивность эрозионного разрушения и другие явления, сопутствующие разряду. Для выполнения этих исследований был сконструирован осциллограф со ждущей разверткой.

Для изучения зависимостей между величиной промежутка и электрическими характеристиками было сконструировано специальное приспособление, показанное на фиг. 40.

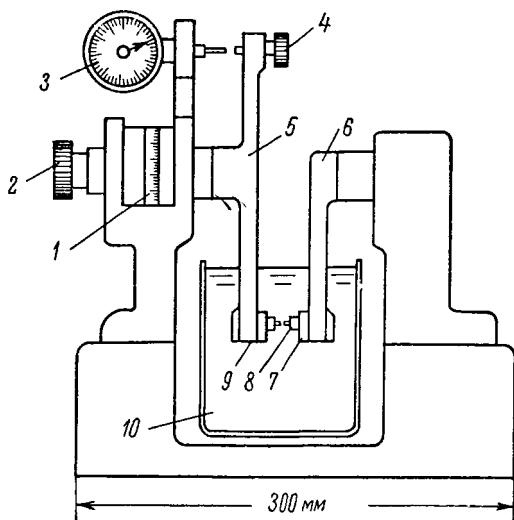
При помощи этого приспособления проводились две серии опытов. В первой серии опытов перемещение электродов при определенном приложенном к ним напряжении, производилось до возникновения разряда, затем по микрометру отсчитывалась величина вазора. Во второй серии к заранее установленному промежутку подводилось повышаемое напряжение и фиксировалась величина напряжения, при котором происходил пробой.

Применялись плоские и игольчатые электроды, очищавшиеся при помощи спирта и четыреххлористого углерода.

Включение осциллографа для записи происходящих процессов показано на фиг. 41. Рабочей жидкостью для большинства опытов служил керосин.

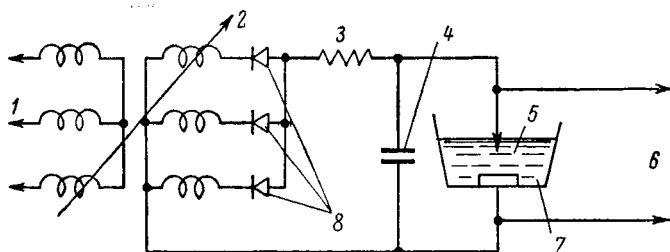
В табл. 17 приведены результаты опытов, проведенных при помощи описанного выше приспособления.

Изучалась зависимость между величиной промежутка и начальным напряжением разряда в условиях, когда величина промежутка сохранялась фиксированной, а напряжение постепенно повыша-



Фиг. 40. Приспособление для измерения зазора при разряде:

1 — микрометр; 2 — подающий винт; 3 — индикатор; 4 — винт установки индикатора; 5 — подвижный держатель электрода; 6 — неподвижный держатель электрода; 7 — изолятор; 8 — игольчатый электрод; 9 — изолятор.



Фиг. 41. Включение осциллографа для опытов:

1 — сеть переменного тока 200 в; 2 — трансформатор; 3 — сопротивление; 4 — конденсатор; 5 — межэлектродный зазор; 6 — подключение осциллографа; 7 — диэлектрическая жидкость; 8 — выпрямители.

лось. Опыты проводились в двух вариантах: когда игольчатый электрод был анодом и когда он являлся катодом.

В табл. 18 приведены результаты опытов, в которых напряжение устанавливалось заранее, а промежуток измерялся до возникновения разряда.

В другой серии опытов при постоянном начальном напряжении на электродах (70 в) измерялась величина подключенной параллельно емкости и определялась величина межэлектродного зазора,

Межэлектродный зазор и начальное напряжение разряда

Среда — керосин; емкость конденсатора 100 мкф;
материал электродов — сталь с 0,3% С, закаленная

Размер промежутка в мк	Напряжение начала разряда в в									
	Игольчатые электроды					Плоские электроды				
0,2	10	10	11	12	13	6	8	10	11	14
0,3	12	13	14	15	17	10	12	13	15	18
0,5	18	19	20	22	25	13	16	18	20	24
1,0	31	32	34	37	41	24	27	30	33	35
1,3	37	39	42	45	48	34	38	40	42	43
1,5	41	45	48	51	52	39	42	44	46	49
2,0	50	52	55	58	60	50	58	61	70	75
2,2	52	54	59	66	67	64	67	69	74	77
2,5	60	63	66	69	74	78	80	84	86	90
3,0	72	75	80	84	88	105	109	113	120	125
3,5	86	93	97	101	107	—	—	—	—	—

Начальный разрядный промежуток и напряжение разряда

Среда — керосин; емкость конденсатора — 100 мкф;
материал электродов — сталь с 0,3% С

Напряжение на электродах в в	Промежуток в мк к началу разряда									
	Игольчатый электрод (+)					Плоский электрод (+)				
20	0,85	0,90	0,90	0,95	1,00	0,40	0,40	0,45	0,50	0,60
30	1,40	1,5	1,55	1,60	1,70	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70
40	2,05	2,10	2,20	2,25	2,30	0,75	0,80	0,85	0,80	0,85
50	2,6	2,60	2,70	2,75	2,80	0,90	1,00	0,95	1,00	1,05
60	2,95	3,00	3,05	3,10	3,20	1,10	1,20	1,20	1,25	1,30
70	3,30	3,35	3,40	3,50	3,60	1,40	1,45	1,50	1,60	1,62
80	—	—	—	—	—	1,80	1,90	1,90	2,00	2,05
90	—	—	—	—	—	2,25	2,40	2,40	2,55	2,65
100	—	—	—	—	—	2,90	3,00	3,00	3,10	3,10
110	—	—	—	—	—	3,50	3,55	3,60	3,60	3,70

при которой возникал разряд. Результаты опытов приведены в табл. 19.

В табл. 20 дана зависимость между остаточным напряжением разряда на электродах при различной величине емкости подключаемых к ним конденсаторов.

Таблица 19

Начальный разрядный промежуток и емкость

Среда — керосин; материал электрода — сталь с 0,3% С;
зарядное напряжение 70 в

Емкость в мкф	Межэлектродный зазор в мм									
	Игольчатый электрод (+)					Плоский электрод (+)				
100	2,20	2,25	2,25	2,25	2,30	2,30	2,35	2,35	2,35	2,40
50	1,70	1,75	1,80	1,80	1,80	1,90	1,95	1,95	2,00	2,00
24	1,50	1,55	1,60	1,55	1,60	1,70	1,70	1,75	1,75	1,80
10	1,40	1,40	1,40	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,70	1,75
4	1,30	1,35	1,40	1,40	1,45	1,55	1,60	1,60	1,65	1,65
2	1,30	1,30	1,30	1,35	1,40	1,50	1,50	1,50	1,55	1,60
1	1,30	1,30	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,50	1,55	1,60

Для измерения сил тока в разрядной цепи Jпоие [104] сконструировал специальный безиндукционный трубчатый шунт, показанный на фиг. 42. Характеристики этого шунта таковы: сопротивление — $6,19 \cdot 10^{-3}$ ом, индуктивность (расчетная) — $4,05 \cdot 10^{-10}$ гн, постоянная времени порядка 0,06 мксек. Схема включения шунта в цепь показана на фиг. 43. Данные схемы приведены в табл. 21. Характер разрядного тока, фиксируемого при помощи описанного выше шунта, представлен схематически на фиг. 44 и в табл. 22 и 23.

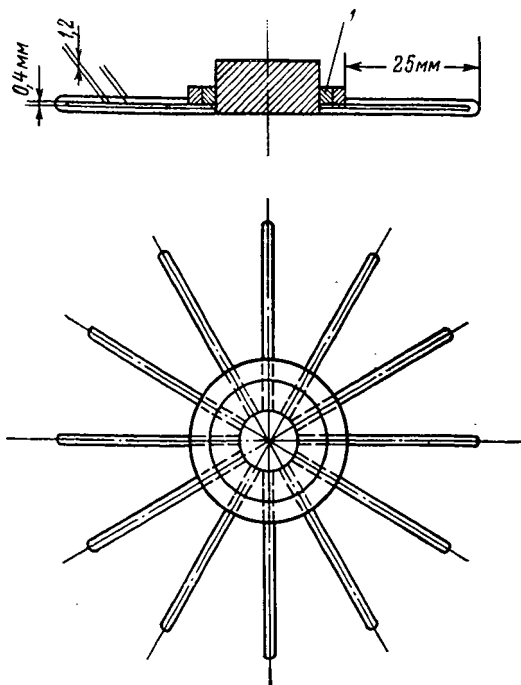
На фиг. 45 изображена схема цепи, при помощи которой производились измерения, результаты которых приведены в табл. 24.

Ток и напряжение разрядки и условное сопротивление при различном напряжении зарядки приведены в табл. 25.

Серия оригинальных исследований, имевших целью непосредственное определение давлений, вызываемых импульсным разрядом, была проведена Kiyoshi Jпоие.

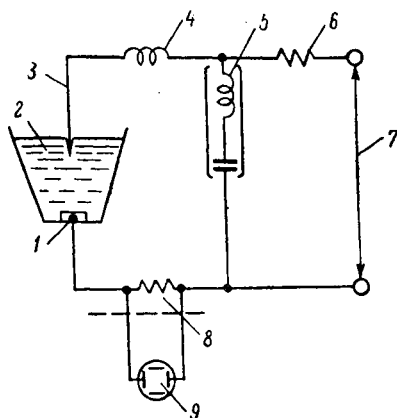
Принципы примененного Jпоие метода состоят в том, что при разряде между двумя электродами один из них делается неподвижным, а второй — подвижным. Начальная скорость подвижного электрода, перемещающегося под давлением разряда, пропорциональна этому давлению, что позволяет определить путем расчета величину возникающего давления.

Принципиальная схема и схематический разрез прибора, сконструированного для этой цели, приведены на фиг. 46. Как видно из фиг. 46, подвижный шарик под действием разряда переме-



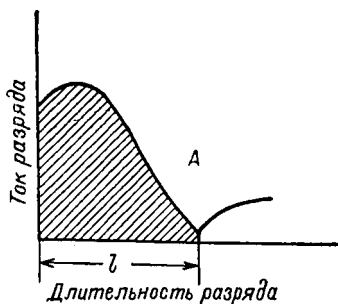
Фиг. 42. Схема устройства шунта:

1 — изолятор.



Фиг. 43. Схема включения шунта в цепь:

1 — плоский электрод; 2 — диэлектрическая жидкость; 3 — игольчатый электрод; 4 — индуктивность; 5 — фильтр; 6 — сопротивление; 7 — источник питания; 8 — шунтирующее сопротивление; 9 — осциллограф.



Фиг. 44. Схематический график разрядного тока.

Таблица 20

Емкость конденсаторов и остаточное напряжение разряда
 Среда — керосин; зарядное напряжение — 100 в; материал
 электродов — сталь 0,3% С

Емкость в мкф	Напряжение разряда в в									
	Игольчатый электрод (+)					Плоский электрод (+)				
100	30	32	34	35	38	23	25	27	29	30
50	22	23	25	27	29	16	17	19	20	22
30	13	14	16	17	19	12	13	15	17	18
24	11	13	14	16	17	11	13	14	16	17
20	10	11	13	14	16	10	11	13	14	16
10	9	11	12	13	15	9	11	12	13	15
8	9	11	12	13	15	9	11	12	13	15
6	10	11	13	14	16	10	11	13	14	16
4	11	13	14	16	17	10	11	13	14	16
2	14	16	17	19	20	12	13	15	17	18
1	20	22	23	25	27	18	19	21	23	24
0,8	22	23	25	27	28	20	22	23	25	27
0,5	26	28	30	32	34	23	24	26	28	30
0,2	36	38	40	42	45	35	36	38	40	41
0,1	43	46	48	50	52	50	52	54	56	60
0,68	60	62	64	66	65	58	60	62	64	66
0,04	70	73	76	78	80	65	68	70	72	75

Таблица 21

Характеристики экспериментальной цепи

Емкость конденсаторов в мкф	Индуктивность конденсаторов в мкГн	Сопротивление соединительных проводников в 10^{-3} ом	Распределенная емкость проводников в пф	Индуктивность проводников в мкГн
200	0,3	4	40	0,5
100	0,2	4	40	0,5
50	0,16	4	40	0,5
24	0,15	4	40	0,5
10	0,14	1,6	3	0,1
4	0,12	1,6	3	0,1
2	0,1	1,6	3	0,1
1	0,1	1,6	3	0,1
0,5	0,1	1,6	3	0,1
0,1	0,1	1,6	3	0,1

Таблица 22

Длительность разряда
в зависимости от емкости
Среда — керосин; зарядное
напряжение — 70 в; Электроды —
сталь (+), латунь (—)

Емкость в мкф	Максималь- ный ток в а	Длительность разряда в мксек
200	450	45
100	322	30
50	300	20
24	270	13
10	170	9
4	180	4
2	170	2
1	160	1,6
0,5	165	1,5
0,1	185	0,8

Таблица 23

Зависимость максимального
разрядного тока от напряжения
зарядки

Среда — масло; емкость — 100 мкф;
электроды — стальные;
игольчатый электрод (+)

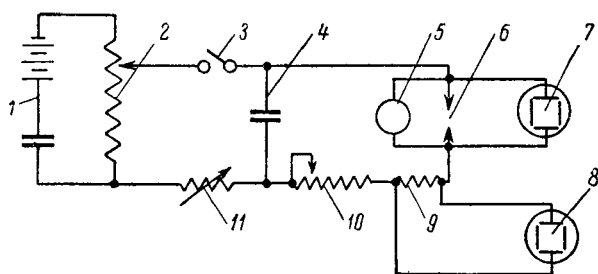
Напряже- ние зарядки в в	Максималь- ный разряд- ный ток в а	Длитель- ность разряда в мксек
30	80	25
50	165	25
75	240	30
100	340	31
120	400	31

Таблица 24

Связь разрядного тока с разрядным напряжением

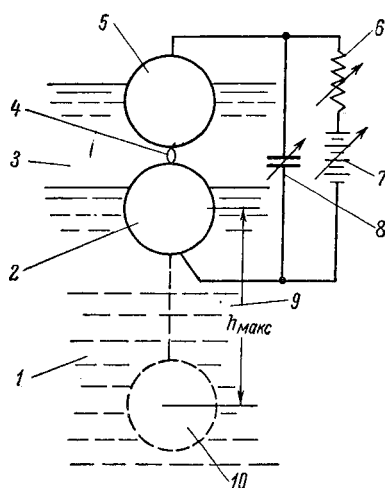
Среда — керосин; зарядное напряжение — 70 в; емкость — 100 мкф.
I — игольчатый электрод (+), плоский электрод (—); II — игольчатый
электрод (—), плоский электрод (+)

Отсчет длительности разряда по осцил- лографу в мм		Разрядный ток в а		Напряжение разрядки в в		Условное сопро- тивление в ом	
I	II	I	II	I	II	I	II
0	0	0	0	70	70	—	—
1	1	262	262	24,5	34,5	0,094	0,130
3	3	305	275	20,5	32,0	0,067	0,120
5	5	316	281	21,0	31,5	0,066	0,112
10	10	322	294	24,5	30	0,077	0,102
20	20	326	310	29,0	27,0	0,089	0,087
30	30	320	300	29,0	24,5	0,091	0,080
40	40	275	262	26,0	21,5	0,095	0,080
50	50	217	205	21,5	18,5	0,099	0,093
60	60	143	142	17,5	15,5	0,121	0,113
70	70	70	80	13,0	13,0	0,187	0,162
75	80	40	32	12,5	11,5	0,308	0,357
79	83,5	17	10	10,0	5,5	0,588	0,570
80	84	10	5	3,1	2,1	0,318	0,421
83	87	33	42	1,2	0,7	0,036	0,017
90	90	50	50	0,8	0	0,016	0
100	—	55	—	0	—	0	—



Фиг. 45. Схема цепи для измерения условного сопротивления разрядного промежутка:

1 — источник тока; 2 — делитель напряжения; 3 — выключатель; 4 — конденсатор; 5 — ламповый вольтметр; 6 — электрод; 7 — осциллограф для измерения напряжения; 8 — осциллограф для измерения тока; 9 — шунт; 10 — безиндукционное сопротивление; 11 — балластное сопротивление.



Фиг. 46. Схема установки для изучения давления в разряде:

1 — проводящая жидкость; 2 — подвижный шарик; 3 — диэлектрическая жидкость; 4 — канал разряда; 5 — неподвижный шарик; 6 — сопротивление; 7 — источник тока; 8 — конденсатор; 9 — высота отброса; 10 — место отброса.

Ток, напряжение разрядки и условное сопротивление

Отсчет по осциллографу в мм	Напряжение зарядки в в														
	30	50	70	100	120	30	50	70	100	120	30	50	70	100	120
	Разрядный ток в а					Разрядное напряжение в в					Условное сопротивление в ом				
0	0	0	0	0	00	30	50	70	100	120	—	—	—	—	—
1,2	50	—	—	—	—	28	—	—	—	—	0,55	—	—	—	—
1,5	—	95	—	—	—	—	13	—	—	—	—	0,14	—	—	—
1,8	—	—	180	—	—	—	—	13	—	—	—	—	0,07	—	—
2	—	—	—	240	275	—	—	—	13	10	—	—	—	0,05	0,04
5	33	72	115	175	222	20	11,5	11,5	11,5	8	0,6	0,16	0,10	0,07	0,04
10	24	50	80	136	175	17	11,0	11	11	7	0,7	0,22	0,14	0,08	0,04
20	14	29	48	76	100	14	10,5	10,5	10,5	6	1,0	0,36	0,22	0,14	0,06
35	7	15	21	35	45	13	10	10	10	5	1,85	0,67	0,48	0,29	0,11
45	4	9	12	21	27	12	10	10	10	5	3,0	1,1	0,83	0,48	0,19
55	3	6	8	14	18	11	10	10	10	5	3,65	1,65	1,25	0,71	0,28
70	2	4	5	8	10	10,5	10	10	10	5	5,25	2,50	2,0	1,25	0,50
90	0	0	0	0	0	12	10	10	10	5	—	—	—	—	—

щается на некоторое расстояние, затем возвращается в исходное положение. Импульс давления K определяется как

$$K = MV_0, \quad (1)$$

где V_0 — начальная скорость;

M — масса подвижного электрода.

Вязкостью проводящей жидкости пренебрегают, и тогда величина максимального перемещения $h_{\text{макс}}$ подвижного электрода определяется уравнением

$$h_{\text{макс}} = \frac{1}{2} \frac{M}{(V\rho - M)g} V_0^2, \quad (2)$$

где V — объем подвижного электрода;

ρ — удельный вес проводящей жидкости;

g — ускорение земного тяготения.

Отсюда

$$K = \sqrt{2gMh_{\text{макс}}(V\rho - M)}. \quad (3)$$

Даже если принять во внимание вязкое сопротивление жидкости, то скорость перемещения электрода получается недостаточной, чтобы удовлетворить закону Ньютона.

Принимая сопротивление трения проводящей жидкости пропорциональным скорости, перемещение подвижного электрода под действием давления разряда определится по закону Стокса, как

$$M \frac{d^2h}{dt^2} = -(V\rho - M)g - R \frac{dh}{dt}, \quad (4)$$

где R — коэффициент вязкого трения проводящей жидкости.

Тогда максимальное расстояние, на которое перемещается подвижный электрод

$$h_{\text{макс}} = \frac{M}{R} \left(V_0 - \frac{V_p - M}{R} g \right) \lg \left(1 + \frac{RV_0}{(V_p - M)g} \right). \quad (5)$$

График фиг. 47 представляет указанную зависимость. Импульс K не должен рассчитываться из предыдущей формулы, даже если $h_{\text{макс}}$ определено экспериментально. Однако если $h_{\text{макс}}$ получено расчетным путем, то импульс K также может быть рассчитан. K рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \int_T \int_S P dt ds, \quad (6)$$

где P — давление разряда ($\text{дн}/\text{см}^2$);

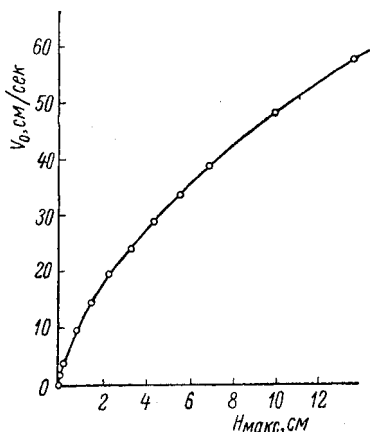
T — длительность разряда;

S — площадь, на которую действует разряд.

Считая, что давление разряда ($\bar{P}$) действует на площадь, поражаемую разрядом равномерно, можно зависимость вектора давления $\bar{P}$ от времени выразить в виде

$$\bar{P} = \frac{K}{TS} = \frac{M}{TS} V_0. \quad (7)$$

Фиг. 47. Связь начальной скорости (V_0) и максимальной высоты перемещения электрода ($h_{\text{макс}}$).



Таким образом, измеряя длительность разряда при помощи осциллографа, а площадь, пораженную разрядом, при помощи микроскопа, можно определить давление разряда P .

На фиг. 48 приведена схема прибора, использованного для выполнения серии опытов по определению давления разряда.

Металлический шарик 2 диаметром 1,5 см (объем — 1,77 см³, масса — 1,75 г) поддерживается при помощи крючков 11 и шариков с кольцом 3 в таком положении, что он большей частью погружен в проводящую жидкость (15-процентный раствор соды, удельный вес 1,15 г/см³; коэффициент сопротивления $3\pi D = 0,42 \text{ г/сек}$; вязкость — 0,03 г/см³ при 15°С). Подвижный шарик подключен в качестве одного из электродов при помощи кольца 3 и проводящей жидкости 1, в которую вводится ток через пластину 12. Расстояние между неподвижным шариком 4, находящимся в керосине 10, и подвижным 2 изменяется при помощи передачи 5. Источник тока 8, сопротивление 6 и конденсатор 7 образуют электрическую цепь схемы. Напряжение с электродов подается на осциллограф 9.

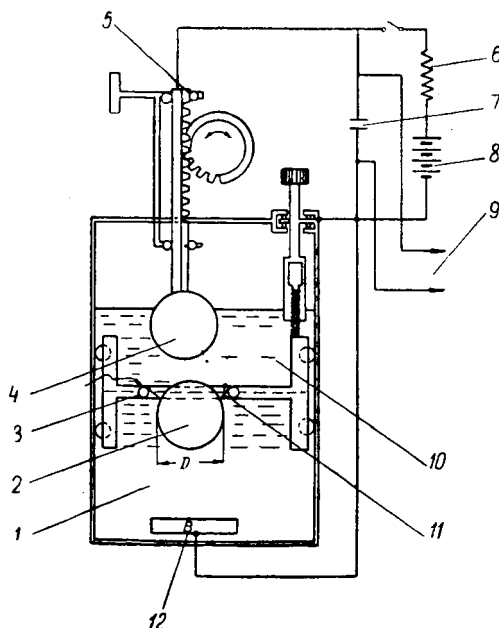
Далее следуют результаты опытов, проведенных по описанной выше методике; измерялось максимальное перемещение подвиж-

ного шарика ($h_{\text{макс}}$), а затем по нему высчитывалась начальная скорость (V_0) подвижного электрода. После этого давление ($\bar{P}$) определялось по приведенной выше формуле (7).

Перед опытом было определено численное выражение формулы (5), устанавливающей зависимость между $h_{\text{макс}}$ и V_0 :

$$h_{\text{макс}} = 4,2 (V_0 - 1,5181g (1 + 0,0015V_0)).$$

Подставляя в эту формулу соответствующие значения, получим связь начальной скорости и максимального отброса шарика (табл. 26).



Фиг. 48. Схема прибора для определения давления разряда.

В табл. 27 приведены результаты серии опытов, при которых напряжение на конденсаторах поддерживалось постоянным (150 в), а величина емкости изменялась от 0,5 до 200 мкф.

Таблица 26

Связь начальной скорости и максимального отброса шарика

см ² /сек	0	2	4	10	15	20	25	30	35	40	50	60
$h_{\text{макс}}$ в см	0	0,12	0,23	0,9	1,5	2,3	3,2	4,3	5,4	6,8	9,7	13,2

Зависимость остаточного напряжения от емкости конденсаторов

Емкость конденсаторов в мкф	Измеренные значения			Средние значения		Остаточное напряжение на конденсаторах в в	Средняя площадь, поражаемая разрядом в мм ²
	$h_{\text{макс}}$ в м	мксек	мм	$h_{\text{макс}}$ в см	мксек		
200	10	52	0,68	8	50	43	0,38
	8,5	50	0,66			46	
	8	50	0,75			42	
	6	50	0,69			40	
	7,5	48	0,72			36	
100	6,5	30	0,48	6	30	43	0,26
	5,5	30	0,54			42	
	6	30	0,55			38	
	5	33	0,61			40	
	7	27	0,71			35	
24	3,5	18	0,42	3,5	20	30	0,07
	4	22	0,32			36	
	3,5	24	0,18			39	
	3	20	0,27			32	
	3,5	16	0,31			34	
10	1,6	10	0,17	1,5	10	40	0,03
	1,8	12	0,21			35	
	1,3	10	0,19			38	
	1,5	8	0,22			33	
	1,2	10	0,21			38	
4	0,8	6	0,15	1,2	8	40	0,007
	1,3	7	0,11			41	
	0,7	8	0,12			42	
	1,4	10	0,04			45	
	1,2	9	0,08			43	
2	1,2	5,5	0,083	1	6	45	0,004
	1	6,5	0,081			40	
	1	5,5	0,082			46	
	1	6	0,089			35	
	0,8	6,5	0,065			50	
1	1,3	4	0,045	0,8	4	55	0,002
	0,6	3	0,052			50	
	0,8	4,5	0,051			52	
	0,7	5	0,048			60	
	1,2	3,5	0,054			48	

Площадь разряда (табл. 27) равна:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{n} \sum_1^n d_i^2,$$

где d_i — диаметр лунки.

На основании данных опыта (табл. 27) были рассчитаны: начальная скорость V_0 , импульс K давления в разряде $\bar{P}$ и энергия разряда A . Результаты расчета приведены в табл. 28.

Энергия разряда (A) в табл. 28 подсчитана из уравнения

$$A = \frac{1}{2} C \left(V^2 - \frac{1}{n} \sum_1^n V_i^2 \right),$$

где V_i — остаточное напряжение (см. табл. 27);

C — емкость конденсаторов (см. табл. 28);

V — напряжение заряда (100 в).

Результаты опытов Jпоие, кратко изложенные выше, указывают на существование больших мгновенных давлений, действующих во время электроискровой обработки на поверхность обрабатываемой детали и электрода. Jпоие [104] указывает, что поверхность меди, обработанная электрическими разрядами, обладает повышенной электропроводностью, и объясняет это действием высоких ударных давлений разряда и высоких температур.

Таблица 28

Зависимость давления разряда от энергии

Емкость конденсаторов в мкф	Энергия разряда вт-сек	см/сек	г см/сек	т/см ²
100	$4,2 \cdot 10^{-1}$	44,2	77,5	0,41
100	$4,2 \cdot 10^{-1}$	36,3	63,5	0,83
24	$1,1 \cdot 10^{-1}$	26	45,5	3,3
10	$4,3 \cdot 10^{-2}$	15	26,3	8,9
4	$1,6 \cdot 10^{-2}$	12,1	21,2	38,6
2	$8,1 \cdot 10^{-3}$	10,6	18,6	79
1	$3,7 \cdot 10^{-3}$	9,8	17,2	220

3. Электродуговая обработка

По сравнению с масштабами электроискровой обработки электродуговая обработка применяется значительно реже. Однако в последнее время наблюдается значительное повышение интереса к этой разновидности обработки.

В табл. 29 приведены данные о результатах обработки некоторых материалов дуговым разрядом [12].

Характеристики обработки дуговым разрядом

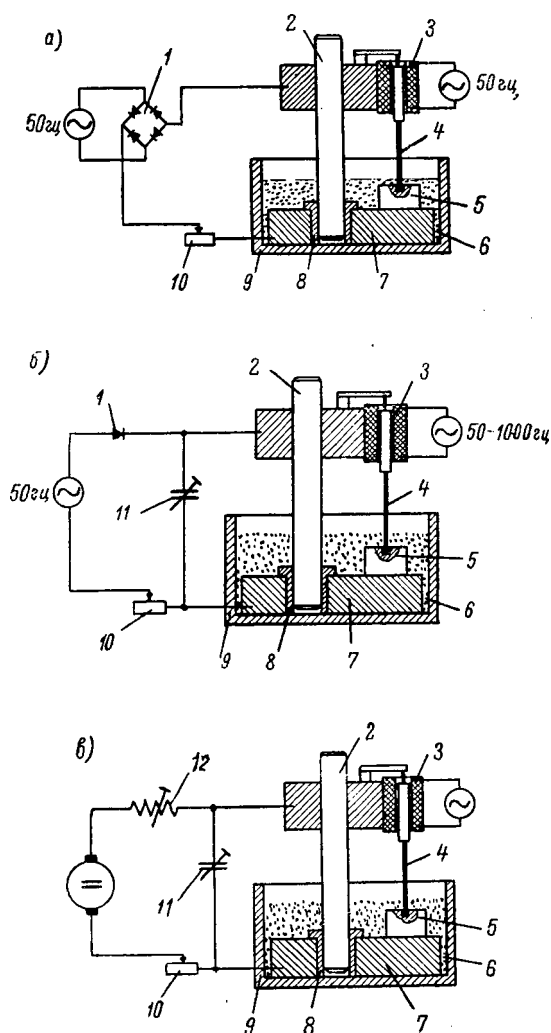
Материал изделия	Материал электрода	Диаметр электрода в мм	Подводимое напряжение в в	Расходуемая мощность в вт	Скорость врезания в мм/мин
Закаленная инструментальная сталь . . .	Латунь	1,0	200	100	1,6
Твердый сплав S4 . .	Медь	1,0	200	100	0,9

На фиг. 49 изображены три основные схемы, применяемые для выполнения электроэрозионной обработки с использованием дугового (фиг. 49, а) и искрового (фиг. 49, б, в) разрядов [10, 12].

Совершенно новый способ обработки металла при помощи электрической дуги описан Heidenreich [15] в статье «Электрическая дуга как средство обработки», в которой рассматривается группа электроэрозионных методов, отличающихся повышенной длительностью импульса. Автор отмечает, что в последние годы все чаще появляются статьи и доклады о новых способах обработки с использованием электрической энергии, в особенности в форме искрового разряда. Такие станки существуют в СССР, Англии и в США. Во всех станках между деталью и инструментом создаются искровые разряды. Автор указывает, что обработкой с помощью электрической дуги также занимались многие исследователи; выяснилось, что дуга менее пригодна для этой цели, чем искровые разряды. Электродуговой способ и его возможности (способ Эберле) следует, однако, рассмотреть подробнее. Еще в 1926 г. и в последующие годы появилось много патентов на электродуговые способы обработки материалов, в том числе и твердых сплавов, тем не менее до сих пор нет станка, работающего по этому принципу, который мог бы удовлетворять современным требованиям обработки. Из патентов следует, что дуга как средство обработки своим действием обязана концентрации энергии и соответственно образованию высокой температуры на небольшой площади и за короткое время. В этом же, однако, кроется и причина неудачи всех этих способов.

Считалось необходимым применять большие токи (до нескольких сот ампер), чтобы получить высокие температуры. Вследствие того, что даже малые дуги в очень короткое время разрушают любой материал, окисляют или плавят его, поверхность получается недопустимо грубой. Так как известно, что дуга тем короче, чем меньше напряжение, были сделаны попытки применять дугу при напряжении 0,5—5 в, но с токами 100—500 а.

При некоторых методах обработки дуга служит только для расплавления поверхностного слоя, после чего размягченный материал удаляется механическим способом. В других случаях расплавленный металл сжигается вдуваемым на место обработки кислородом. Для избежания сильного местного перегрева в некоторых методах предусмотрено охлаждение водяным паром при этом, однако, воз-



Фиг. 49. Принципиальная схема станка:

а) — с использованием дугового метода; б) то же триггерного; в) с колебательным контуром.

1 — выпрямитель; 2 — колонна; 3 — вибратор; 4 — электрод; 5 — изделие;
6 — диэлектрическая жидкость; 7 — основание; 8 — изолятор; 9 — ванна;
10 — сопротивление; 11 — емкость; 12 — индуктивность.

никает опасность образования трещин и внутренних напряжений. Концентрация дуги при помощи магнитного дутья также применяется при разделке и резке, но не для точной обработки.

Полученные сведения были проверены на ряде опытов, которые привели к совершенно новым путям. Если необходимо устранить даже незначительный местный перегрев, то напряжение и ток, необходимые для образования и поддержания дуги, должны быть минимальными. Кроме того, точка обработки должна все время перемещаться по обрабатываемой поверхности, чтобы дуга все время переходила на новые места. В особенности при обработке твердых сплавов или легированных сталей токи должны быть не более 2—10 а. Мощность разряда при этом также мала. Это является недостатком, который должен быть устранен. Данная задача может быть решена следующим образом: место обработки должно непрерывно перемещаться. Частые, быстро друг за другом следующие дуги могут дать такой же результат, как и однократное воздействие медленно перемещающейся дуги большой мощности.

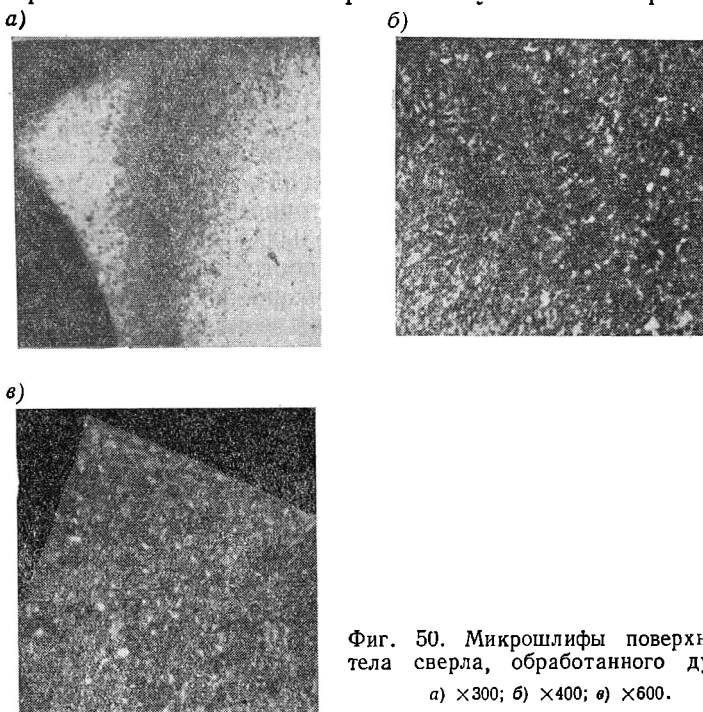
Свойства материалов с точки зрения необходимой длительности дуги весьма разнообразны. Мало чувствительные материалы допускают длительность воздействия дуги в доли секунды, а высокочувствительные, например, твердые сплавы, — 0,001—0,0001 сек. Быстрое возвратно-поступательное движение детали или инструмента должно быть, по возможности, независимым. Так как скорости, достигаемые колеблющимся рабочим диском, недостаточны, то существуют специальные устройства, при помощи которых дуга автоматически с большой скоростью перемещается взад — вперед по обрабатываемой поверхности или только в одну сторону с холостым ходом возврата. Применяемые при этом устройства в виде дисков изготавливаются из литой стали или из чугуна. Прорезанные в теле диска или прикрепленные профилированные венчики могут быть расположены как на торцевой поверхности, так и на ободе. Окружная скорость должна составлять 50 м/сек и больше. На обработанном таким методом твердом сплаве под микроскопом не обнаруживается никаких рисок, чистота поверхности даже лучше, чем у твердого сплава, обработанного алмазом, так как при обработке алмазом грани осколков алмаза царапают материал, что вызывает концентрацию напряжений, которые могут привести к разрушению. Обработка дугой приводит, в первую очередь, к расплавлению и испарению микронеровностей, поэтому поверхность получается гладкая и без рисок.

Чистота поверхности сверла, обработанного электродуговым способом, приведена на микрошлифах (фиг. 50).

Автор [15] говорит, что в настоящее время нет ни одного электрического способа обработки, включая электроискровой, при котором получалась бы такая чистота поверхности, как при электродуговом, обеспечивающем высокую точность обработки и чистоту поверхности с шероховатостью порядка 1 мк.

Качество обработки зависит от напряжения, тока, подачи и глубины резания.

Существенное значение имеет род тока. При постоянном токе результат обработки зависит от полярности. При одной полярности происходит съем материала с детали, а при обратной полярности представляется возможным переносить материал с диска на деталь. Кроме того, диск может иметь венчик, материал которого упрочняет или в каком-либо другом отношении улучшает материал детали. Под действием дуги заряженные частицы из разрядного канала наносятся на поверхность детали и не только упрочняют поверхность, но и выравнивают ее. Таким образом получают поверхности вы-

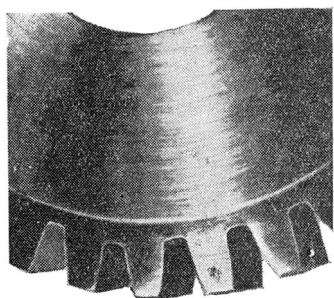


Фиг. 50. Микрошлифы поверхности тела сверла, обработанного дугой.
а) $\times 300$; б) $\times 400$; в) $\times 600$.

сокой прочности с большим сроком службы и хорошей износостойчивостью. Этим способом могут быть нанесены легирующие материалы, цветные металлы и твердые сплавы. Качество поверхности зависит от того, что было использовано в качестве источника — аккумулятор или генератор постоянного тока.

Переменный ток также вполне пригоден, причем в первую очередь для шлифования и полирования. Несмотря на постоянное изменение направления тока, и здесь имеет место эффект переноса металла. Дуга или разрядный канал являются носителями зарядов, вырывающихся из основания дуги. При неподвижных электродах оба участвуют в переносе частиц почти в равной мере. Но так как рабочий диск благодаря большой скорости сильно охлаждается, эмиссия из находящегося на нем основания дуги резко уменьшается. Поэтому при переменном токе гораздо меньше носителей

зарядов переносится с детали на диск, чем в обратном направлении. Это наводит на мысль об эффекте выпрямления. Охлаждение основания дуги на диске может быть таким глубоким, что дуга погаснет прежде чем напряжение на ней снизится до нуля. Было отмечено, что внутри одной полуволны переменного тока происходит 8—10 пробоев. Вследствие малого расстояния между рабочим диском и деталью и наличия в этом воздушном зазоре сохраняющихся заряженных частиц при соответствующем напряжении дуга загорается снова. Таким образом, происходит как бы раздробление переменного тока, причем частота импульсов достигает от 800 до 1000 *гц*. Такие разрывы образуются не только при рабочих дисках с прерывистыми венчиками, но и при венчиках непрерывной конфигурации. Деление венчиков должно находиться в определенном соотношении с частотой переменного тока и с окружной скоростью, чтобы время для повторного зажигания дуги было не менее 0,0001 сек.



Фиг. 51. Шестерня, изготовленная дуговым способом.

При постоянном токе частые пере­рывы возникают также вследствие переохлаждения основания дуги. Получающийся пульсирующий ток подобен току через выпрямитель.

При автоматическом перемещении дуги деталь нагревается чрезвычайно мало. Даже при длительности обработки, равной 1 мин., деталь становится едва теплой.

В то время как при искровой обработке электрод изнашивается в такой же степени, как деталь, рабочий диск при автоматическом перемещении дуги почти не изнашивается. Его срок службы практически не ограничен. Стоимость изготовления диска с венчиком составляет одну десятую стоимости алмазного диска средних размеров.

К основным операциям с применением описанного способа относятся шлифование, заточка, сглаживание и полирование инструмента всех видов. Дуговой способ можно также применять для резки и других видов обработки труднообрабатываемых материалов. Например, в сверле диаметром 4,2 мм канавки выполнены в закаленном состоянии при помощи стального диска. Длительность обработки одной канавки равна 2 сек. Твердость материала до обработки была 63,5 R_C , после обработки электрической дугой повысилась на кромке до 64 R_C , а в середине составила 63 R_C . Испытание на стойкость по сравнению со сверлами, в которых канавки были сделаны до закалки, дало очень хорошие результаты.

Шестерня (фиг. 51) ($z = 36$; $m = 1,5$, ширина зуба 8 мм) изготовлена дуговым способом при помощи нормального стального диска из мягкой стали. Каждая впадина выполнена в цельном материале в течение 1 сек. Поверхность зуба соответствует весьма

чистой обработке. Чтобы устранить шероховатость в месте выхода дуги предусматривается жестяной диск, который принимает на себя оплавление кромки. Электродуговая обработка может быть применена также и для фрезерования разнообразных профилей.

Так как при обдирке применяются токи до 150 а, то для достижения соответствующей подачи при применяемом напряжении 25—40 в необходима большая мощность, вовлекающая в процесс близлежащие части детали. Благодаря выполнению диска зубчатым дуга, основание которой находится на одном зубе, даже при сравнительно большем токе незначительно растягивается и затем разрывается. Поэтому металл, близлежащий к месту обработки, не вовлекается в процесс и не портится.

Закаленный материал обрабатывается лучше, чем незакаленный, так как грат на нем образуется в меньшей степени. Это, кроме всего, имеет то преимущество, что устраняется брак, легко возникающий при закалке после механической обработки.

Перспективной областью применения дугового способа является обработка сварных швов и литья. Чистая поверхность достигается за короткие промежутки времени, так как твердость не играет никакой роли. Кроме того, можно одновременно нанести на сварной шов тонкий слой защитного материала. Например, при обработке диском, содержащим медь, достигается лучшая коррозионность обработанной поверхности, чем при обработке шлифовальным кругом или напильником.

Для этой цели была создана небольшая переносная установка, которая много месяцев с хорошими результатами применялась для очистки литья и сварных швов.

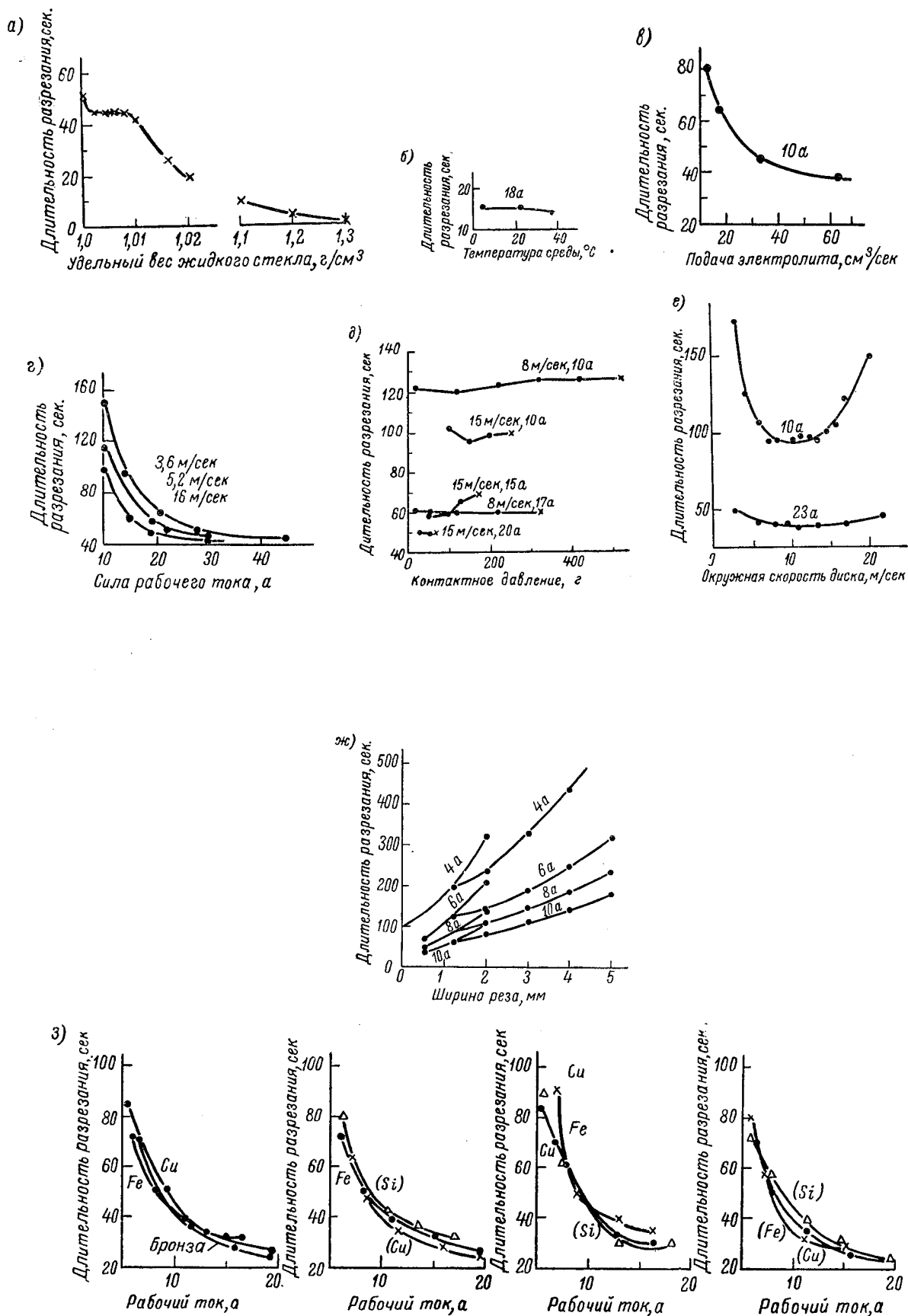
Указывается, что развитие этого способа обработки продолжается, и нет сомнения, что электродуговая обработка металла в недалеком будущем найдет новые области применения.

4. Анодно-механическая обработка

Группа способов обработки, основанных на сочетании электрохимического, механического и электроэрозионного разрушения или (в чистовых разновидностях) только на электрохимическом и механическом воздействиях на обрабатываемый металл, до последнего времени применялась в зарубежной технике весьма ограниченно. В небольшом объеме конструкторские и технологические разработки выполнены в ряде стран (Чехословакия, Польша, Япония и др.), но работ в области изучения механизма процесса и установления основных зависимостей очень мало.

Одним из наиболее полных является исследование, проведенное в лаборатории д-ра Кигабуи [103] для установления зависимостей, имеющих место при анодно-механическом резании дисковым электродом. Результаты этих исследований даны на фиг. 52.

В основном они сводятся к следующему. Чем выше плотность жидкого стекла, тем быстрее протекает процесс резания (фиг. 52, а). Предпочтительно применять жидкое стекло с удельным весом



Фиг. 52. Зависимость длительности разрезания от удельного веса жидкого стекла (а), температуры среды (б), количества подаваемого электролита (в), силы рабочего тока (г), контактного давления (д), окружной скорости диска (е), ширины реза (ж) и материала электрода и поверхностных покрытий (з).

1,3—1,4 г/см³. Изменение температуры жидкого стекла в пределах до 40° не влияет на скорость резания (фиг. 52, б). Количество подаваемого электролита влияет на скорость резания до определенного предела (фиг. 52, в). Длительность резания резко снижается с повышением рабочего тока (фиг. 52, г), но поверхность получается более шероховатой. Изменение давления диска на деталь не оказывает влияния на скорость резания (фиг. 52, д) в определенных пределах. Слишком малое и слишком большое давление нарушают процесс, поэтому давление должно подбираться соразмерно площади реза.

Оптимальная окружная скорость находится в пределах 7—15 м/сек, а при повышенном токе — 5—20 м/сек (фиг. 52, е). Длительность резания прямо пропорциональна площади реза, но при заготовках больших диаметров она удлиняется. Материал заготовки существенно влияет на скорость резания.

С увеличением ширины реза длительность резания повышается (фиг. 52, ж). Зазор несколько увеличивается с повышением толщины диска и почти прямо пропорционален отклонениям. Влияние материала электрода и поверхностных покрытий показано на фиг. 52, з. При повышенном токе лучше применять латунные диски, при меньших токах предпочтительны стальные. Металлопокрытия не дают хороших результатов, а покрытие Si хуже, чем без покрытия.

Влияние состава электролитов на скорость резания приведено в табл. 30. Из всех опробованных электролитов лучшие результаты

Таблица 30

Электролиты для анодно-механической резки

Состав электролита	Условия резания	Длительность в сек.
Жидкое стекло, уд. вес 1,3		95,5
То же + глицерин 1 ⁰ / ₀		96,0
„ + Na ₂ CO ₃ 159 г/л	Электрод — диск из мягкой стали 0,5 мм. Заготовка — мягкая сталь; квадрат 10 мм. Постоянный ток 23 в, 7 а, $v = 14$ м/сек	81,5
„ + глицерин 1 ⁰ / ₀ , Na ₂ CO ₃ 150 г/л		85,0
„ + Na ₂ HPO ₄ 10 г/л		86,5
„ + глицерин 1 ⁰ / ₀ , NaHPO ₄ 10 г/л		90,0
„ + Na ₂ SO ₄ 50 г/л		85,0
„ + глицерин 1 ⁰ / ₀ , Na ₂ SO ₄ 50 г/л		85,5
„ + NaNO ₃ 50 г/л		84,5
Жидкое стекло, уд. вес 1,35		
То же + Na ₂ CO ₃ 60 г/л + NaNO ₃ 30 г/л	То же, $v = 8,4$ м/сек постоянный ток 25 в, 20 а	61,0
„ + Na ₂ CO ₃ 60 г/л + NaNO ₃ 30 г/л +		53,0
+ желатин 10 г/л		41,0
Жидкое стекло, уд. вес 1,3		
То же + NaCl 1 ⁰ / ₀	То же постоянный ток 15 в, 23 а	42,0 30,0

показало жидкое стекло. Недостатками его являются повышенная клейкость и загрязнение поверхностей. Добавки масла и глицерина снижают прочность прилипания стекла, почти не уменьшая скорости резания (табл. 31).

Суспензии каолина (табл. 32) вовсе не прилипают и дают почти те же скорости резания, но быстро оседают и пригодны лишь при

Таблица 31

Добавка масла в электролит

Состав электролита	Условия резания	Длительность в сек.
Жидкое стекло, уд. вес 1,3	Диск и заготовка — мягкая сталь, заготовка — квадрат 10 мм, толщина диска 0,6 мм, постоянный ток — 42 в, 15 а	80,0
То же + машинное масло 50 см ³ /л		79,0
„ + эмульсионное масло 50 см ³ /л		77,0

Таблица 32

Электролиты на основе каолина

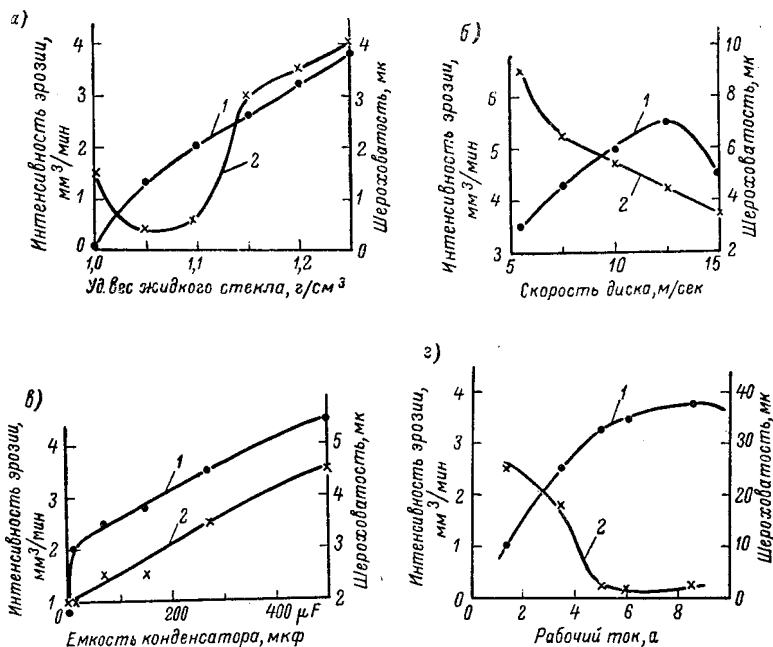
Состав электролита	Условия резания	Длительность в сек.
Каолин 400 г/л + Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O 5 г/л		210
То же + H ₃ BO ₃ 6 г/л	Диск и заготовка — мягкая сталь, заготовка — квадрат 10 мм, толщина диска 0,5 мм, постоянный ток 15 в, 23 а; v = 8,3 м/сек	54
„ + жидкое стекло (1,3) 250 см ³ /л		42
„ + жидкое стекло 50 см ³ /л		60
„ + жидкое стекло 50 см ³ /л + желатин 2,5 г/л		48

непрерывном процессе. Добавки жидкого стекла и желатина образуют хорошие, неприлипающие электролиты, но через некоторое время происходит осаждение. В процессе анодно-механического резания на поверхности реза образуется прочная пленка высокого омического сопротивления. Удаление пленки резко снижает сопротивление. Поверхностное сопротивление при анодно-механическом резании при различных условиях снятия пленки приведено в табл. 33. Исследователями было также опробовано анодно-механическое резание при помощи бесконечной ленты, причем установлено, что скорость резания дошла максимально до 20 г/мин или 50 см²/мин.

Начиная с 1952 г. в лаборатории Kigafuyu [103] проводились исследования в области анодно-механического и электроискрового шлифования. Результаты этих исследований показаны на фиг. 53. В основном они сводятся к следующему. Скорость съема при

анодно-механическом шлифовании вольфрамо-карбидного твердого сплава повышается с повышением плотности жидкого стекла (фиг. 53, а), но наиболее чистая поверхность получается при электролите с удельным весом $1,05 \text{ г/см}^3$. Скорость шлифования максимальна при скорости диска 13 м/сек , но шероховатость снижается при повышении скорости диска (фиг. 53, б).

При наличии в цепи конденсатора шероховатость возрастает с увеличением емкости (фиг. 53, в). Скорость шлифования возра-



Фиг. 53. Зависимость интенсивности эрозии и шероховатости поверхности от плотности жидкого стекла (а), скорости диска (б), емкости конденсаторов (в), рабочего тока (г):

1 — интенсивность эрозии при разной скорости диска; 2 — шероховатость.

стает с увеличением рабочего тока до 75—80% от силы тока короткого замыкания (фиг. 53, г), а шероховатость поверхности уменьшается.

Скорость шлифования сплавов с различным содержанием кобальтовой связки различна.

Последующие работы, проводившиеся в 1956 г. в этой же лаборатории с использованием специальных электродов и электролита, привели к получению поверхности чистотой $H_{\text{макс}} = 0,1—0,2 \text{ мк}$ (зеркальная отделка) при съеме твердого сплава $0,1—0,2 \text{ г/мин}$, без образования волосных трещин.

Изучение условий появления сетки трещин на поверхности твердого сплава при анодно-механическом шлифовании, проведенное

Поверхностное сопротивление при анодно-механическом резании

Условия	Водный раствор жидкого стекла, удельный вес 1,3			Водный раствор жидкого стекла с содержанием 150 г/л		
	Мягкая сталь	Нержавеющая сталь	Алюминий	Мягкая сталь	Нержавеющая сталь	Алюминий
	Сопротивление в ом					
Обработка шлифовальной бумагой	5	5	5	5	5	5
Электролиз при 30 в	∞	∞	100—200	∞	1000	30—40
Промывка водой и протирка тканью	∞	1000	100—200	∞	1000	15—20
После трения стальным предметом	20—30	20—30	10—15	20—30	15—20	30—40

в лаборатории Кугафуи [103], показало, что при малых напряжениях и токах глубина трещин незначительна, а при напряжении ниже 10 в трещины исчезают. Это связано с прекращением дуговых разрядов и съемом металла только за счет электролитического растворения. Закругление кромок при анодно-механическом шлифовании несколько больше, чем при шлифовании зеленым карбидом кремния, но на работоспособности инструмента это не сказывается.

В 1954 г. в лаборатории Кугафуи [103] проводились исследования электролитического шлифования твердого сплава при помощи алмазно-металлического диска (подобного описанному на стр. 103). Результаты этих исследований таковы:

а) количество снятого сплава прямо пропорционально длительности шлифования, но чистота поверхности практически не изменяется;

б) скорость диска (2,5—10 м/сек) не влияет на интенсивность съема, но с его увеличением шероховатость поверхности повышается; скорость 4 м/сек и ниже дает лучшие результаты;

в) повышение плотности тока вызывает прямо пропорциональное увеличение интенсивности съема, без заметного влияния на шероховатость;

г) концентрация электролита (NaNO_3) не оказывает влияния ни на чистоту поверхности, ни на интенсивность съема;

д) увеличение давления диска на изделие сопровождается увеличением съема, но при определенных давлениях наблюдается появление разрядов вследствие контакта между электродами.

Наибольшая интенсивность съема, достигнутая в этих опытах, составила 0,155 г/мин при 5 а и чистоте 1,6 мк на сплаве S1 и 0,13 г/мин при 11 а и чистоте 2 мк на сплаве G2.

Опыты электроискрового шлифования с применением конденсаторной схемы RC привели к получению чистоты ниже 1 мк, но скорость шлифования была невысока. При переходе к схеме RLC достигнута чистота 0,5 мк при съеме 20 мг/мин.

5. Прочие методы электрической обработки

Применение электрической энергии для обработки материалов с использованием иных способов (например, электрогидравлический эффект [105], электроконтактные процессы при большом давлении электродов [106] и др.) в зарубежной технике освещено недостаточно, хотя имеются единичные указания на известность этих способов [107].

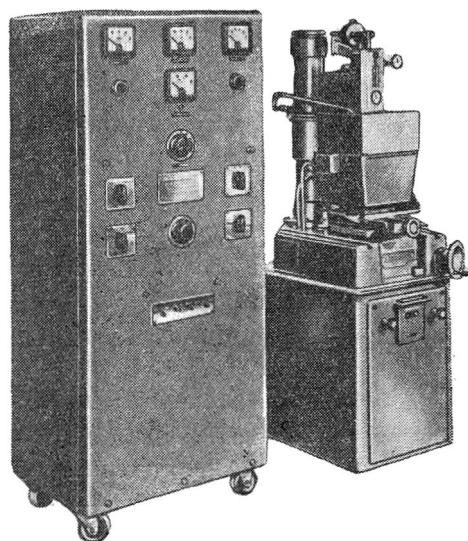
Также весьма ограничены, но представляют значительный интерес встречающиеся в литературе [23, 80, 81] сведения о возможности выполнения обработки путем концентрации на обрабатываемой поверхности узких пучков частиц большой энергии (ионных и электронных лучей). Например, этим способом оказалось возможным получить тончайшие отверстия при изготовлении деталей для текстильного производства из танталовой жести [23]. С помощью современной электронной и ионной оптики корпускулярные лучи могут быть сфокусированы на ничтожно малой площади и могут вызвать интенсивное строго ограниченное в пространстве нагревание материала. Используя длиннофокусные катоды. Штейгервальд [81] достиг высокой концентрации энергии на поверхности материала. Напряжение, применяемое в установках, доходит до 100 кв. Материал под воздействием электронного луча испаряется и конденсируется на холодных стенках обрабатываемого отверстия. Этот метод практически может быть использован в часовой промышленности для сверления отверстий в синтетическом рубине. Продолжительность обработки исключительно кратковременна; так, за 10—20 сек. можно просверлить отверстие диаметром 5—10 мк на глубину 7 мм в синтетическом корунде, рубине, стекле и т. д. Необходимость проведения процесса обработки в вакууме при современном уровне развития вакуумной техники не вызывает особых затруднений. Отмечается [23], что этот метод весьма совершенен при обработке тончайших круглых отверстий, но перспективы возможности обработки профильных отверстий еще не ясны.

ГЛАВА II

ОБОРУДОВАНИЕ

1. Станки и приспособления для получения полостей и отверстий

Станки фирмы Sparcatron. [18, 19]. Английская фирма Sparcatron выпускает электроискровые станки для обработки всевозможных отверстий сложной конфигурации в изделиях из закаленной стали и твердых сплавов. Конструктивное оформление этих станков аналогично сверлильным станкам.



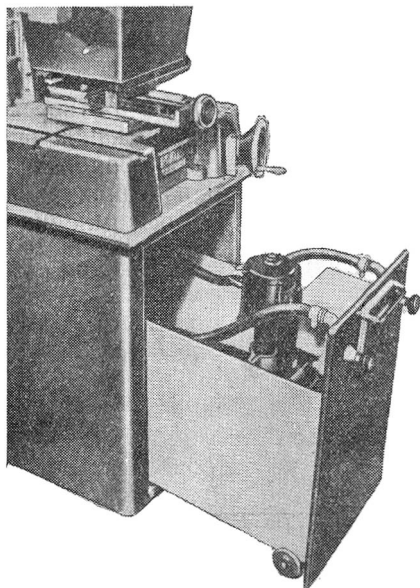
Фиг. 54. Электроискровой станок фирмы Sparcatron.

Одна из моделей станка Sparcatron — Mark III приведена на фиг. 54.

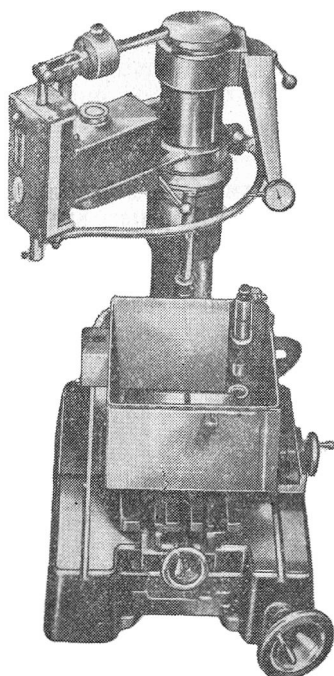
Рабочая головка станка укреплена на массивной колонне, установленной на основании, на котором расположен стол с двумя взаимноперпендикулярными ходами. На столе находится ванна, на дне которой закрепляется обрабатываемая деталь. Для предохранения от брызг рабочей жидкости на ванне крепится съемный ко-

зырек. Внутри подставки (вспомогательного шкафа) станка находится насос, создающий циркуляцию рабочей жидкости в ванне. Насос вместе с резервуаром для жидкости выдвигается из подставки в случае необходимости (фиг. 55).

Для удобства закрепления обрабатываемой детали рабочая головка станка может быть повернута, как это показано на фиг. 56.



Фиг. 55. Насос и резервуар с жидкостью, выдвинутые из основания станка.



Фиг. 56. Рабочая головка станка, повернутая вбок для установки обрабатываемой детали на стол станка.

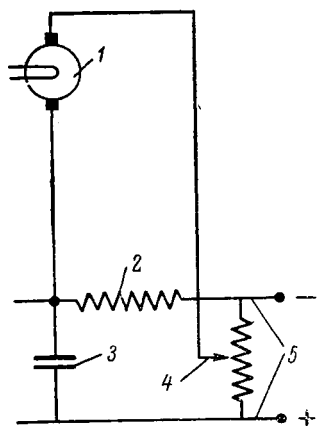
Питание производится от отдельного пульта управления. Основными элементами электрооборудования являются трехфазный трансформатор, селеновый мостовой выпрямитель фирмы Вестингауз, контакторы, выключатели, конденсаторы, сопротивления и т. д.

Охлаждение пульта питания и вспомогательного шкафа принудительное, при помощи встроенных в них вентиляторов. На пульте питания имеются два выключателя: ручной и автоматический. Выключатель отключает станок в конце рабочего хода. Режимы обработки регулируются при помощи четырех переключателей.

Генератор импульсов станка Sparcatron Mark III выполнен по схеме RC (фиг. 57). Автоматическая подача осуществляется мостовым регулятором, электродвигатель которого перемещает шпиндель

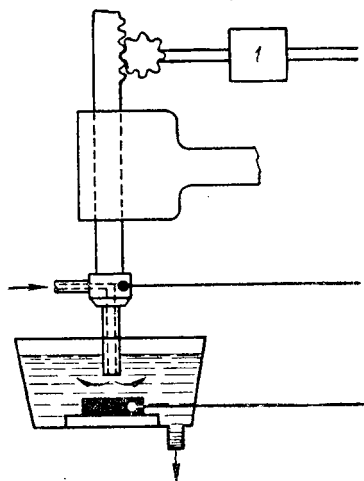
с электродом-инструментом посредством зубчатого колеса и рейки (фиг. 58). Такая система подачи чувствительна к изменению веса электрода-инструмента и к давлению жидкости, нагнетаемой сквозь электрод-инструмент. Вследствие этого для обеспечения устойчивой подачи, которая происходит за счет избыточного веса подвижной системы, предусмотрен противовес, настраиваемый по мере надобности. Мощность станка — 6,5 квт.

От одного главного шкафа управления можно питать несколько станков, снабжая их вспомогательными индивидуальными пуль-



Фиг. 57. Принципиальная схема генератора импульсов станка Sparcatron Mark III:

1 — серводвигатель с постоянным магнитом; 2 — напряжение сигнала; 3 — конденсатор; 4 — регулирование; 5 — питание постоянным током.



Фиг. 58. Схема устройства для перемещения шпинделя с электродом-инструментом:

1 — редуктор.

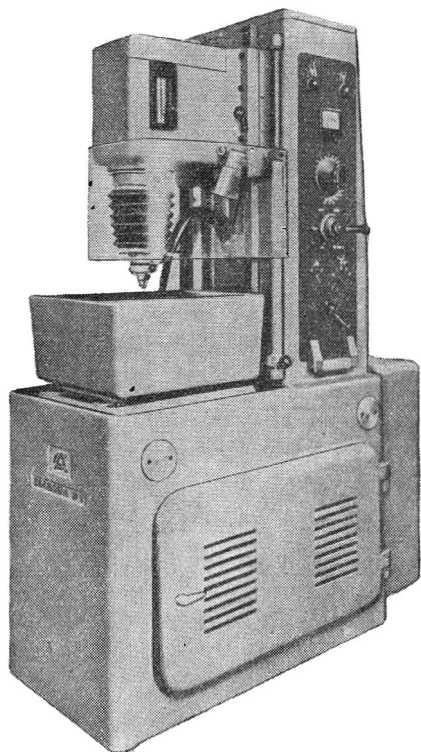
тами управления более простой конструкции, что удешевляет оборудование участка и облегчает многостаночное обслуживание.

Станки типа Eleroda [26] (фиг. 59). Станки Eleroda, выпускаемые фирмой Charmilles (Швейцария), относятся к категории станков со встроенным генератором импульсов. Электрооборудование расположено в нижней части корпуса станка и частично в вертикальной колонне, на боковой стенке которой находится панель управления. По направляющим вертикальной колонны перемещается рабочая головка станка с автоматическим регулятором подачи электрода-инструмента. Под регулятором расположена небольшая ванна, внутри которой закрепляется обрабатываемая деталь. Сбоку около станка устанавливается отдельный резервуар с рабочей жидкостью и насосом.

Внутри ванны находится стол размером 200×300 мм для укрепления обрабатываемых деталей. Стол может поворачиваться и перемещаться с точностью до 0,025 мм.

Автоматический регулятор подачи запатентован. Подача осуществляется при помощи гидропривода, золотниковый клапан которого управляется электромагнитным устройством.

Для предохранения направляющих подачи от загрязнения они защищены эластичным гофрированным кожухом. Рабочая головка станка снизу защищена от прикосновения к электроду-инструменту козырьком из органического стекла.



Фиг. 59. Электроискровой станок Eleroda D-1.

Мощность станка — 3,5 квт. В станке использован конденсаторный генератор импульсов. Принципиальная схема станка приведена на фиг. 60.

По данным каталога фирмы Charmilles, генератор импульсов станка Eleroda D-1 может давать от 1000 до 1 000 000 разрядов в секунду. Вследствие этого станок обладает высокой производительностью обработки и обеспечивает весьма высокую чистоту обработанной поверхности.

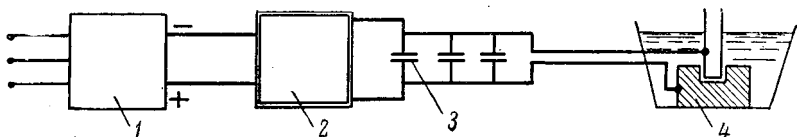
Станок Eleroda D-1 может быть использован для выполнения разнообразных работ по стали и твердым сплавам без нарушения качества поверхностного слоя. Наиболее целесообразное использование станка — электроискровая обработка сложного профилированных отверстий и полостей.

На станке могут обрабатываться отверстия и углубления с поверхностью от десятых долей до 400 мм².

Точность обработки достигает 0,01 мм. Наивысшая чистота поверхности при обработке на станке Eleroda D-1 составляет $H_{ск} = 0,35 \text{ мк}$.

Требуемая чистота поверхности, точность и производительность обработки достигаются путем регулирования электрического режима работы генератора импульсов.

Станки фирмы Wickman [20]. Другой разновидностью (с точки зрения конструктивного оформления) выпускаемых в Англии элек-



Фиг. 60. Принципиальная схема станка Eleroda D-1:

1 — трансформатор (и выпрямитель); 2 — фильтр; 3 — конденсаторы;
4 — ванна с электродами.

тронских прошивочных станков являются станки Erodomatic известной станкостроительной фирмы Wickman LTD.

На фиг. 61 показан общий вид одной из установок, состоящей из собственно станка модели M/UV мощностью 6,6 ква и пульта управления к нему. Рабочая головка станка перемещается по двум вертикальным трубчатым направляющим на нескольких роликовых подшипниках, снижающих до минимума трение в системе.

При помощи механизма автоматической подачи, управляемого рукояткой, расположенной на передней панели станка (см. фиг. 61), осуществляются два вида перемещения головки:

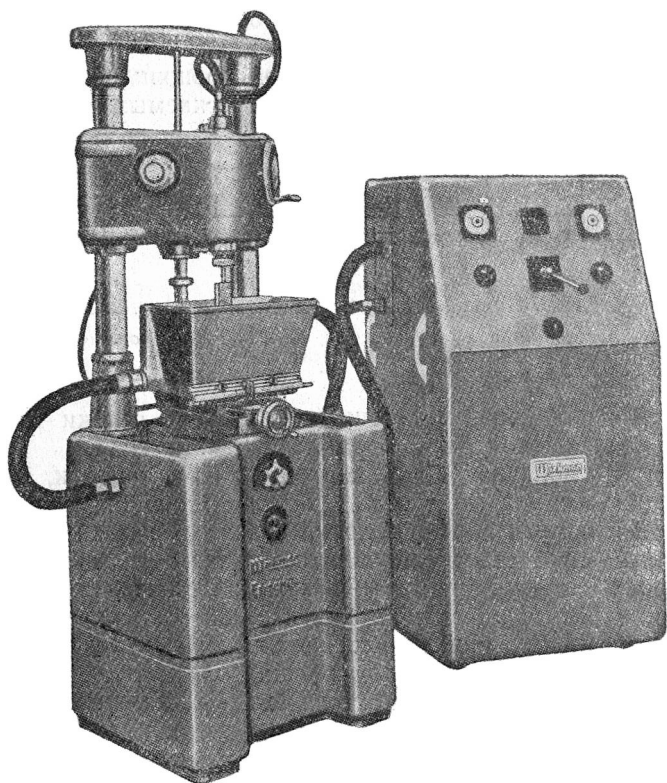
а) ручная подача при помощи маховичка, расположенного справа у головки;

б) автоматическая подача от двигателя, находящегося в основании станка. Дополнительными перемещениями могут быть вращение или возвратно-поступательное движение электрода.

Ручная подача обычно применяется при установке электрода на обрабатываемый участок и при извлечении электрода-инструмента из детали. Система передачи выполнена самотормозящейся, что предохраняет от нежелательных смещений. При автоматической подаче вращение вала двигателя передается вертикальному ходовому винту, находящемуся между направляющими. Скорость вращения устанавливается оптимальной для каждого случая при помощи электронной системы, расположенной в пульте управления.

При прошивке отверстий несимметричной формы, разрезке и других операциях, не допускающих поворота электрода вокруг оси, он, соответственно, стопорится, сохраняя лишь возможность перемещаться в вертикальной или горизонтальной плоскости при помощи установочного приспособления с микрометрическим винтом.

Вращение электрода, осуществляемое при помощи небольшого электродвигателя, помещенного в корпусе головки, регулируется выключателем на передней панели основания станка. Вращение электрода особенно целесообразно при прошивании отверстий малого диаметра или при работе трубчатым тонкостенным электро-



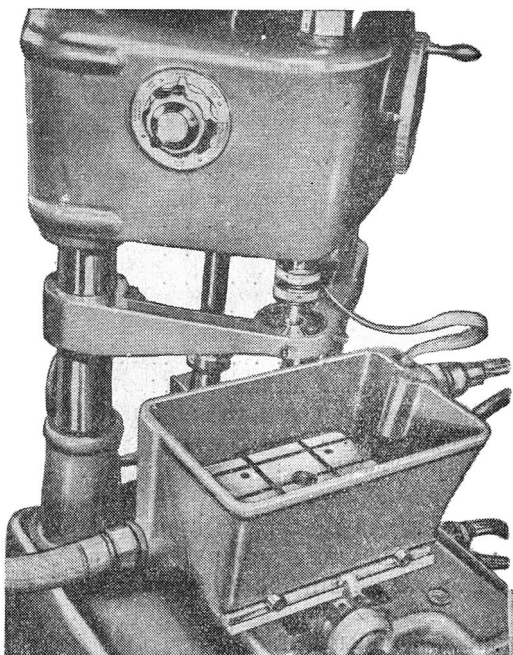
Фиг. 61. Электроискровой станок Wickman Erodomatic с пультом управления.

дом, т. к. вращение способствует выравниванию эксцентрисности и других отклонений, связанных с неравномерной эрозией конца электрода.

Возвратно-поступательное движение электрода (вибрация) с частотой 500 ходов в минуту может осуществляться независимо от других перемещений и совмещаться с вращением или вертикальным движением.

Вибрация используется преимущественно при обработке больших площадей штампов, когда возникают мостики из слипающихся частиц отходов, вызывающие короткие замыкания между электродами. Вибрация способствует поступлению чистой рабочей жидкости в зону обработки.

Кроме перечисленных видов перемещения, может быть осуществлено автоматическое вращение электрода, совмещенное со свободным вертикальным перемещением головки в пределах 89 мм. Подобное комплексное движение осуществляется от основного приводного двигателя, используется, например, при нарезании резьб, изготовлении геликоидальных отверстий и тому подобных работах.



Фиг. 62. Конструкция стола и ванны станка Wickman Erodomatic.

Смазка узлов станка принудительная и производится автоматически.

Рабочий стол станка (фиг. 62) укреплен внутри рабочей ванны. Ванна и рабочий стол, как самостоятельный узел, смонтированы на направляющих, позволяющих производить смещение в двух направлениях на 177×127 мм. Отсчет смещения производится по барабанной шкале маховичка, имеющей цену деления 0,025 мм.

Предусмотрена возможность использования мерительных плиток и циферблатных индикаторов.

Специальный поплавковый выключатель обеспечивает выключение напряжения на электродах, если уровень рабочей жидкости ниже нормального.

В литой чугунной станине станка размещены приводной двигатель, центробежный насос, фильтр и отстойник.

Фильтр состоит из шести сменных элементов, заменяющихся по мере загрязнения. Подача жидкости регулируется с пульта управления, который смонтирован в отдельном корпусе и соединен со станком двумя гибкими бронированными кабелями с маслостойкой пластмассовой изоляцией.

Основные технические характеристики станка следующие:

Вертикальное перемещение рабочей головки с установленной ванной	254 мм
без ванны	381 мм
Наибольшее расстояние от шпинделя до стола	304 мм
Максимальная толщина обрабатываемой детали	89 мм
Размеры рабочего стола	254×178 мм
Максимальная площадь обрабатываемой детали	330×216 мм
Площадь станка	660×711 мм
Площадь пульта	762×737 мм
Питание от трехфазной сети	380/440 в, 40—60 гц
Мощность:	
при работе	6,6 ква
при холостом ходе	0,1 ква
Коэффициент мощности $\cos \varphi$ (в зависимости от нагрузки)	0,65—0,75
Вес нетто станка с пультом	1524 кг

Станки фирмы Languerin [27]. Образец продукции известной в области электросварочного оборудования фирмы Languerin (La Soudure Electric Languerin, Франция) представлен на фиг. 63.

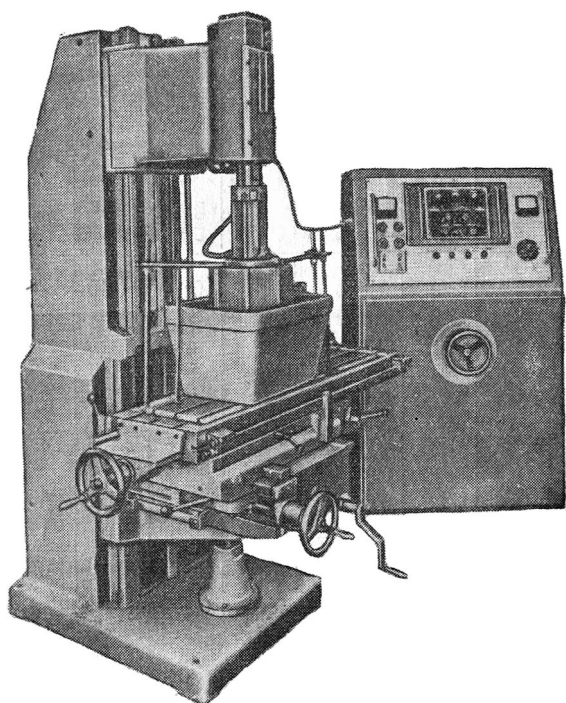
Конструктивное оформление электроискрового прошивочного станка Languerin базируется на вертикально-фрезерном станке. Шпиндельная головка фрезерного станка заменена механизмом подачи электрода-инструмента, который огражден восьмигранным защитным кожухом из изоляционного материала.

Ванна с рабочей жидкостью укреплена на столе станка. Обрабатываемая деталь закрепляется на дне ванны. Электрооборудование станка находится в отдельном пульте управления.

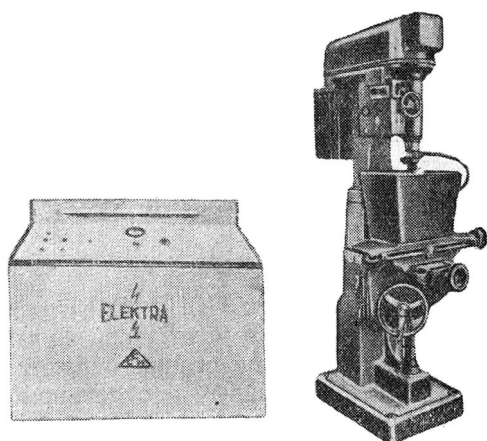
Краткие технические характеристики станка приведены в табл. 34.

Станок предназначен для электроискровой обработки штампов, прессформ и всевозможных деталей из стали и твердых сплавов.

Станки фирмы Elektra. На фиг. 64 представлен электроискровой прошивочный станок с пультом модели Elektra-CCN, выпущенный Бельгийской фирмой Compagnie des Compteurs et Manometre, Лютих — Бельгия) по разработке Французского Национального центра научных исследований (Centre National de la Recherche Scientifique de Paris).



Фиг. 63. Электроискровой станок Languerin.



Фиг. 64. Электроискровой станок фирмы Elektra с отдельным пультом управления.

**Технические характеристики электроискровых прошивочных станков
фирмы Languerin**

Тип станка	Тип пульта управления (генератора импульсов)	Размер стола в мм	Число режимов	Характеристика основных групп режимов			Площадь электрода в мм ²	
				съем металла в мм ³ /мин	точность в ± мм	чистота в мк	мин.	макс.
Seleromat J-1	2500	500×500	4	500	0,10	—	0,04	20 000
				75	0,05	—		
				7,5	0,02	—		
				0,5	0,01	—		
Seleromat J-5	2500	1100×300	4	500	0,10	—	0,04	20 000
				75	0,05	5		
				7,5	0,02	1,5		
				0,5	0,01	0,8		

Станок предназначен для обработки деталей из твердых сплавов и закаленной стали, обладает производительностью до 500 мм³/мин при наибольшей площади электрода 2 дм².

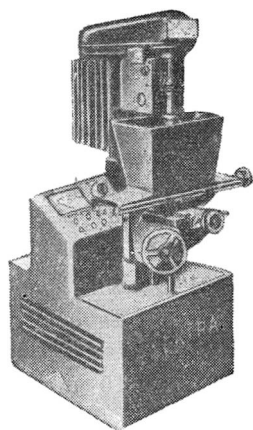
Частота разрядов по данным описания находится в пределах от 2500 гц до нескольких десятков тысяч. Повышение частоты лимитируется явлением поверхностного эффекта.

На фиг. 65 изображена более поздняя модель станка Elektra, в которой пульт и станок объединены. В станке использована разобщенная схема (фиг. 66) с отключением зарядного тока в момент разрядки.

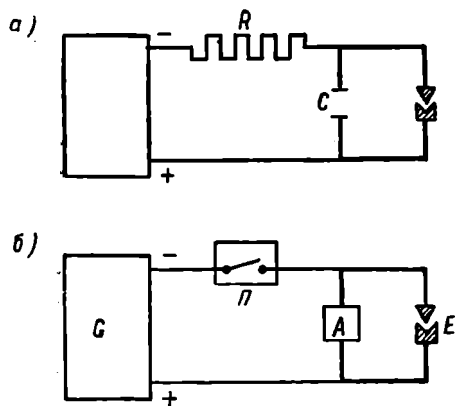
Генератор питает накопитель А, состоящий из катушек (или конденсаторов). В момент разрядки генератор отключается от электродов при помощи прерывателя П. Накопитель и искровой промежуток являются контуром, генерирующим аperiодические разряды.

Станки фирмы Technoimrex [71]. Электроискровой станок Spinthor 2 (фиг. 67) выпускается венгерской фирмой Technoimrex в Будапеште. Основными частями станка являются универсальный питающий генератор, расположенный в отдельном шкафу, рабочая головка на колонке, стол для закрепления обрабатываемых деталей и подъемная ванна для погружения электродов в диэлектрическую жидкость. Кроме того, в комплект станка входят приспособления для электроискровой обработки малых отверстий и инструмент для упрочнения поверхности.

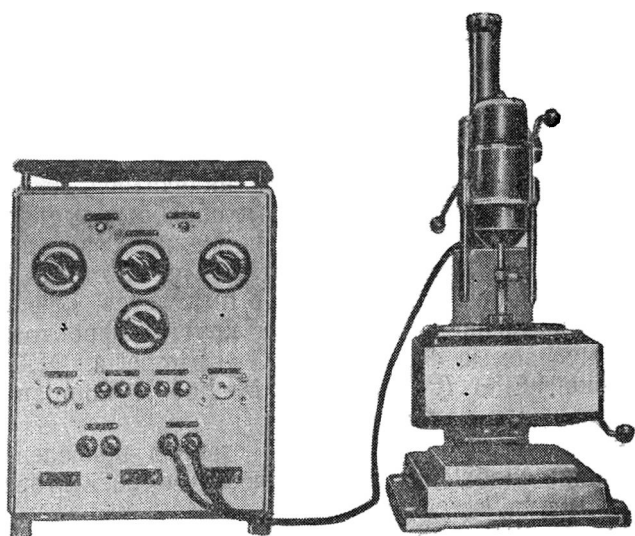
Станок Spinthor 2 предназначается для электроискровой обработки режущего инструмента, штампов, фильер и других деталей,



Фиг. 65. Электроискровой станок фирмы Elektra со встроенным пультом управления.



Фиг. 66. Схема станка Elektra.



Фиг. 67. Электроискровой станок Spinthor фирмы Technoimportex.

изготовленных из закаленной стали и твердых сплавов, а также для извлечения обломков инструмента, сверл, метчиков и т. д.

Станок может быть использован для электронской обработки отверстий диаметром от 0,1 до 0,5 мм.

Техническая характеристика станка:

Генератор	
Габаритные размеры	410×410×570 мм
Вес	58 кг
Напряжение питания	3×380 в, 50 гц
Мощность	0,24 квт
Рабочая головка с автоматической подачей	
Габаритные размеры	94×320 мм
Вес	3,6 кг
Приспособление для обработки малых отверстий	
Габаритные размеры	160×220×150 мм
Вес	4,2 кг
Стойка	
Габаритные размеры	370×440×860 мм
Вес	88 кг
Поверхность стола	200×245 мм
Наибольшие размеры обрабатываемых деталей	200×245×65 мм

Установка и закрепление на столе обрабатываемых деталей производится посредством синусной линейки, измерительных плиток и индикатора.

К станку прикладывается комплект принадлежностей, состоящий из гидропластического патрона, патрона для электродов малого диаметра, призматического зажима, индикатора со стойкой, приспособлений для крепления деталей и обработки малых отверстий.

Станки Elbo [24]. Реализацией принципов, заложенных в схемах и конструкциях, которые работают по «Методу X», т. е. использующих разобщенный генератор импульсов, дающий мощные импульсы повышенной частоты с крутым фронтом, являются станки, выпускаемые фирмами AEG — Elotharm, DEW и др. под общей маркой Elbo (по лицензии Method X Company и в виде самостоятельных разработок).

Внешний вид одной из моделей станков приведен на фиг. 68.

Все станки снабжены автоматическими регуляторами подачи с электронным управлением.

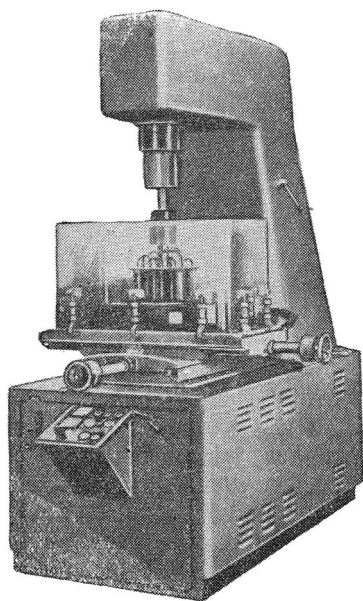
Отмечается [24], что благодаря внесенным в электрическую схему станка усовершенствованиям износ электрода-инструмента значительно снижен по сравнению со станками, работающими с обычными генераторами импульсов неразобщенного типа, и достигает, например, при обработке закаленной стали 15%.

Конструктивное оформление станков предусматривает объединение станочной части и электрооборудования. Обрабатываемая де-

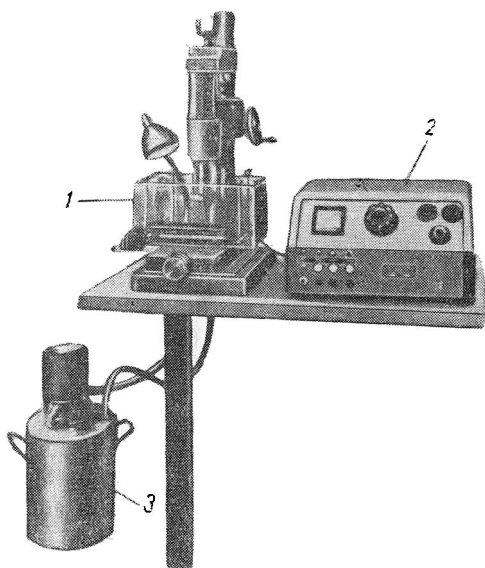
таль крепится на дне ванны с рабочей жидкостью. Перемещение обрабатываемой детали (вместе с ванной) производится при помощи стола, имеющего взаимно перпендикулярные ходы.

Вследствие значительного тепловыделения при проведении обработки, предусмотрена интенсивная циркуляция жидкости в ванне. Для этой цели в станке имеется насос и резервуар с запасом жидкости.

Станок Elbomat-413 (фиг. 68), выполненный станкостроительной лабораторией Technische Hochschule в Аахене (ФРГ) под ру-



Фиг. 68. Электроискровой станок Elbomat-413.



Фиг. 69. Электроискровой станок Agietron:
1 — рабочая головка станка; 2 — генератор; 3 — бачок с насосом для жидкости,

ководством проф. Опитц, обладает производительностью в $500 \text{ мм}^3/\text{мин}$ при обработке стали твердостью $H_{RC} = 58 \div 60$.

Станки фирмы AGIE [69]. На фиг. 69 представлен общий вид одного из станков Agietron (модель UFL 103/IK), выпускаемых швейцарской фирмой Agietron (Локарно), для электроискровой обработки мелких деталей и получения отверстий малых диаметров. В комплект станка входит собственно станок 1, генератор импульсов 2 и насосное устройство 3, обеспечивающее циркуляцию жидкости в ванне.

Техническая характеристика станка Agietron следующая:

Потребляемая мощность	250 <i>вт</i>
Питание	110, 125, 145, 220, 250 <i>в</i> , 50—60 <i>гц</i>

Вертикальный ход шпинделя	350 мм
В том числе автоматический	150 мм
Максимальная высота обрабатываемой детали	130 мм
Перемещение стола:	
продольное	200 мм
поперечное	150 мм
Практически используемые пределы обработки:	
отверстий диаметром	0,1—25 мм
деталей сечением	0,75—500 мм ²
Габариты станка	780×420×570 мм
Вес станка	140 кг
Габариты генератора	330×550×510 мм
Вес генератора	30 кг
Производительность насоса	8 л/мин
Объем бака	25 л

К числу конструктивных особенностей станка Agietron относится наличие точно устанавливаемого координатного стола с отсчетным устройством барабанного типа, имеющим цену деления 0,01 мм (с индикатором возможен учет перемещений $\pm 0,005$ мм), и прозрачной ванны из органического стекла.

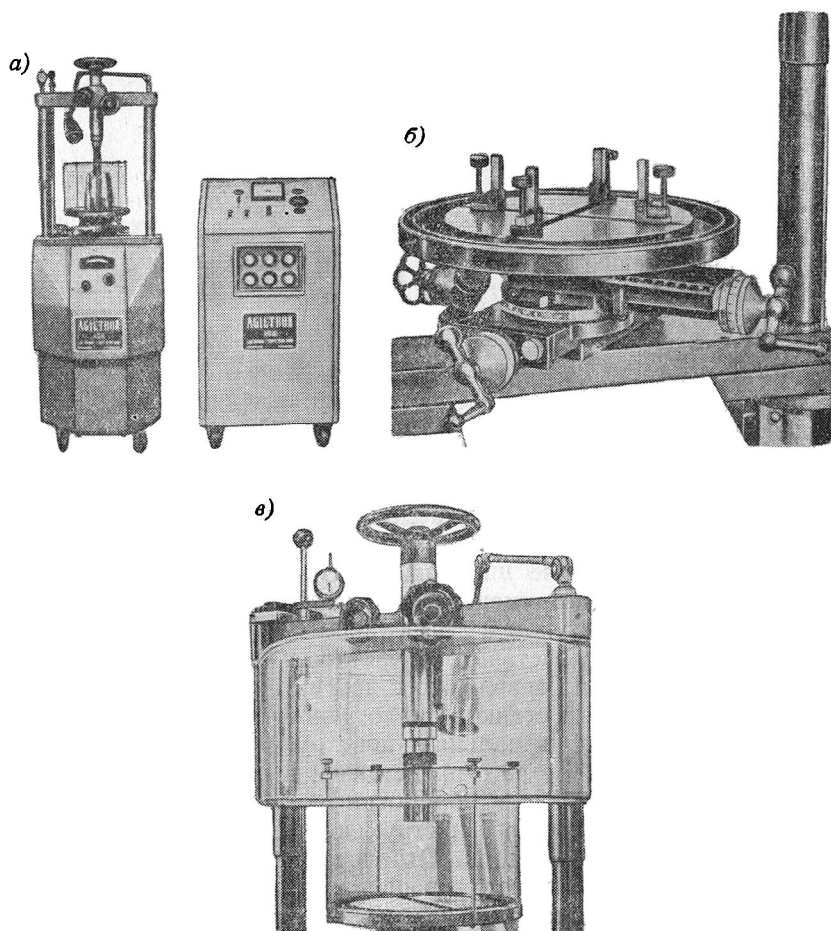
Другая модель более мощного станка представлена на фиг. 70, а. Станок Agietron модель UFL 101/2К мощностью 10 кВА, смонтирован на основании, внутри которого находится насос и бак с диэлектрической жидкостью. Рабочая головка перемещается по двум шлифованным колоннам. Под рабочей головкой расположен стол для крепления обрабатываемых деталей. Стол (фиг. 70, б) может поворачиваться вокруг оси и перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях с высокой точностью. На стол устанавливается корпус из органического стекла, плотно прилегающий к столу. Таким образом создается ванна для рабочей жидкости, покрывающей электроды.

Конструкция разборной ванны представляет большие удобства при закреплении и выверке обрабатываемой детали, так как доступ к детали обеспечен со всех сторон.

Кожух из органического стекла, полностью закрывающий рабочую головку, обеспечивает безопасность работы на станке (фиг. 70, в). Включение станка возможно только при закрытом кожухе. При открывании кожуха напряжение с электродов автоматически снимается. Регулирование межэлектродного промежутка производится при помощи пневматической системы.

Генератор импульсов находится в отдельном пульте. Основными измерительными приборами являются вольтметр и манометр.

Следует отметить, что применение разборных и съемных ванн, осуществленное в станке Agietron, оказывается удобным в ряде случаев, но требует точной сборки и хорошего уплотнения во избежание утечки жидкости.



Фиг. 70. Электронский станок Agietron мощностью 10 кка:
 а) общий вид станка; б) поворотный стол на суппорте; в) ограждение из органического стекла.

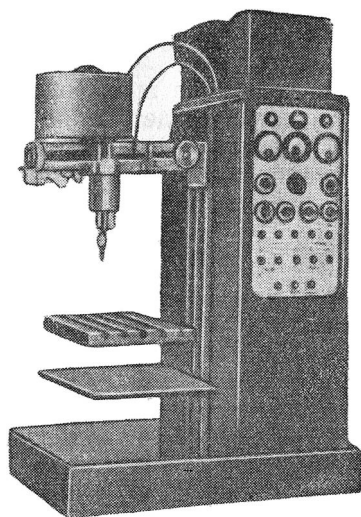
Приводим техническую характеристику станка Agietron типа UFL 101/2K с генератором типа 101-6E/5F:

Напряжение питания	190, 220, 250, 380, 440, 500 в
Круглый стол с полезным диаметром . . .	285 мм
Наибольшая высота обрабатываемой детали	140 мм
Вертикальное перемещение рабочего стола	230 мм
Горизонтальное перемещение в четырех направлениях от центра	80 мм
Вертикальное перемещение электрододер- жателя	170 мм
Расход сжатого воздуха при давлении 5—6 ат	8—10 м ³ /мин
Габариты станка	1800×620×970 мм
Вес станка	370 кг
Габариты генератора	1200×640×600 мм
Вес генератора	230 кг
Производительность обработки на обдироч- ных режимах	200—500 мм ³ /мин

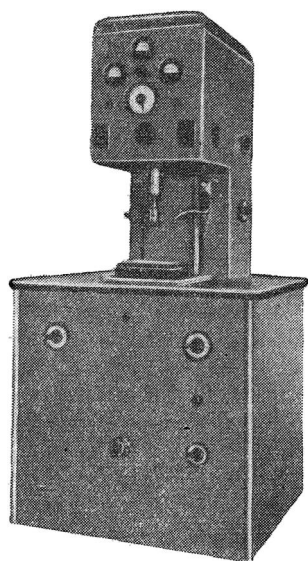
Станки ГДР [32]. Электроискровое станкостроение в ГДР представлено рядом разнообразных конструкций. Одна из них (фиг. 71) осуществлена VEB Walzwerk Hettstedt. За основу конструктивной компоновки этого копировально-прошивочного станка принята советская модель ЛКЗ-18, выпускаемая Ленинградским карбюраторным заводом. По сообщению Glasni [32] станок VEB Walzwerk Hettstedt имеет наиболее широкий диапазон применимости, особенно при точных инструментальных работах. Станок характеризуется удобным доступом к электродам и другими высокими эксплуатационными свойствами, в частности, наименьшим вспомогательным временем по сравнению с другими известными конструкциями электроискровых станков аналогичного назначения.

Другая, весьма оригинальная конструкция электроискрового станка, внешний вид которого представлен на фиг. 72, выпускается VEB Kabelwerk Köpenik для обработки деталей небольших размеров, в основном волоочильного инструмента из твердых сплавов для нужд кабельного производства. Отличительной особенностью этого станка является возможность вращения шпинделя с электродом-инструментом, что значительно совершенствует технологию электроискровой обработки круглых отверстий. Кроме того, вращающийся шпиндель может использоваться для нарезания резьбы в твердых сплавах.

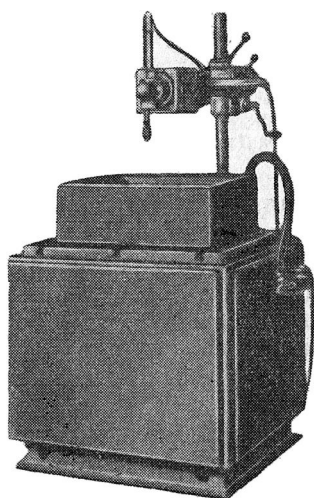
Так как при электроискровой обработке отверстий крайней необходимости в координатных перемещениях нет, то таковые в рассмотренном станке отсутствуют. Стол размером 300×300 мм для крепления обрабатываемых деталей погружается в подъемную ванну. Ванна с рабочей жидкостью, так же как и в предыдущей модели, подъемная. Подъем ванны имеет электрическую блокировку, благодаря чему невозможна подача напряжения на элект-



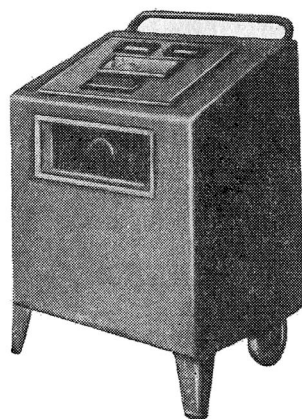
Фиг. 71. Электроискровой станок
VEB Walzwerk Hettstedt.



Фиг. 72. Электроискровой ста-
нок VEB Kabelwerk Köpenik.



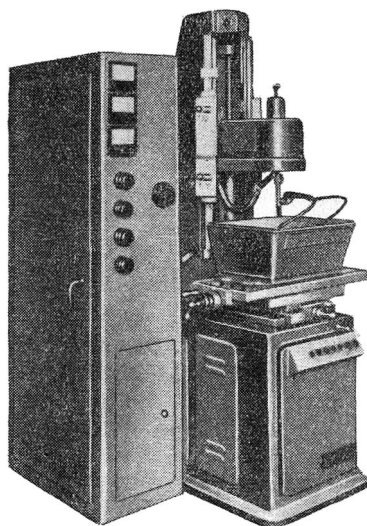
Фиг. 73. Электроискровой станок EA1 VEB, Werkzeugmaschinen-
fabrik Hermann Schlimme.



троды, если уровень жидкости над зоной обработки недостаточен. Мощность станка 4 квт. Напряжение на электродах 200 в.

Простая и удобная конструкция станка, предназначенного в основном для извлечения обломков инструмента и крепежных деталей из разнообразных деталей и изделий, представлена на фиг. 73.

Поворотная головка этого станка допускает производство упомянутых операций также в тех случаях, когда детали не помещаются в ванне, так как рабочая головка станка может быть снята и установлена непосредственно на детали, требующей ремонта.



Фиг. 74. Электронскровой станок для обработки полостей и отверстий Japaxtron D-5.

Этот станок выпускается серийно станкостроительным заводом Hermann Schlimme в Берлине. Мощность станка — 2,5 квт. Помимо извлечения обломков, этот станок может быть использован для всевозможных работ при обработке в стали и твердых сплавах отверстий различного профиля. Производительность обработки на станке — от 0,8 до 700 мм³/мин. Так как напряжение на электродах этого станка не превышает 50 в, то нет необходимости в каких-либо опраждающих устройствах.

Станки японской промышленности [62]. В Японии выпускаются несколько типов электронскровых станков различного назначения. Эти станки разработаны Токийским институтом электронскровой обработки металлов. Копировально-прошивочный станок Джапакстрон D-5 (фиг. 74) представляет собой агрегат, состоящий из корпуса, внутри которого расположена гидросистема для циркуляции жидкости, ванны на крестовом суппорте и колонны, несущей автоматический регулятор подачи электрода-инструмента. Сбоку вплот-

ную к станку устанавливается пульт питания с электрооборудованием.

Техническая характеристика станка Джапакстрон Д-5:

Диапазон обработки отверстий	Ø 0,5—150 мм
Наибольшая глубина отверстия (при Ø не менее 10 мм)	100 мм
Наименьшая ширина реза при обработке щелей	0,2 мм
Длина вертикального перемещения шпиндельной головки, включая длину хода самого шпинделя регулятора подачи . .	500 мм
Площадь стола, на котором крепится ванна	600 мм
Поперечное перемещение стола	250 мм
Продольное перемещение стола	200 мм
Наибольшая интенсивность съема металла (стали)	1—5 г/мин
Мощность	5 ква
Питание от трехфазной сети	200—220 в, 50—60 гц
Габариты станка	1850×1300×1300 мм
Вес станка	1300 кг

Станок имеет 5 режимов обработки, на отделочном режиме достигается точность обработки 0,01 мм.

Одной из новейших конструкций (1957 г.) электроэрозионных прошивочных станков, выпускаемых в Японии, является показанный на фиг. 75 станок модели ND-5 фирмы Ikegai—Jарах [108].

Станок отличается рядом конструктивных особенностей, обеспечивающих получение высокой точности обрабатываемых изделий и возможность выполнения сложных операций обработки.

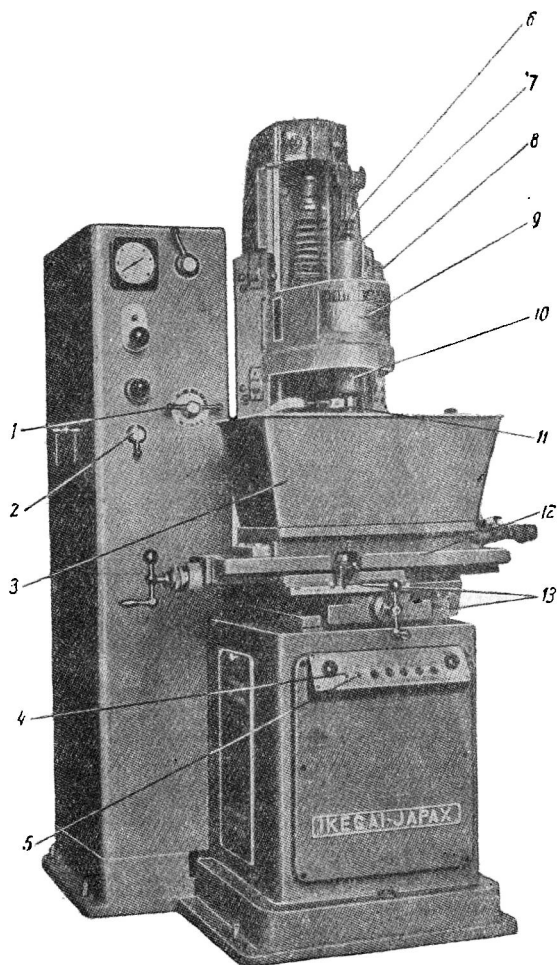
В станке имеется пять ступеней изменения режимов обработки, переключение которых производится при помощи рукоятки 1.

Новым элементом для подобных конструкций является рукоятка 2 переключателя для выбора материала. Обрабатываемая деталь и электрод-инструмент, как обычно, погружаются в ванну с жидкостью 3 емкостью 35 л. Уровень жидкости регулируется при помощи крана.

Расположенный на передней панели станка выключатель разрядной цепи 4 заблокирован с зажигающейся при повороте его люминесцентной лампой у головки, сигнализирующей, что станок начинает работать. Рядом расположен переключатель 5, управляющий подачей жидкости. При черновой обработке происходит быстрая циркуляция жидкости без фильтрования. При чистовой обработке жидкость проходит через фильтр. Если зазор между электродами составляет 0,008—0,01 мм, через наконечник циркулирует вода.

Длина направляющих 6 головки станка ND-5 составляет 1000 мм. Максимальный ход головки 500 мм. Станок имеет боль-

ший вертикальный ход по сравнению с механическими вертикальными станками. Станок сконструирован в расчете на изготовление штампов. Перемещением головки управляет переключатель 7. Сама головка 8 смонтирована на трубчатой направляющей на пятнад-



Фиг. 75. Электроискровой станок для обработки полостей и отверстий Jaraxtron ND-5.

цати шарикоподшипниках. Это обеспечивает чувствительность и точность перемещения.

Автоматическое устройство 9 для поддержания заданного промежутка между инструментом и деталью состоит из серводвигателя и магнита, находящихся во взаимодействии. Шпиндель 10 поддерживается восемнадцатью шарикоподшипниками, что обеспечивает легкий ход его.

Электрододержатель 11 смонтирован на шпинделе с конусом Морзе. Сверлильный патрон и другие специальные приспособления поставляются дополнительно.

Рабочий стол станка 12 размером 600×230 мм имеет перемещения: продольное — 280 мм, поперечное — 100 мм. На станине и столе станка смонтированы измерительные базы 13 для отсчета перемещения стола с точностью 0,01 мм.

Электроискровой профилно-прошивочный станок типа G-12. Станок G-12 относится к станкам универсального назначения для широкого диапазона электроискровой обработки полостей и отверстий. Станок (фиг. 76) имеет необычную конструктивную компоновку. Основание станка, выполненное в виде двустороннего пульта, позволяет укреплять на столе крупные детали. Доступ к рабочей головке удобен благодаря проему между сторонами пульта. Рабочая головка перемещается по двум колоннам. Все трущиеся части рабочей головки защищены от проникновения загрязнений эластичными гофрированными кожухами из изоляционного материала.

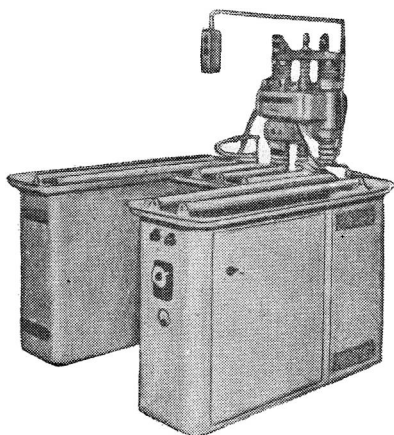
Электрооборудование находится внутри корпуса станка.

Станки и приспособления фирмы Elox [70]. Американская фирма Elox выпускает электроискровые станки, основное назначение которых — извлечение обломков инструмента и крепежа.

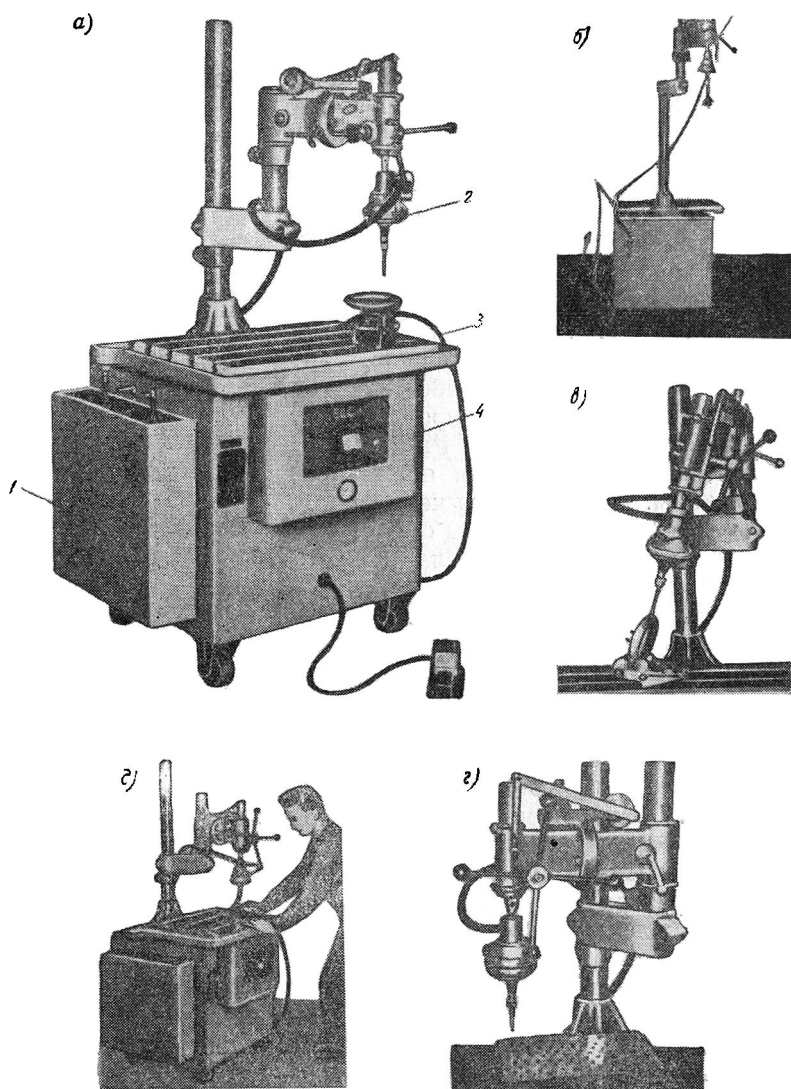
На фиг. 77 изображен один из станков, выпускаемых этой фирмой, под наименованием Tapmaster M-7. Станок состоит из рабочей головки, укрепленной на колонне, стоящей на верхней плите корпуса, и генератора импульсов, смонтированного совместно со вспомогательным электрооборудованием в этом корпусе. Сбоку к корпусу прикреплен бак для рабочей жидкости. Станок Tapmaster M-7 может легко транспортироваться, так как стоит на четырех колесах.

Стол для обрабатываемых деталей имеет размеры 710×450 мм. На столе имеются четыре Т-образных паза для приспособлений, закрепляющих обрабатываемые детали.

Закрепление рабочей головки достаточно жесткое, так как массивная колонна имеет диаметр 70 мм. Наибольшая высота установки рабочей головки над столом составляет 710 мм. На колонне имеется универсальный зажим, позволяющий придавать рабочей головке любое направление. Рабочая головка снабжена электромагнитным вибратором. Подача производится вручную. Электроды-инструменты трубчатые. Сквозь отверстие электродов-инструментов нагнетается жидкость типа эмульсии.



Фиг. 76. Электроискровой профилно-прошивочный станок G-12.



Фиг. 77. Станок Tapmaster:

а) общий вид: 1 — бак для жидкости; 2 — головка; 3 — рабочий стол; 4 — пульт управления; б) поворот головки для увеличения вылета; в) поворот головки для углового сверления г) поворот головки для сверления в углах; д) транспортирование установки.

В комплект станка входят 12 патронов для закрепления электродов-инструментов различных диаметров. Вследствие значительной длительности импульсных разрядов станки Elox для обработки твердых сплавов не применяются.

Для точной установки электрода станки снабжены специальным приспособлением и электрододержателем с плоской лыской. Главное их назначение — обеспечить смену электрода, когда для операции нужно больше чем один электрод. Указывается, что приспособление позволяет при смене электрода не производить радиальной подгонки и избежать, таким образом, применения длинных электродов.

Во многих случаях более целесообразно использовать два коротких электрода вместо одного длинного.

Приспособление основано на принципе фиксирующей плоскости, обычно применяемой там, где требуется сохранение точности установки при смене детали.

В комплект станка Стандарт М-500 входит приспособление для установки и разметки.

Приспособление позволяет легко ориентировать деталь по отношению к линии центров станка. Разметка расположения отверстия и обработка его упрощаются. С помощью специального стержня оператор может установить центр станка точно против обрабатываемой стороны детали независимо от положения стола станка.

Фирма Elox среди дополнительной оснастки поставляет универсальную вращающуюся головку для операций электроискрового шлифования. Приспособление легко устанавливается как параллельно, так и перпендикулярно рабочему столу. Диск может быть расположен под любым углом.

Приспособление состоит из электродвигателя с гибким валом и отдельно держателя для диска. Электродвигатель жестко крепится на корпусе станка, держатель для диска с креплением типа Brown и Scharf № 9 присоединяется стяжными болтами. Шпиндель вращается в двух предварительно напряженных роликовых подшипниках, обеспечивающих жесткость и необходимую точность установки диска.

Универсальная вращающаяся головка позволяет производить на станке М-500 различные операции шлифования, заточки, восстановления поверхности штампов и т. д.

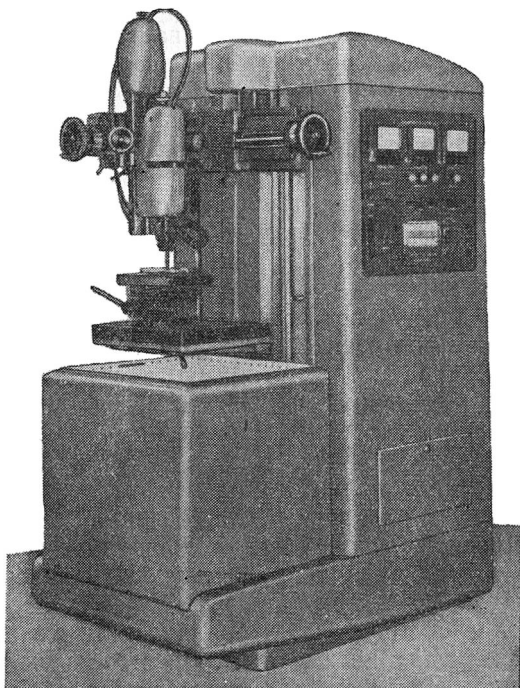
Для установки приспособления необходимо снять стандартный патрон и вставить держатель диска. Затем следует присоединить гибкий вал и питающий кабель, после чего приспособление готово к работе.

Шлифование по способу Elox, как установлено, дает лучшие смазочные свойства поверхности и более острые углы, что приводит к увеличению срока жизни инструмента и штампов.

Станки Чехословацкой промышленности [61]. Разнообразное электротехнологическое оборудование выпускается заводами Чехословакии. Разработкой вопросов физики и технологии электроэрозии занимается институт Vuma.

При разработке конструкции электроискрового оборудования большое внимание уделяется архитектурному оформлению станков и отделке.

На фиг. 78 изображен электроискровой копировально-прошивочный станок универсального назначения. Этот станок применяется для электроискровой обработки полостей и отверстий в различных



Фиг. 78. Электроискровой копировально-прошивочный станок (Чехословакия).

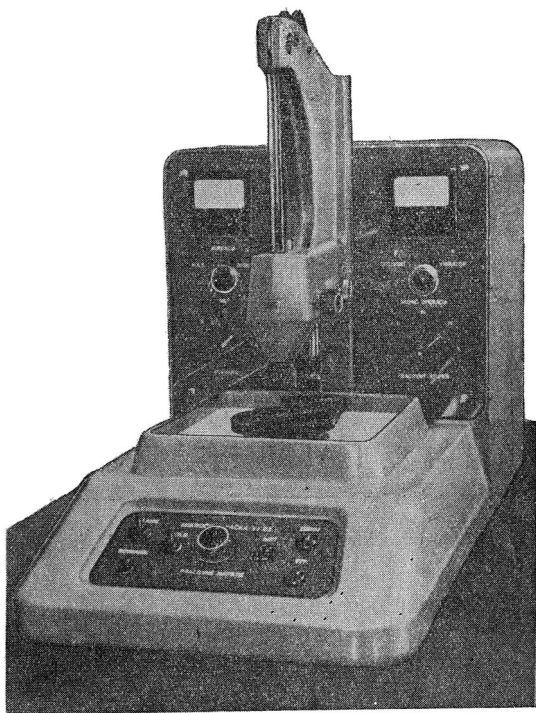
металлах и сплавах. Станок оборудован автоматической подачей электрода-инструмента. В основу регулятора положен электродвигатель постоянного тока, якорь которого включен в мостовую схему. Одним из плеч моста является искровой промежуток. Ванна с рабочей жидкостью неподвижная. Обрабатываемая деталь опускается в ванну вместе с угловым кронштейном, на котором находится рабочий стол станка.

Техническая характеристика станка VIK-2:

Напряжение питания	170—260 в
Мощность	10 квт
Напряжение на электродах	128—195 в
Число режимов	10
Наибольшая площадь обработки	20 000 мм ²

Наибольшие размеры обрабатываемых деталей	350×300×250 мм
Площадь стола	400×320 мм
Горизонтальное перемещение	180×200 мм
Вертикальное перемещение	200 мм
Объем ванны	80 л
Вес станка	1000 кг

Для электроискровой обработки отверстий малых диаметров применяется станок VI-03 (фиг. 79). Станок рассчитан на обра-



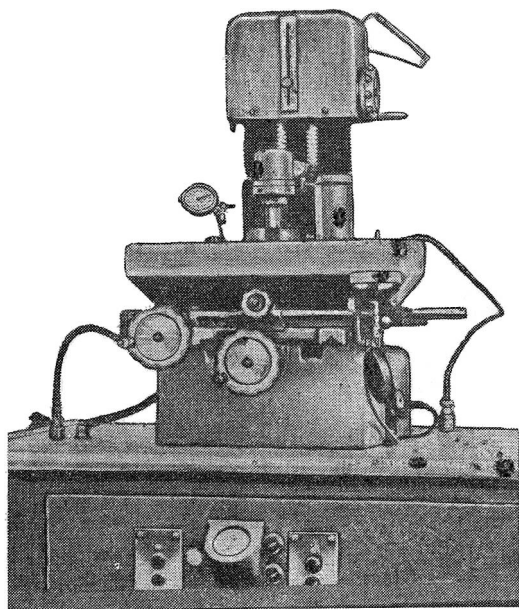
Фиг. 79. Электроискровой станок для малых отверстий (Чехословакия).

ботку отверстий диаметром от 0,05 до 0,4 мм. Предусмотрено 6 режимов обработки. Подача электродной проволоки производится при помощи автоматического регулятора. Подача сочетается с вибрацией электрода-инструмента (проволоки). Частота вибрации 100 гц. Амплитуда вибрации регулируется в пределах от 0 до 1 мм. Мощность станка 400 вт, напряжение 140 в. Объем ванны составляет 8 л. Вес станка 48 кг. Габаритные размеры станка 600×370×740 мм.

Станки фирмы Usimu [44]. Представляет интерес выпущенный фирмой Usimu электроискровой станок для обработки всевозмож-

ных полостей и отверстий. Станок Usimu (фиг. 80) по данным фирмы оснащен генератором импульсов без конденсаторов. Электромагнитный генератор этого станка позволяет получить частоту разрядов в несколько десятков тысяч герц.

Высокая чистота поверхности обеспечивается применением низкого напряжения разрядов.



Фиг. 80. Электроискровой станок Usimu.

Автоматическое регулирование межэлектродного промежутка обеспечивается специальным серводвигателем.

Указывается, что точность обработки на станке Usimu достигает 0,01 мм.

Станок обеспечен координатными перемещениями.

На передней панели станка расположены рукоятки управления и экран осциллографа, служащего для контроля работы генератора импульсов.

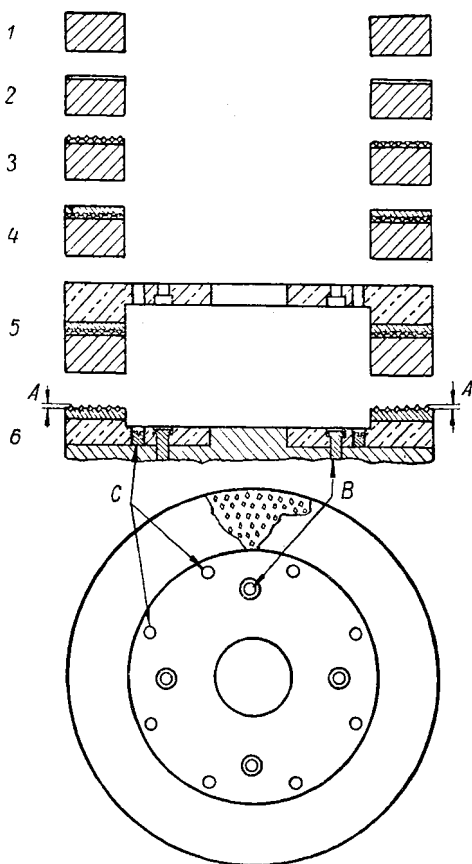
Станок Usimu может быть использован для электроискрового шлифования. Электродный диск, применяющийся при шлифовании, останавливается автоматически, когда между ним и обрабатываемой деталью образуется нужный зазор.

2. Станки и приспособления для заточки и шлифования

В последние годы зарубежные фирмы уделяют некоторое внимание применению электричества для заточки и доводки твердосплавных инструментов.

Представляет интерес одна из применяемых в США разновидностей электрозаточки на комбинированном металлоабразивном круге [102].

Основным инструментом для заточки по этому способу является шлифующий диск, представляющий собой металлическую основу с укрепленным в ней тонким слоем мелких алмазных зерен. Техно-



Фиг. 81. Схема технологического процесса изготовления электродного диска для заточки.

логия изготовления подобного круга графически представлена на фиг. 81 и проводится в следующем порядке (патент Keeleric).

1. Стальное кольцо (сечение которого показано на фиг. 81, 1) шлифуется, чтобы нижняя и верхняя плоскости были строго параллельны друг другу.

2. На верхнюю поверхность кольца наносится тонкая пленка клеящего вещества. Эта пленка настолько тонка, что не поддается измерению (фиг. 81, 2).

3. На клеющую пленку накладываются алмазные выступы-зерна, распределение их и уровень проверяются, после чего клеющее вещество запекается (фиг. 81, 3).

4. На кольцо, поверх алмазных зерен, гальванически наносится слой никеля, после чего противоположная плоскость шлифуется параллельно основанию кольца (фиг. 81, 4).

5. К плоскости кольца припаивается или приваривается ступица шлифовального круга. Первоначальное стальное колесо отламывается от клея. После этого круг имеет один ряд алмазных режущих выступов, расположенных на одном уровне (фиг. 81, 5).

6. Круг растворяется электролитически на величину A , равную 0,0175 мм (фиг. 81, 6). Эта величина представляет собой зазор, который поддерживается между деталью и кругом в процессе шлифования.

7. Однослойные круги должны быть установлены без биения, ибо если их править после установки, можно снять весь слой алмазов. Для крепления на шпинделе в круге делаются четыре отверстия под болты B . Когда эти болты затянуты, установка круга контролируется при помощи индикатора; если имеются провалы, то в ближайшем месте во вспомогательные отверстия C устанавливаются болты, которые выравнивают круг. Таким образом, круг устанавливается точно и быстро без правки (патент E. Speicher).

Концентрация алмаза в этом круге выше, чем обычно принимаемая, что предохраняет от непосредственного контакта между деталью и кругом (контакт может вызвать возникновение дуги и искрения). Это дает возможность исключить царапание отдельными выступающими зернами алмаза и получить более высокий класс чистоты поверхности. Однако частицы алмаза должны располагаться не слишком близко друг к другу, чтобы не препятствовать потоку электролита между деталью и кругом.

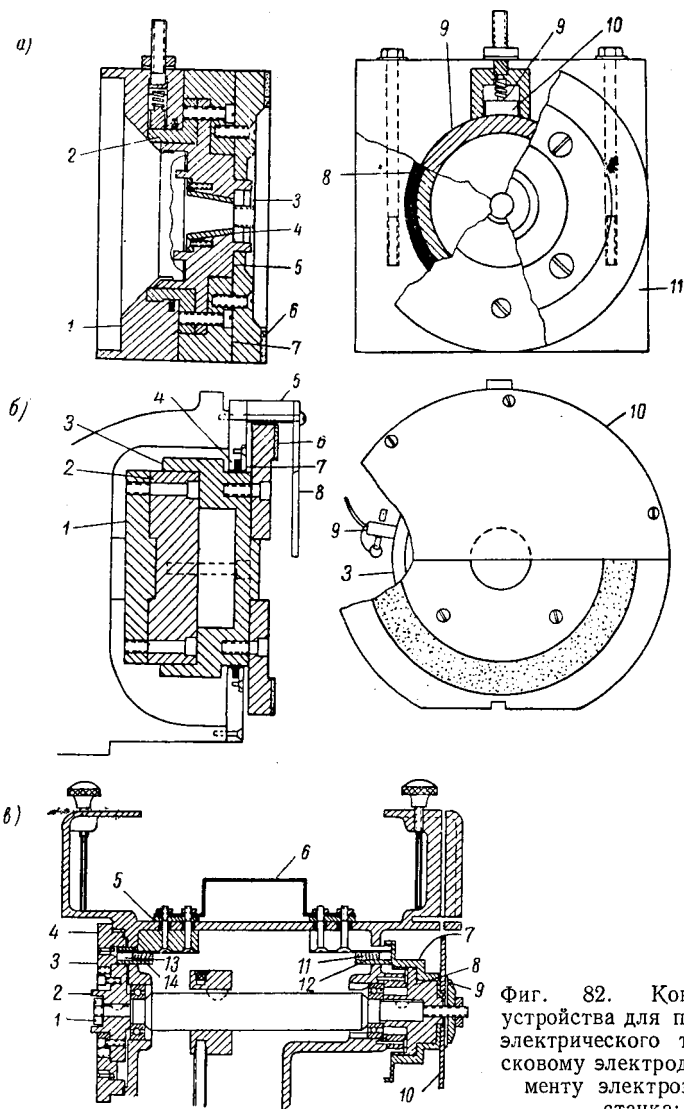
Переоборудование обычных шлифовальных станков с целью приспособления их для электролитического шлифования является весьма простым.

Шлифующий круг изолируется от шпинделя станка. В качестве изоляции применяются различные пластмассы. Положительный полюс подключается к столу; отрицательный полюс — к щеткам шлифовального круга.

Щеточное устройство должно быть хорошо защищено от жидкости. На фиг 82 показаны конструктивные варианты переоборудования некоторых заточных станков (Delta, Exello и Hammond CB-77-B). Заточные станки других типов могут быть переоборудованы подобным же образом.

В литературе сообщается об организации в ближайшее время промышленного выпуска станков с изолированными головками для электрошлифования.

У этих станков питание производится через выпрямитель специальной конструкции. Изолированный круг подключен к отрицательному полюсу через щетку, защищенную от разбрызгивания; изделие подключено к положительному полюсу через стол станка.



Фиг. 82. Конструкция устройства для подведения электрического тока к дисковому электроду-инструменту электрозаточного станка:

а) к станку Excello: 1 — изолирующий корпус; 2 — бронзовое контактное кольцо; 3 — затягивающая гайка; 4 — втулка стальная и бронзовая; 5 — изолирующая втулка; 6 — алмазный круг; 7 — стальная плита; 8 — графитовая набивка; 9 — медный щеткодержатель с пружиной; 10 — контактная щетка; 11 — изолирующий корпус;

б) к станку Delta: 1 — основание; 2 — изолятор; 3 — бронзовая обойма; 4 — уплотнение; 5 — пластмассовый щиток; 6 — алмазный круг; 7 — упорное кольцо; 8 — щиток 9 — щетка; 10 — пластмассовый кожух;

в) с станку Hammond: 1 — упорная шайба; 2 — изолирующая втулка; 3 — латунное прижимное кольцо для щеток; 4 — изолятор; 5 — изоляция; 6 — вывод для присоединения щеток; 7 — латунное кольцо; 8 — изолирующая втулка; 9 — изолированная упорная шайба; 10 — диск; 11, 13 — контактные пластины; 12, 14 — изоляция.

Зазор между кругом и деталью составляет 0,025 мм. Электролит подается в пространство между выступами круга и затачиваемым инструментом.

Благодаря малому расстоянию между катодом-инструментом и анодом-деталью (в пределе 0,0175 мм) возможна большая плотность тока, доходящая до 60 а/см² при обработке твердых сплавов и до 220 а/см² при обработке стали.

Если плотность тока чрезмерно высока для заданного зазора, то возникает искрение и может произойти эродирование инструмента и повреждение поверхности детали. Такое явление может иметь место, куда оператор прикладывает слишком большое усилие к детали, уменьшая тем самым расстояние между анодом и катодом; при этом алмаз начинает снимать стружку.

Для предотвращения этого выпрямитель имеет электронное регулирование, уменьшающее напряжение при сильном искрении.

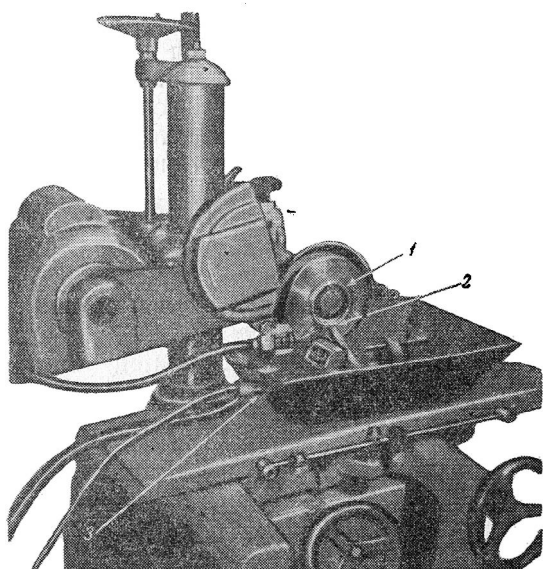
Возникновение искрения создает импульсы обратной полярности. Регулятор улавливает эти импульсы, усиливает и выпрямляет их, а затем направляет их в обмотку дросселя насыщения, включенного последовательно с питающим устройством, чем достигается сложение напряжений после выпрямителя. Практически регулирование осуществляется мгновенно. Оно может быть установлено таким образом, чтобы вообще исключить искрение либо установить допустимую степень искрения. Обычно регулирующее устройство устанавливается так, чтобы имело место лишь незначительное искрение, причем напряжение понижается до такого предела, при котором невозможно возникновение электрической дуги. В качестве электролита обычно используются растворы солей.

В описаниях работающих установок [5] упоминается о применении в качестве электролита водного раствора (1 : 20) ингибитора ржавления фирмы Socony-Vacuum, подача которого составляет 2 л/мин.

На фиг. 83 показан заточный станок фирмы Нортон № 2 Buga-Way, приспособленный для электрического шлифования. Станок снабжен столом, совершающим колебательные движения, и универсальной державкой для инструмента, в которую входит угломер и шаблон специальной конструкции. Шпиндель и патрон шлифовального круга изолированы от корпуса. Установка питается постоянным током через купроксные выпрямители, вторичная обмотка трансформатора которых переключается от 0 до 24 в, при максимальной силе тока 230 а.

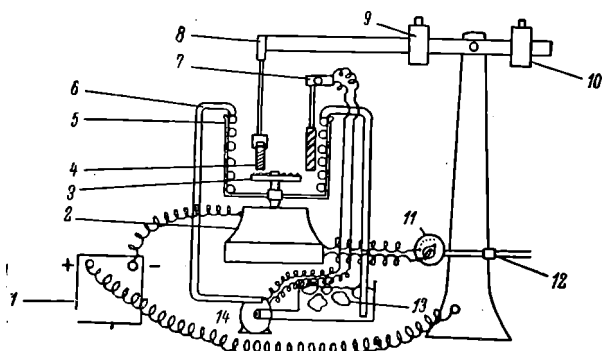
Внешнее сопротивление состоит из 9 ступеней регулирования от 0 до 2,61 ом. Ток подводится к изолированному шпинделю при помощи угольных щеток, установленных в задней части станка. При нормальной работе алмазный круг является катодом, а затачиваемый твердосплавный инструмент — анодом, причем имеется устройство для переключения полярности элементов, чтобы в случае необходимости производить электрохимическую правку кругов.

На фиг. 84 показана схема лабораторной установки для изучения электрической заточки в различных условиях.



Фиг. 83. Станок фирмы Нортон, приспособленный для электрической заточки:

1 — латунное кольцо; 2 — инструмент; 3 — подвод тока (+) к изделию.



Фиг. 84. Схема лабораторной установки для изучения электрической заточки:

1 — выпрямитель; 2 — вертикальный приводной двигатель; 3 — кружок с алмазной крошкой; 4 — твердосплавный испытуемый образец $\varnothing 10$ мм; 5 — стеклянная трубка для подвода электролита; 6 — охлаждающий змеевик; 7 — терморегулятор; 8 — балансир; 9 — нажимной груз; 10 — балансировочный груз; 11 — автотрансформатор; 12 — сеть; 13 — лед; 14 — насос.

Заточной круг диаметром около 75 мм имеет бесступенчатое регулирование скорости. К кругу прижимается образец из твердого сплава с давлением, устанавливаемым при помощи грузов, подвешиваемых на рычаге.

Результаты опытов показали, что для данного электролита скорость вращения круга значительного влияния на интенсивность съема металла не имеет, но сила, с которой деталь прижимается к кругу, должна быть достаточной для того, чтобы алмазные выступы снимали окислы. Кроме того, установлено, что если электролит специально охлажден, то интенсивность съема металла снижается.

Фирма Wickman наряду с прошивочными станками ввела в практику также станки для ручной заточки электроискровым способом.

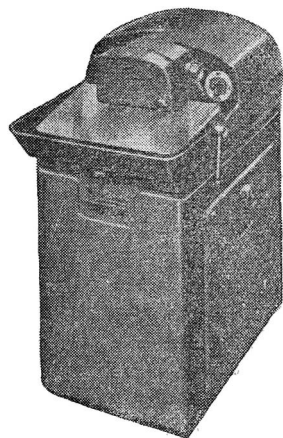
По конструкции станок, известный под названием Erodoscharp (фиг. 85), подобен обычному станку для абразивной заточки инструмента с поворотным столом, дающим возможность заточить требуемые углы. Вместо шлифовального круга установлен чугунный диск, являющийся электродом.

Рабочая часть диска имеет расточенную выемку, являющуюся кольцевой масляной камерой. С масляной камерой соединена серия канавок на рабочей части диска, расположенных тангенциально по отношению к выемке. Когда диск вращается, масло поступает в кольцевую

камеру и под действием центробежной силы и растекается по торцу диска вдоль канавок. Пленка масла на поверхности диска служит диэлектриком и поддерживает рабочий зазор между инструментом и диском до тех пор, пока не будет приложено слишком большое давление, которое нарушит прочность масляной пленки. Рабочий может без труда поддержать нужное давление, причем для работы на этом станке не требуется квалификации рабочего более высокой, чем при обычной заточке инструмента.

Установлено, что существует критическая скорость вращения диска, при которой процесс становится саморегулирующимся. Эта скорость равна примерно 1300 об/мин. Изменяя электрические режимы, представляется возможным получать поверхность различной чистоты. Отмечается, что поверхность, полученная при чистовых режимах, аналогична доведенной.

Для профилирования твердосплавных резцов применяется комбинированное устройство, состоящее из генератора Elox и плоскошлифовального станка Brown и Scharp (фиг. 86). Обрабатываемая деталь погружается в диэлектрическую жидкость и соединяется с анодом. Электродом служит диск из латуни.

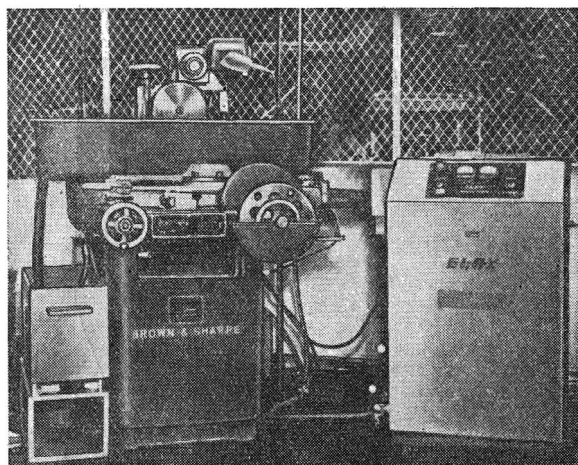


Фиг. 85. Станок Erodoscharp фирмы Wickman для электроискровой заточки.

Периферии диска придается форма, обратная той, которую требуется получить на заточенном резце. Число оборотов диска в минуту составляет 50—500. Подача стола регулируется автоматически специальным серводвигателем.

Для доводки поверхности до $H_{ск} = 1,5 \text{ мк}$ съем металла составляет 56—560 $\text{мм}^3/\text{мин}$.

Электрические режимы обработки рассчитаны таким образом, что энергия, определяемая током, напряжением и частотой, может быть выбрана предварительно.



Фиг. 86. Станок для электроискрового профилирования твердосплавных резцов.

Профилирование лучше производить в два приема. Сначала на низкой частоте получается грубая поверхность, затем на более высокой частоте разрядов профиль получается точным и чистым.

Так как величина зазора между электродом и деталью составляет 0,0037—0,005 мм шпиндель станка должен обладать особой жесткостью.

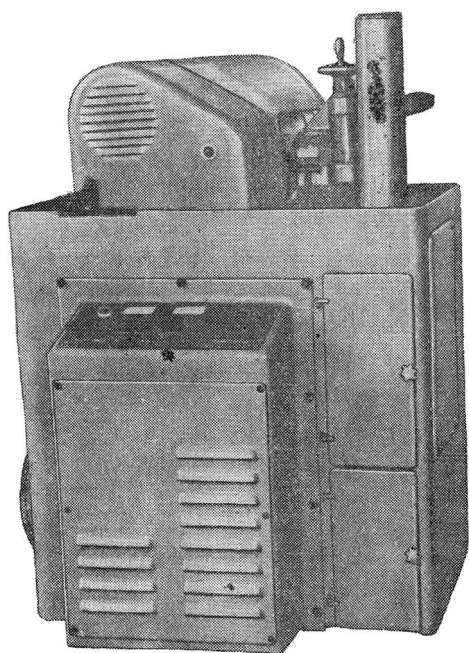
3. Прочие конструкции станков и приспособлений

Гамма станков для анодно-механического разрезания выпущена в Чехословакии.

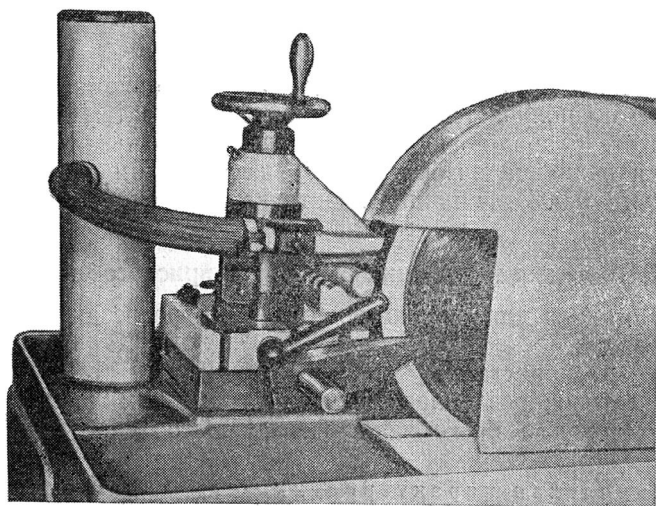
На фиг. 87 представлен анодно-механический станок для разрезания заготовок различного профиля диаметром до 30 мм . Крепление заготовок и брызгозащитное приспособление показано на фиг. 88.

Техническая характеристика отрезного станка

Мощность (потребляемая)	2 <i>квт</i>
Мощность электродвигателя	0,3 <i>квт</i>
Скорость вращения диска	800 <i>об/мин</i>
Диаметр диска	300 <i>мм</i>
Напряжение	26 <i>в</i>



Фиг. 87. Анодно-механический станок типа РА-30 для разрезания.



Фиг. 88. Рабочая головка анодно-механического станка типа РА-30.

Максимальный ток	40 а
Наибольший диаметр разрезаемой заготовки	30 мм
Объем рабочей жидкости	70 л
Вес станка	340 кг

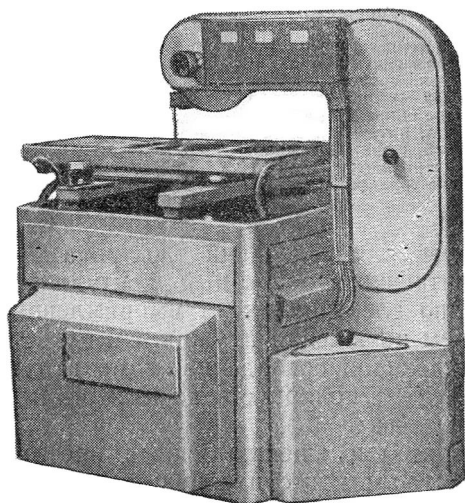
В электролит, состоящий из жидкого стекла, рекомендуется добавка этилен-гликоля, препятствующего застыванию электролита.

Техническая характеристика анодно-механического станка для разрезания заготовок диаметром до 150 мм приведена ниже. В зависимости от диаметра разрезаемой заготовки ток в рабочей цепи изменяется:

Диаметр заготовки в мм	20	50	100	150
Ток в а	30—40	80—100	110—150	150—200

Техническая характеристика отрезного станка РА-150

Мощность станка	6 квт.
Мощность электродвигателя	0,8 квт
Напряжение на электродах	10—30 в
Максимальный ток	200 а
Диаметр диска	780 мм
Скорость вращения диска	350 об/мин
Объем жидкости	120 л
Габариты станка	1260×1450×960 мм
Вес станка	700 кг



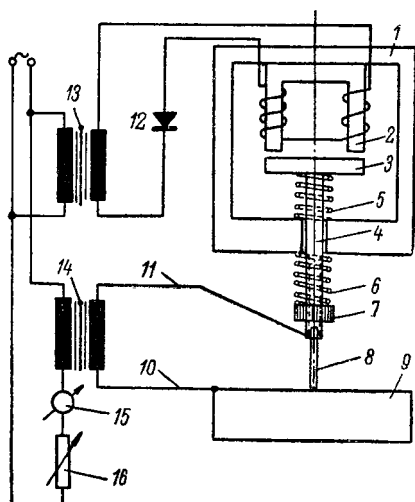
Фиг. 89. Анодно-механический станок типа РА-30
с проволочным электродом-инструментом.

Для вырезания отверстий сложных очертаний применяется анодно-механический станок с проволочным электродом-инструментом (фиг. 89).

Электродная проволока перемещается по четырем роликам.

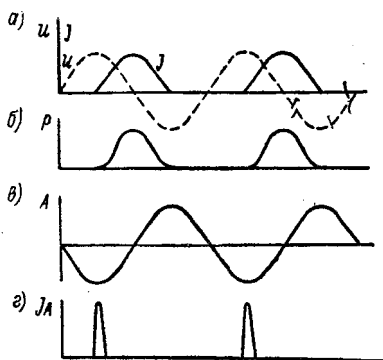
Место сварки проволоки не имеет утолщения, вследствие чего не является помехой при работе.

Согласно патенту Erhardt [4] проведение электроэрозионной обработки на низком напряжении (12 в) без конденсаторов осуществляется при помощи электро-механического устройства, изображенного на фиг. 90.



Фиг. 90. Схема станка для низковольтной электроискровой обработки:

1 — корпус вибратора, 2 — сердечник электромагнита; 3 — якорь электромагнита; 4 — шпindel; 5, 6 — пружины; 7 — электрододержатель; 8 — электрод-инструмент; 9 — обрабатываемая деталь; 10, 11 — подводящие шины; 12 — выпрямитель; 13 — трансформатор, питающий обмотку электромагнитного вибратора; 14 — силовой трансформатор; 15 — амперметр; 16 — реостат в первичной обмотке трансформатора.



Фиг. 91. График изменения напряжения на электродах и импульсов тока в межэлектродном промежутке.

Частота механических колебаний электрода 8 устанавливается равной частоте питающего разрядный контур переменного тока. Благодаря питанию электромагнита выпрямленным током и настройке изменением натяжения пружин 5 и 6 достигается синхронизация, обеспечивающая совпадение момента сближения электродов с наличием (+) полярности на изделии и (—) полярности на электроде-инструменте.

Это способствует уменьшению износа инструмента (16% от снятого с анода металла при синхронизме против 250% при отсутствии синхронизма). Амплитудное значение тока достигает 100 а.

На фиг. 91, а, б, в, г представлены:

- напряжение тока в обмотках привоного электромагнита;
- усилие перемещения якоря, несущего шпindel;
- колебания якоря относительно среднего положения;
- импульсы тока в цепи разряда при сближении электродов.

ГЛАВА III

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Рассмотрение обширного литературного и патентного материала показывает, что основное применение электрические методы обработки нашли при изготовлении различных полостей и отверстий в различных твердых и сверхтвердых материалах; в меньшей степени используются они для извлечения обломков инструмента, для шлифования и заточки. Сведения о других видах электрической обработки (разрезание, точение, упрочнение поверхности и др.) носят случайный характер и не дают представления об их месте по масштабам использования в ряду других технологических процессов.

1. Обработка отверстий и полостей

Основными областями применения электрических способов обработки за рубежом, как уже отмечалось выше, является обработка, связанная с образованием полостей и отверстий различных форм и размеров в деталях из закаленной стали и твердых, металлокерамических сплавов, а также выполнение некоторых специфических операций, например, извлечения обломков инструмента и крепежных деталей.

Систематизированных данных о важнейших технологических приемах, материалах электродов-инструментов и характеристиках результатов обработки (точность, чистота поверхности, производительность обработки) в зарубежной литературе нет, несмотря на обилие всевозможных публикаций рекламного характера о преимуществах электрических способов обработки. Вследствие этого и приводимые в настоящем разделе сведения технологического характера страдают отрывочностью и неполнотой. Однако и из этих сведений можно составить общее представление о масштабах применения и уровне зарубежной техники электрической обработки материалов.

Технология изготовления штампов электроискровым способом. Штамп состоит из матрицы, пуансона и съемника. Матрица имеет шестигранное отверстие с допуском на изготовление $\pm 0,25$ мм. Пуансон изготавливается из круглой заготовки диаметром 12,7 мм с длинной рабочей частью, равной толщине матрицы. На рабочей части пуансона имеется положительный конус размером 0,025 мм.

Съемник имеет круглое отверстие диаметром 12,7 мм, переходящее в шестигранное отверстие на расстоянии 2,5 мм от основания. В круглую часть отверстия заходит круглая часть пуансона, а шестигранная часть служит для снятия заготовки.

Для изготовления деталей штампа электронскровым способом необходим только один электрод-инструмент из легко обрабатываемой латуни. Шестигранная часть электрода-инструмента должна быть длиной около 100 мм и обработана на 0,025 мм ниже номинального размера матрицы.

Операция прошивки шестигранного отверстия в заготовке матрицы начинается с установки и выверки электрода-инструмента и закрепления плиты матрицы к столу станка. На столе станка просверлено глухое отверстие. Размер этого отверстия должен быть таким, чтобы электрод-инструмент мог войти в него после того, как он пройдет через плиту матрицы.

Вместо сверления стола для выхода электрода-инструмента применяют прокладки, создающие зазор между деталью и столом.

Шестигранное отверстие в матрице изготавливают за один проход на чистовом режиме. Затем заготовку съемника устанавливают и закрепляют на столе точно в таком же положении, как и матрицу, положение же электрода-инструмента не меняется.

Обработку отверстия съемника ведут на грубом режиме. Переход с чистового режима на грубый увеличивает размер отверстия съемника по сравнению с размером отверстия матрицы на величину заданного зазора.

Вторую деталь, служащую съемником, в дальнейшем используют как электрод-инструмент для обработки пуансона, для чего изготавливают латунную державку, в которой крепится съемник. Вторым концом латунную державку закрепляют в шпинделе станка. Съемник, имеющий коническое отверстие, крепят к державке таким образом, чтобы меньший диаметр отверстия был обращен книзу, а отверстие съемника совпадало бы с отверстием в державке, через которое подается рабочая жидкость.

Заготовку пуансона крепят в призме в вертикальном положении точно под шестигранным отверстием съемника. В этой установке съемник служит электродом-инструментом, а заготовка пуансона является обрабатываемой деталью.

Так как электронскровый способ обработки вызывает эрозию как обрабатываемой детали, так и электрода-инструмента, то пуансон вырежет круглое отверстие в съемнике и в то же самое время съемник придаст шестигранную форму пуансону.

Операция изготовления пуансона, как и изготовление матрицы, производится на чистовом режиме. Во время этой операции пуансону придают шестигранную форму, которую имеет отверстие съемника, а в съемнике появляется отверстие круглой формы.

Обработку приостанавливают тогда, когда ширина шестигранной части отверстия в съемнике будет равна 2,0—2,5 мм. За это время шестигранный пуансон пройдет вверх через съемник на 12—13 мм.

В штампе имеются конструктивные особенности, которые дают возможность сохранить точный зазор в системе пуансон-матрица даже после неоднократных переточек. Это обеспечивается наличием положительного конуса на пуансоне.

После переточки матрицы отверстие вырубного окна увеличивается. Для сохранения заданного зазора между матрицей и пуансоном необходимо снять такое же количество материала с рабочего



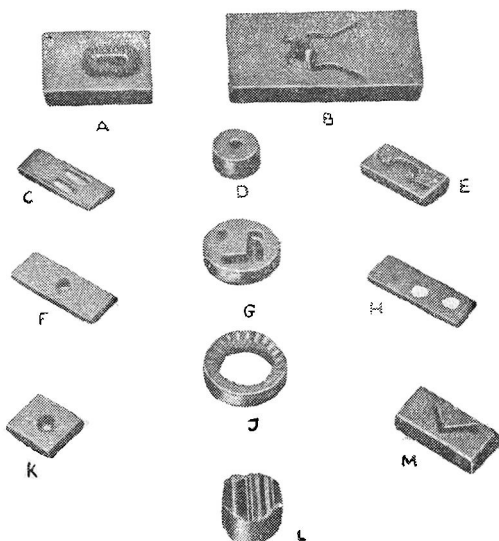
Фиг. 92. Прошивка отверстий малого диаметра в стальных шариках (монета помещена для сравнения).

торца пуансона, что позволит увеличить его размеры пропорционально увеличению вырубного окна матрицы. Это достигается за счет того, что величины конуса пуансона и матрицы равны при высоте рабочей части пуансона, равной высоте матрицы. Если возникает необходимость изменить зазор между пуансоном и матрицей, то этого можно достичь, снимая больше материала либо с пуансона, либо с матрицы.

Многочисленные примеры конкретных применений электрических методов обработки, сопровождающиеся некоторыми технологическими характеристиками, содержатся в статьях, посвященных описанию конструкций отдельных моделей станков, а также в проспектах этого оборудования. Приводимые ниже примеры заимствованы из указанных источников.

Фиг. 92 показывает пример прошивки тонких отверстий электроискровым способом (фирма Sperry Gyroscopic, Англия). Диаметр стального шарика 3,2 мм, диаметр отверстий в шариках 0,2 мм.

На фиг. 93 представлены [36] образцы различных изделий, обработанных электроискровым способом на станке Erodomatic фирмы Wickman. *A* — вырубной штамп со стандартной твердосплавной вставкой толщиной 9 мм, обработанный окончательно за 8 час. с точностью до 0,0125 мм. *B* — штамп для выдавливания толщиной 26 мм, изготовленный за 12 час. из закаленной стали с точностью до 0,125 мм. *C* — пробное изделие из твердого сплава, толщиной



Фиг. 93. Различные детали штампов, обработанные электроискровым способом.

4 мм; два фасонных отверстия в этом изделии были обработаны за 2 часа с точностью до 0,0125 мм. *D* — твердосплавный шестигранный штамп толщиной 14 мм; отверстие в нем обработано за 3 часа с точностью до 0,05 мм. За это же время обработано фасонное отверстие в твердосплавном штампе *E* для выдавливания, толщиной 9 мм; оно было обработано с точностью до 0,125 мм. *F* — твердосплавный глазок (заготовка толщиной 4 мм) для волочения зубчатой проволоки. Отверстие в заготовке глазка было изготовлено за 50 мин. с точностью до 0,05 мм. *G* — штамп для выдавливания материала углового сечения, изготовленный из твердого сплава с толщиной заготовок 9 мм; штамп обработан, включая изготовление установочного отверстия, за 15 час.

Особое внимание заслуживает изделие *H*. Оно изготовлено из твердого сплава и имеет 4 мм в ширину. Два шлицевых отверстия в нем обработаны каждое за 5 час. с точностью до 0,07 мм. *I* — твердосплавный диск диаметром 38 мм при толщине 9 мм, фасонное отверстие в нем обработано за 2 часа. *K* — твердосплавная фильера для волочения зубчатой проволоки, имеет толщину 5,4 мм. Она обработана за 1 час с точностью до 0,025 мм.

L — твердосплавный составной фасонный резец диаметром 25,4 мм, обработанный в течение 2 час. с точностью до 0,07 мм. Наконеч, *M* — штамп для выдавливания материала углового сечения, 9 мм толщиной, изготовленный из вольфрамовой стали, был обработан за 8 час. с точностью до 0,05 мм.

Представляет практический интерес сообщение [1] о применении электроискрового способа обработки в цехе штампов и прессформ автомобильного завода фирмы Дженерал Моторс. В этом цехе установлен электроискровой станок, переоборудованный из фрезерного станка фирмой Еlox, изготавливающей электроискровое оборудование.

Использование этого станка в течение полугода показало, что при помощи электроискрового метода обработки во многих случаях можно получить значительную экономию при изготовлении новых и восстановлении старых прессформ и штампов. Особенно этот способ обработки оказался удобным при переоборудовании прессформ и штампов, вызываемом изменениями чертежей деталей.

Приводятся следующие примеры эффективного применения электроискровой обработки.

В связи с изменением конструкции изделия оказалось необходимым дополнительно сделать по два трехступенчатых отверстия в каждой из шести закаленных вставок прессформы. Эта работа была выполнена на электроискровом станке без отжига вставок за 48 час. Изготовление новых вставок потребовало бы 420 час. работы квалифицированного инструментальщика, а переделка старых вставок обычными методами, т. е. путем отжига, обработки отверстий и последующей закалки, была признана чрезвычайно трудной и даже невыполнимой операцией.

В другом случае потребовалось углубить расточку на 1,27 мм в 11 стальных закаленных формах для литья под давлением. Выполнение этой работы обычными методами потребовало бы 33 часа, а на электроискровом станке она была выполнена всего за 12 час.

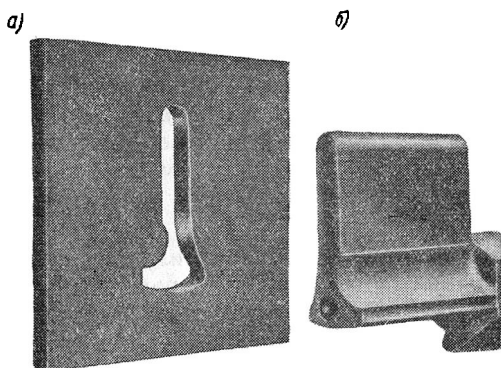
Оказалось необходимым увеличить диаметр расточки в 15 твердосплавных втулках с исходного внутреннего диаметра 19 мм до размера в пределах от 23 до 29,6 мм. Шесть втулок имели длину 19 мм каждая, из остальных девяти каждая была длиной 41 мм.

Шлифование этих втулок при помощи алмазных абразивных кругов заняло бы 170 человеко-часов и было бы связано с расходом кругов на 300 долларов. На электроискровом станке, при помощи медных электродов, на изготовление которых пошло 36 час., эта работа была выполнена за 54 часа. Таким образом, было сэкономлено 80 час. трудозатрат и алмазных абразивных кругов на 300 долларов. Лишь 20 час. потребовалось для изготовления электродов и прошивки паза глубиной 12,5 мм и шириной 22 мм в прессформе. Паз имеет конусность $1\frac{1}{2}^\circ$ с каждой стороны и радиус 0,4 мм в основании. Фрезерование паза занимало 48 час. и было связано с поломкой инструмента. Доводка паза после искровой обработки отняла 3 часа.

Одним из примеров успешного применения электроискрового способа является обработка четырех форм для литья под давле-

нием детали арматуры заднего моста автомобиля Шевроле модели 1955 года.

Было установлено, что изготовление ободков глубиной 4,8 мм в четырех формах на копировально-фрезерном станке займет приблизительно 300 час., после того как формы будут отожжены. Но оказалось, что отжигать формы невозможно, а изготовление новых форм будет стоить более 10 000 долларов. Ввиду этого было решено воспользоваться электроискровым способом обработки. На изготовление восьми комплектов электродов (по два на каждую



Фиг. 94. Вырубная матрица (а) и электрод-инструмент (б).

форму) было затрачено около 200 час. Сама электроискровая обработка всех четырех форм заняла всего 50 час.

Ряд приводимых ниже иллюстраций представляет изделия, изготовленные на электроискровом прошивочном станке Electra CCM.

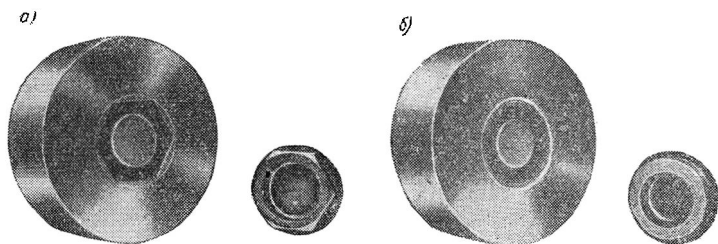
На фиг. 94 слева показана вырубная матрица из закаленной углеродистой стали ($H_{RC} = 67$), справа — электрод-инструмент, при помощи которого выполнялась обработка. Толщина матрицы 10 мм, площадь сечения электрода 800 мм². Черновая обработка матрицы длилась 22 часа, а окончательная отделка — 2 часа. Точность обработки $\pm 0,01$ мм.

Две половинки матрицы (фиг. 95) из закаленной стали ($H_{RC} = 50$), диаметром 35 мм, обрабатывались соответственно 2 часа 30 мин. (верхняя) и 2 часа (нижняя).

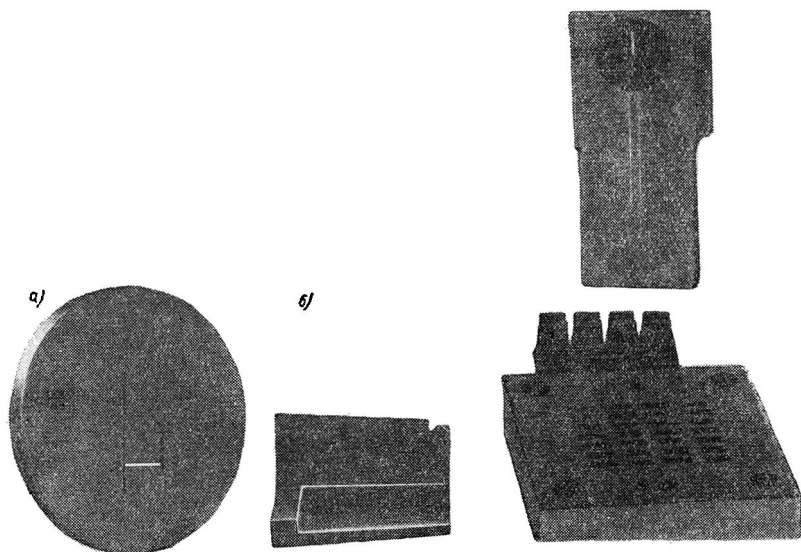
Волючильная матрица для протягивания алюминиевых профилей (фиг. 96), изготовленная из закаленной стали ($H_{RC} = 47$), обрабатывалась 2 часа 25 мин.

На фиг. 97 представлен вырубной штамп, изготовленный на станке Agietron [22] электроискровым способом. При механическом изготовлении мастер-инструментальщик тратил на него 60 час. На станке Agietron длительность изготовления составила 20 час., а последующая механическая доводка отняла еще 10 час.

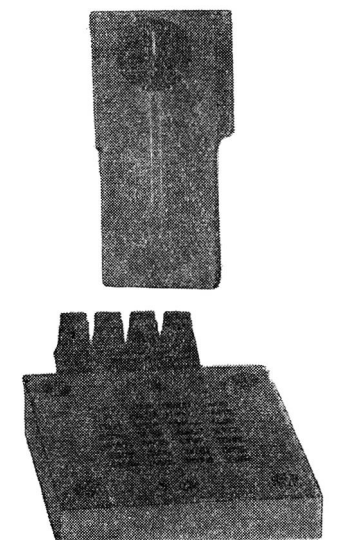
Зарплата при механическом изготовлении составила 600 франков (10 фр/час), а при электроискровом — 200 франков (5 фр/час.)



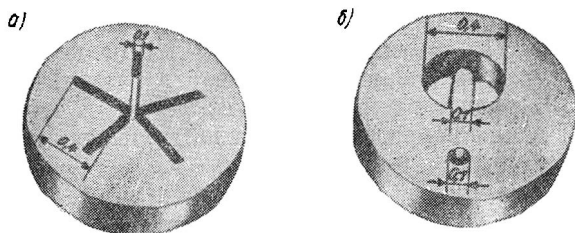
Фиг. 95. Составная матрица и электроды-инструменты:
а) верхняя половинка; б) нижняя половинка.



Фиг. 96. Волоочильная матрица (а) и электрод-инструмент (б).



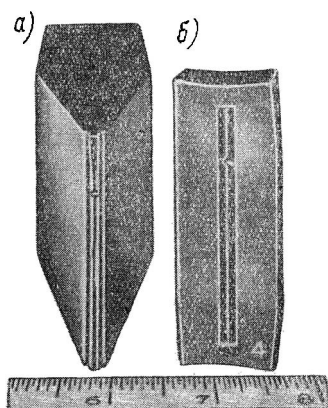
Фиг. 97. Вырубной штамп, изготовленный электроискровым способом.



Фиг. 98. Изготовление тонких прорезей (а) и отверстий (б) электроискровым способом.

с учетом возможности многостаночного обслуживания электроискровых станков. Стоимость материала штампа при механическом изготовлении (стали) составила 85 франков. Стоимость твердого сплава при электроискровом изготовлении — 400 франков. Стоимость стального штампа ограничилась штамповкой 80 000 пластин, стоимость твердосплавного — 1 200 000 пластин.

Ниже приводится несколько примеров обработки деталей на станке Agitron 103/1K мощностью 250 вт.



Фиг. 99. Штамп для иглонок (б) и электрод-инструмент (а).

На фиг. 98, а представлена деталь из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм, с выполненными в ней при помощи электродов из латунной фольги пятью прорезями. Каждая прорезь обрабатывалась отдельно. Суммарная длительность обработки — 10 мин.

Другой пример обработки детали толщиной 0,5 мм из стали У2А представлена на фиг. 98, б.

Отверстие диаметром 0,4 мм с перемычкой 0,1 мм выполнялось в течение 3 мин. при помощи электрода, изготовленного из латунной трубки.

Отверстие диаметром 0,1 мм прошивалось вольфрамовым электродом в течение 1 мин.

Длительность прошивки одного отверстия диаметром 0,2 мм в стенке носика распылителя, толщиной 1 мм, латунным круглым электродом составила на станке Agitron UFF 103/1K 2 мин.

Изготовление стального штампа для иглонок с помощью двух сменных медных электродов (фиг. 99) потребовало 1,5 часа, а изготовление штампа из твердого сплава — 2 часа.

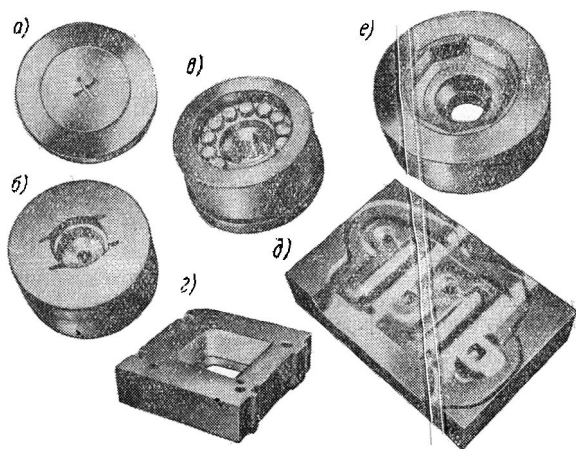
Примеры выполнения прошивочных работ в закаленной стали при помощи электроискрового станка Eleroda D-1 [25] представлены на фиг. 100. Характеристики обработки сведены в табл. 35.

На фиг. 101 представлены образцы матриц сложных конфигураций, выполненных при помощи прошивочного станка Sparcatron Mark III. Как видно из иллюстраций, объектами электроискровой обработки являются преимущественно матрицы штампов сложной конфигурации и волоочильный инструмент из твердых сплавов.

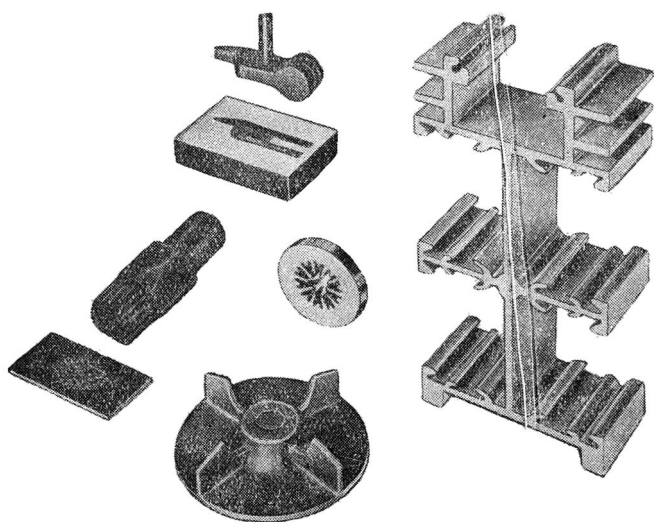
На фиг. 102 представлены образцы деталей из твердых сплавов с прошитыми в них полостями и показаны электроды, при помощи которых производилась прошивка.

На фиг. 103, 104 и 105 показаны различные стальные и твердосплавные детали штампов, обработанные электроискровым способом на станках ND-5 в Японской промышленности [108].

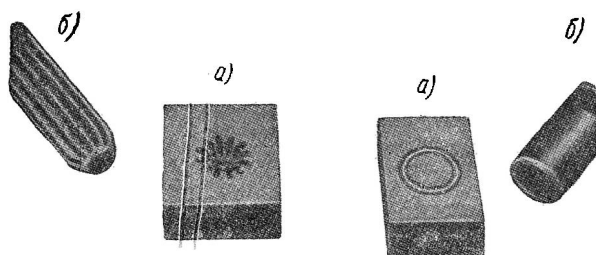
На фиг. 103 изображен штамп для статорного железа. Электрод сложной формы может быть легко составлен из отдельных сегментов сложной конфигурации.



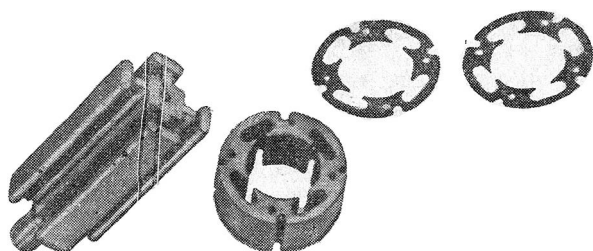
Фиг. 100. Детали из закаленной стали, обработанные электроискровым способом на станке Elegoda D1.



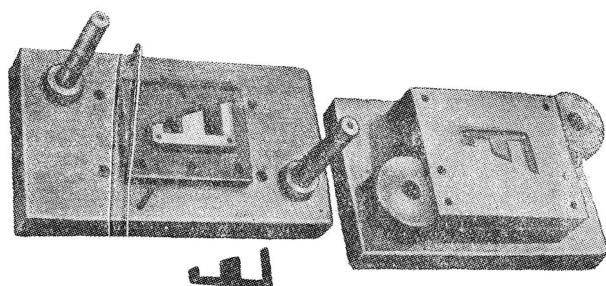
Фиг. 101. Образцы матриц сложной конфигурации, изготовленных искровым способом с электродами для них, и образцы изделий, обработанных в этих матрицах.



Фиг. 102. Твердосплавные матрицы, изготовленные электроискровым способом на станке Sparcatron (а), и латунные электроды для их изготовления (б).



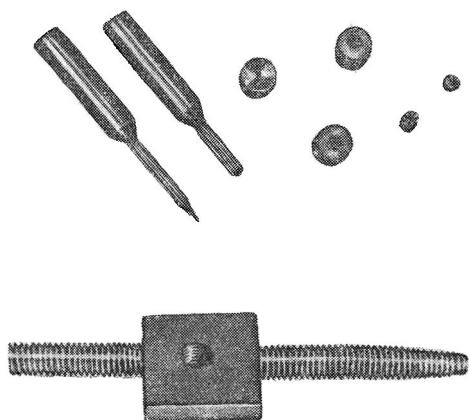
Фиг. 103. Штамп для статорного железа.



Фиг. 104. Использование пуансонов в качестве инструмента при обработке матрицы.

Пример использования пуансона в качестве электрода-инструмента при электроискровой обработке матрицы приведен на фиг. 104.

При изготовлении внутренней резьбы в твердосплавной детали (фиг. 105) в качестве инструмента-электрода применяется вращающийся винт.



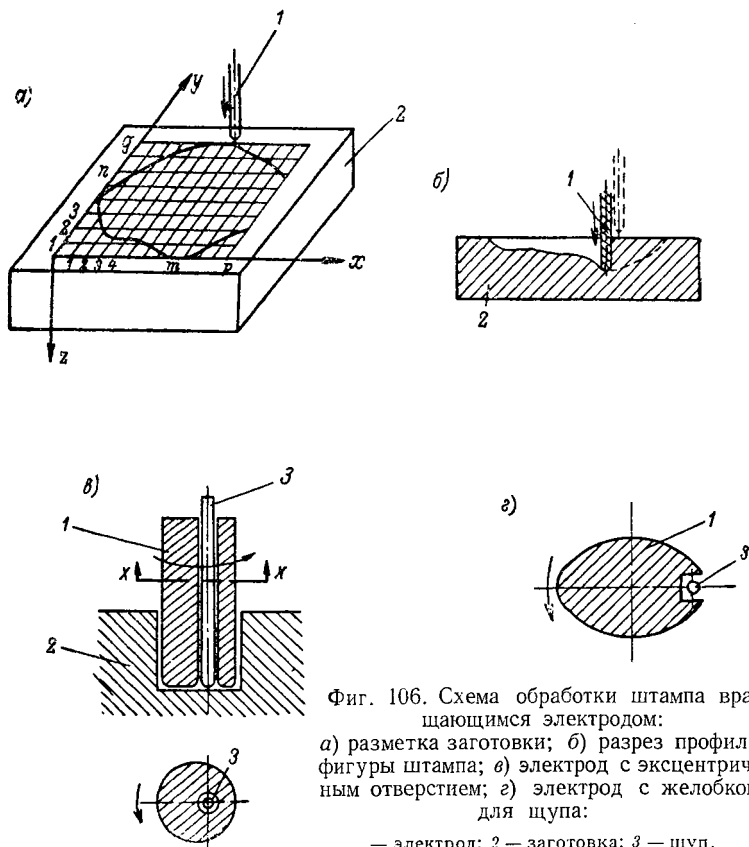
Фиг. 105. Изготовление внутренней резьбы в твердосплавной детали.

Таблица 35

Характеристика электроискровой обработки деталей штампов и прессформ

Обозначение на фиг. 100	Наименование детали	Материал	Чистота поверхности в мк (средн. квадр.)	Точность в мм	Длительность обработки в час
<i>a</i>	Вырубная матрица	Закаленная сталь $H_{RC} = 60$	1,0	$\pm 0,01$	8
<i>б</i>	Высадочная матрица	Закаленная сталь $H_{RC} = 60$	0,35	$\pm 0,01$	7
<i>в</i>	Высадочная матрица 140×70 мм	Закаленная сталь $H_{RC} = 60$	1,0	—	12
<i>г</i>	Вырубная матрица $45 \times 46 \times 28$ мм	Закаленная сталь $H_{RC} = 60$	0,5	$\pm 0,01$	15
<i>д</i>	Прессформа (матрица $\varnothing 110$ мм)	Закаленная сталь $H_{RC} = 60$	1,0	—	41
<i>е</i>	Высадочная матрица	Закаленная сталь $H_{RC} = 60$	2,0	—	16

Обработка вращающимся электродом. Значительный интерес представляет опубликованное в Японской печати [84] сообщение о разработанном в Токийском Университете методе электроискровой обработки полостей и отверстий при помощи вращающегося электрода.



Фиг. 106. Схема обработки штампа вращающимся электродом:
 а) разметка заготовки; б) разрез профиля фигуры штампа; в) электрод с эксцентричным отверстием; г) электрод с желобком для шупа:

— электрод; 2 — заготовка; 3 — шуп.

По этому способу изготовляют штампы, пользуясь стержневым электродом и действуя им как концевой фрезой (фиг. 106, а). Заготовку делят на большое количество мелких секций по направлениям X и Y и в каждой из этих секций электрод двигают перпендикулярно площади заготовки (по направлению оси), т. е. производят искровую обработку полости. Затем обработку в каждой секции контура (фиг. 106, б) доводят до требуемой глубины.

Если размер секций и диаметр электрода выбраны достаточно малыми, то представляется возможным вырезать тонкий узор с большой точностью. Этот метод обработки осложняется износом электрода, поэтому величина подачи электрода не совпадает с требуемой глубиной обрабатываемого отверстия. Следовательно, для

получения требуемой точности необходимо измерять глубину внедрения электрода-инструмента в деталь. Проще всего было бы поднимать электрод-инструмент через определенные короткие промежутки времени и вводить линейку или глубиномер для измерения, но это чрезвычайно непроизводительно, так как вызывает длительные перерывы обработки. Можно также определить глубину обработанного отверстия косвенным путем: например, использовать ультразвуковые волны для измерения толщины дна с задней стороны обрабатываемой заготовки. Однако такое устройство является дорогим и в производственных условиях в настоящий момент применения не получило. На фиг. 106, в показан электрод, имеющий эксцентричное отверстие. Этот электрод в процессе обработки вращается. В эксцентричное отверстие можно вставить линейку (или шуп) и произвести непосредственное измерение глубины обработки. Подобный электрод может быть не только круглым, но и овальным, прямоугольным, квадратным, или с многогранными плоскостями. Соответственно и эксцентричное отверстие может быть не только круглым, но и любой другой формы. В ряде случаев в практике на боковой поверхности электрода прорезается желобок и в него вставляется шуп, как это показано на фиг. 106, г.

Основным элементом новизны в описываемом методе искровой прошивки является непосредственное измерение глубины обработки шупом. Так как шуп во время обработки соприкасается и с обрабатываемым изделием, и с электродом, то для того, чтобы не получилось короткого замыкания, он должен быть изолирован от электрода. Кроме того, так как отверстие для введения шупа в электрод просверлено эксцентрично, а электрод вращается, то боковые стороны и кончик шупа подвергаются постоянному механическому износу (от трения). Вследствие этого шуп должен быть изготовлен из износостойкого материала. Кроме того, необходимо, чтобы шуп не был хрупким, не менял своих свойств при взрывном давлении в момент разряда, от воздействия высокой температуры и от нагрузки электромагнитного характера.

Материал шупа должен удовлетворять следующим требованиям: шуп должен обладать большой механической прочностью, быть стойким к высокой температуре и иметь изоляционные свойства.

В настоящее время из обычно применяемых изоляционных материалов нет ни одного, который полностью удовлетворял бы всем вышеуказанным требованиям, поэтому шуп выполняется составным из двух или трех слоев. Механическую прочность шупу придает центральный металлический стержень, который изолируется от тела электрода-инструмента. В зависимости от обстоятельств снаружи дополнительно надевается предохранительная трубка.

Шуп не должен иметь слишком большого внешнего диаметра (не более 3 мм). Если бы можно было увеличить внешний диаметр, то все вышеуказанные требования было бы сравнительно легко удовлетворить, а уменьшение его ниже 3 мм влечет за собой большие затруднения. Так как конец металлического стержня непрерывно трется о твердую, с большими неровностями поверхность

обрабатываемого изделия, то материал шупа должен быть гораздо тверже, чем обработанный материал. Например, если объектом является штамповая сталь, то для шупа используется закаленная рояльная струна. Увеличение диаметра стержня уменьшает износ от трения, но при установленном внешнем диаметре всего тела изоляционный слой становится тоньше и его электрическая прочность снижается. Вследствие этого диаметр стержня стремятся сделать меньше 2 мм. В качестве изоляции испытывались бумажная лента, различные пластические массы, фарфоровая трубка, слюда, искусственная слюда и т. п.

Выбор изоляционного материала производился на основании опытов. Внешняя защитная трубка должна быть притерта к внутренним стенкам отверстия в электроде-инструменте. Она служит только для защиты внешней стороны шупа от износа, поэтому трубка может быть металлической, причем ее толщина особого значения не имеет. Авторы данной работы при изготовлении опытного шупа изготовили стержень толщиной 0,2—0,3 мм, поверх которого накладывалась изоляция. Наружная трубка из нержавеющей стали имела вначале внешний диаметр 3,2 мм, а затем обрабатывалась до диаметра 2,7—2,9 мм.

Для создания надежной конструкции шупа авторы провели большие опыты с различными изоляционными материалами. В качестве изоляционных материалов применялись эпон в растворимой форме, лента тефлон, тесьма, слюда, смолы, фарфоровые трубки и микалекс.

Опыты проводились при следующих условиях: напряжение 160 в, ток 5—8 а, емкость 200 мкф, скорость вращения электрода-инструмента составляла 350 об/мин.

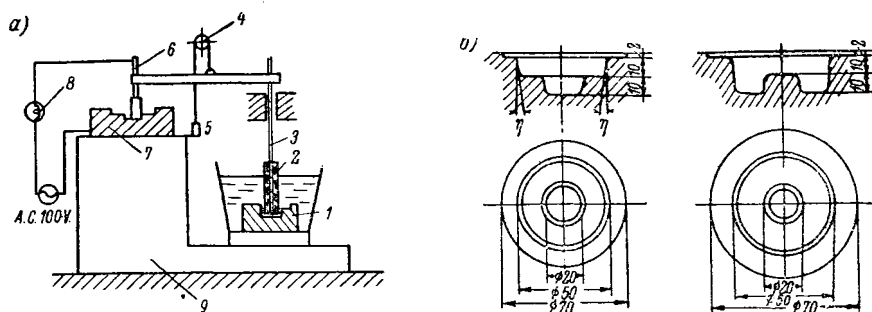
Использованный при проведении опытов электрод-инструмент изготовлен из латуни диаметром 10 мм. В электроде эксцентрично просверлено отверстие диаметром 3,0—3,5 мм. Опыты показали, что при таких сравнительно непрочных материалах, как фарфоровая трубка, слюда, микалекс, происходит механическое повреждение их силой взрыва во время разряда. При этом центральный стержень приходит в соприкосновение с защитной трубкой или с электродом и искровая обработка прекращается из-за короткого замыкания. Использование изоляционных пластмасс эпон, тефлон и др. также не дает результатов, потому что такие материалы при высокой температуре во время разряда размягчаются, обугливаются и разрушаются вследствие динамических воздействий разряда.

Сравнивая все испытанные виды изоляционных материалов, видим, что до сих пор не удалось найти совершенной изоляции для шупа, но в настоящее время закаленная рояльная струна, изолированная при помощи эпона, может быть успешно использована в качестве шупа.

Учитывая современную скорость электроискровой обработки, нет необходимости непрерывно прижимать шуп к обрабатываемой поверхности, так как нет надобности непрерывно измерять глубину обработки. Поэтому авторы приняли метод опускания шупа через

определенные промежутки времени. Благодаря этому долговечность службы шупа значительно увеличилась и стала приемлемой.

Для проверки возможности электроискровой прошивки по новому способу, прежде чем перейти к автоматической подаче, был проделан ряд опытов прошивки с ручной подачей. На фиг. 107, а поясняется принципиальная схема этого опыта. В детали 1 необходимо было вырезать отверстие такой же формы, как и на шаблоне 7. Когда глубина обрабатываемого отверстия доходит до соответствующей глубины шаблона, упор 6,двигающийся вместе со шупом,



Фиг. 107. Схема искровой обработки матрицы вращающимся электродом по методу копирования:

а) 1 — обрабатываемая деталь; 2 — электрод; 3 — шуп; 4 — блок; 5 — противовес; 6 — упор; 7 — шаблон; 8 — электролампочка; 9 — стол; б) детали, обработанные вращающимся электродом.

соприкасается с шаблоном. При этом замыкается цепь электролампочки 8, которая загорается. Световой сигнал указывает на то, что обрабатываемое отверстие достигло заданной глубины и поэтому можно, подняв вверх электрод 2, шуп 3 и упор 6, передвинуть стол на небольшое расстояние и приступить к обработке следующего участка.

Так как стол может передвигаться в двух взаимноперпендикулярных направлениях, то возможна обработка фасонных отверстий и полостей. В действительности форма отверстия шаблона, по которому производилась обработка, имела вид, показанный на фиг. 107, б. Условия обработки были следующие: напряжение источника питания 160 в, емкость $C = 200$ мкф, сопротивление $R = 3$ ом, индуктивность $L = 0,14$ гн, рабочий ток 10 а. На обработку было затрачено около 19 час. Отклонения размеров в готовом изделии от заданных составляли 2 мм.

Недостаточно хороший результат объясняется, главным образом, отсутствием жесткого закрепления шаблона. Так как этот опыт производился только для того, чтобы показать возможность данного способа, то можно считать цель опыта вполне достигнутой, так как, хотя точность обработки и не удовлетворяет требованиям, эти эксперименты подтвердили принципиальную возможность обработки вращающимся электродом со вставкой.

2. Извлечение обломков инструмента

Одной из специфических операций, по характеру близко примыкающей к операциям прошивания, долбления и сверления, является электроискровое извлечение обломков инструмента или крепежа, застрявших в изготавливаемых либо ремонтируемых деталях. Эта несложная и недорогая операция дает зачастую большой экономический эффект, сохраняя деталь, которая должна была быть забракована [72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 82 и др.].

Во втором разделе были приведены описания некоторых конструкций станков и приспособлений, применяемых для этой цели.

Наиболее распространены в настоящее время за рубежом приспособления и станки, выпускаемые фирмой Elox (США) и ее представителем в Европе — фирмой Marbaix.

Значительная часть этих станков работает на низком напряжении, без конденсаторов, с нагнетанием воды или эмульсии через полый электрод и с принудительной вибрацией последнего.

Длительность операции невелика. Так например, на станке M-51 Elox удаление обломка метчика диаметром 6 мм длится 4 мин., сверла диаметром 5 мм — 6 мин.

На станке Tarmaster M-7 той же фирмы извлечение метчика диаметром 7,5 мм при длине обломка 19 мм длится (со вспомогательным временем) 4 мин. В одном из приведенных примеров [83] сообщается, что стоимость восстановления головки двигателя с подобным обломком метчика составляла всего 20 центов.

Для удаления обломков инструмента используется электрод, диаметр которого равен приблизительно половине диаметра сломанного инструмента. Головка устанавливается так, чтобы электрод отстоял приблизительно на 6 мм от обломка. Затем оператор подает головку вниз таким же образом, как при обычном сверлении. Возникает серия электрических разрядов и электрод врезается в сердцевину обломка. Охлаждающая жидкость (вода с добавкой жидкости фирмы Elox) нагнетается сквозь полый электрод и вымывает частички металла. При сквозном отверстии обломок извлекается, как только электрод прорежет его до конца. Если же отверстие глухое, то оператор вынимает сердечник при помощи магнита или щипцами. Когда сердечник вынут, оставшиеся крошки (перья) извлечь легко. При извлечении метчиков резьба отверстия не повреждается.

Производительность электроискрового станка фирмы Tarmaster M-7, мощностью 2 *кв*а, при извлечении обломков инструмента или прошивании отверстий в стали представлена в табл. 36.

Все установки для извлечения обломков инструмента могут использоваться и находят применение также для прошивания всевозможных отверстий в различных деталях (табл. 37).

Фирма указывает, что при обработке высокоуглеродистых и быстрорежущих сталей данные, приводимые в табл. 37, гарантируются и при нормальных условиях могут быть улучшены на 30—50%.

В табл. 38 приведены данные о скорости электроискрового прошивания при помощи низковольтных безконденсаторных станков фирмы Еюх [83].

Таблица 36

Производительность станка Tapmaster M-7 при извлечении обломков инструмента

Извлекаемый инструмент	Диаметр в мм	Глубина в мм	Продолжительность в сек.			Общая затрата времени в мин.
			уста- новки	сверле- ния	очистки	
Метчики:						
№ 8, 32 нитки на 1"	4,166	6	60	35	120	3,4
№ 10, 32 нитки на 1"	4,826	18	60	60	120	4,0
1/4", 20 ниток на 1"	6,350	18	60	72	120	4,3
1/2", 13 ниток на 1"	12,700	18	60	140	120	5,2
Сверла	5	25,4	60	90	120	4,5
	5	50,8	60	210	120	4,8
	5	76,2	60	360	120	9,0

Таблица 37

Производительность станка Tapmaster M-7 при прошивании отверстий

Толщина металла в мм	Диаметр электрода в мм							
	1,0	1,6	2,1	2,8	3	5	6,3	8
	Время в сек.							
6,3	20	27,5	12,5	15	15	22,5	30	54
12,7	52,5	42,5	35	30	37,5	42,5	78	120
18	97,5	77,5	62,5	60	72,5	90	140	210
25,4	140	115	92,5	75	90	120	200	300

Таблица 38

Производительность станка Еюх при прошивании отверстий

Толщина материала в мм	Диаметр электрода в мм							
	1	1,6	2,1	2,8	3,2	4,8	6,4	8
	Время в сек.							
6,4	40	35	25	30	30	45	60	108
12,7	105	85	70	60	75	85	156	240
19	195	155	125	120	145	180	280	420
25,5	280	230	185	150	180	240	400	600

3. Шлифование

Значительно меньший удельный вес среди операций электроискровой обработки занимает в зарубежной технологии электрическое шлифование твердых сплавов и сталей.

В некоторых случаях для этой цели используются обычные металлообрабатывающие станки (шлифовальные, токарные, заточные), к которым добавляется электрическая часть в виде соответствующего источника питания и регулирующих устройств.

В редких случаях для этих операций конструируются и изготавливаются специальные приспособления и устройства. Электродоминантным инструментом является в большинстве случаев сплошной металлический диск (медный, чугунный, латунный), реже специальные диски, несущие на металлической поверхности абразивные зерна.

Основными факторами, определяющими применение того или иного нового технологического метода в зарубежной технике, являются его экономическая эффективность и техническая целесообразность. В одном из редакционных обзоров журнала «The Machinist» (Англия) сообщается [35] о применении в промышленности США различных электрических способов обработки для целей шлифования (табл. 39).

Таблица 39

Возможное применение различных способов

Наименование операций	% расхода алмазного порошка	Шлифование алмазным кругом	Электролитический	Электроискровой	Электродуговой	Ультразвуковой
1. Заточка резцов	30	А	В	Д	С	Д
2. Шлифование стружколомов на резцах	20	А	В	В	С	В
3. Заточка фрез и протяжек	15	А	В	В	С	В
4. Шлифование снарядных сердечников	5	А	В	В	С	В
5. Обработка и отделка штампов	4	А	Е	А	Е	А
6. Фасонная обработка деталей турбин	—	В	В	В	С	В
7. Нарезка стволов орудий	—	В	С	В	С	В
8. Обработка и шлифование дисков компрессоров	—	В	В	В	С	В

А — применяется в промышленных масштабах.
В — применение возможно, хотя пока имеется очень мало экспериментальных данных.
С — применение сомнительно, хотя возможно дальнейшее развитие.
Е — в настоящей стадии развития неприменимо.
Д — неприменимо для ручного шлифования, но возможно будет иметь применение при шлифовании на станке.

Авторы обзора отмечают, что дефицитность алмазного порошка заставила искать новых способов обработки важнейших деталей для оборонной продукции. Приведенные в табл. 39 восемь важнейших операций по заточке инструмента и шлифованию спецдеталей потребляют 74% всего расходуемого в США алмазного порошка. Табл. 39 показывает, какие операции можно перевести на обработку новыми способами.

Заточка резцов. Заточка резцов из твердого сплава, укрепленных на стальных державках, производится по методу плоского шлифования алмазным кругом. На эти операции расходуется около 30% всего потребляемого в США алмазного порошка.

Шлифование стальной державки производится отдельно кругом из окиси алюминия.

Авторы считают, что в области заточки однолезвийного инструмента большое будущее принадлежит электролитическому способу или сочетанию этого способа с абразивным. Для таких операций легко приспособить обыкновенный заточной или шлифовальный станок, работающий алмазным кругом с металлической связкой, снабдив его таким вспомогательным оборудованием, как выпрямитель и насос для электролита. Авторам известно, что восемь моделей обыкновенных шлифовальных станков приспособлены для электролитического шлифования; на этих станках проводятся испытания по заточке резцов комбинированным способом с применением алмазного круга и использованием электролита. При электролитическом способе шлифования легко достигаются качество (отсутствие трещин) и точность заточки. Возможности широкого применения и экономические факторы данной операции еще не определены.

Если заточка резцов не ограничивается плоским шлифованием вручную, имеется возможность применять электроискровой и ультразвуковой способы, как указано в табл. 40. Продолжительность операции при электроискровой обработке едва ли позволяет пользоваться ею для заточки резцов. Необходимое для этого оборудование очень дорого, а расходы по его эксплуатации зависят от скорости обработки и требуемого качества заточки.

Для обеспечения требуемой чистоты поверхности электроискровой способ слишком дорог.

Обработка ультразвуковым способом устраняет возможность появления трещин или повреждений и удовлетворяет требованиям к чистоте поверхности резцов. Недостаточно ясен еще вопрос об остроте кромок, заточенных ультразвуковым способом.

Электродуговой процесс испытывался, главным образом, для отрезки: он дает слишком шероховатую поверхность и поэтому не может считаться приемлемым для заточки. Тем не менее запланировано проведение экспериментальных работ по комбинированной электродуговой и электролитической обработке.

Шлифование стружколомов. Шлифование стружколомов поглощает около 20% всего расходуемого алмазного порошка. Обычно шлифование стружколомов производится алмазным кругом на станках. Требуемая форма придается стружколомам до шлифова-

ния, поэтому шлифование производится на небольшую глубину. В отношении стружколомов действуют те же технические условия, что и для резцов, а именно: кромки должны быть острыми, при увеличении в 200 раз не должно быть заметно трещин, а чистота поверхности должна быть $\nabla\nabla\nabla 7$ — $\nabla\nabla\nabla 8$ -го классов.

Из новых способов для обработки стружколомов особенно пригоден ультразвуковой. Обработка стружколома происходит таким же образом, как и заточка резцов. Стружколомы специальной формы обрабатываются ультразвуковым способом без больших затрат. Острые кромки должны быть проверены.

Шлифование стружколомов электролитическим и электроискровым способами вполне применимо. Электролитический способ обеспечивает соответствующее качество отделки, шлифование электролитическим способом производится на обыкновенных шлифовальных станках с некоторыми приспособлениями. Имеются станки, переоборудованные для выполнения комбинированного шлифования электролитическим способом и с помощью алмазного круга.

Обработка стружколомов электроискровым способом не рациональна, так как время заточки велико.

Электродуговой способ нельзя применить для шлифования стружколомов, так как качество обработанной поверхности довольно низко.

Заточка фрез и протяжек. Фрезы и протяжки с твердосплавными зубьями представляют собой как бы несколько однолезвийных резцов, установленных в одном корпусе. Обычно каждый зуб фрезы или протяжки затачивается отдельно алмазным шлифовальным кругом при специальной наладке станка. На заточку фрез и протяжек расходуется около 15% всего алмазного порошка.

Заточенные фрезы и протяжки должны отвечать таким же требованиям, что и заточенные резцы, т. е. на них не должно быть видимых трещин при увеличении в 200 раз, режущие кромки должны быть острыми, а чистота поверхности должна быть выше, чем у резцов.

Ввиду того что заточка фрез производится на станках с алмазным кругом, она обходится дороже, чем заточка резцов.

Из табл. 39 можно видеть, что в данном случае применимы электролитический, электроискровой и ультразвуковой способы, однако это требует еще проверки и создания соответствующих станков. Возможность применения электродугового способа сомнительна. Выводы, сделанные в отношении использования новых способов заточки резцов приемлемы при разработке операций по заточке фрез и протяжек.

Шлифование сердечников снарядов. Сердечники снарядов изготовляются из твердых сплавов и весят от 1,8 до 5,4 кг. Шлифованию подвергается плоское основание и оживальная часть. В противоположность заточке в этом случае шлифуется большая площадь, а именно от 12,9 до 64,5 см². На эти операции расходуется около 5% всего алмазного порошка.

Все новые способы (за исключением электродугового) могут быть применимы для шлифования сердечников, но до сих пор не было проведено достаточно углубленной исследовательской работы в этом отношении. Если твердосплавные сердечники будут выпускаться в значительно больших количествах, необходимо будет провести соответствующие испытания.

Обработка и отделка штампов. Обработка твердосплавных вольфрамовых досок, а также вырубных и дыропробивных штампов поглощает около 4% всего расходуемого в США алмазного порошка.

В табл. 39 указано, что помимо шлифования алмазным кругом для этих работ может широко использоваться электроискровой и ультразвуковой способы. Имеются станки для электроискровой обработки и отделки штампов. Такое оборудование стоит довольно дорого, а стоимость работы на нем зависит от скорости обработки и требуемого качества поверхности. По ультразвуковому способу работает также ряд станков. Этот способ устраняет возможность растрескивания или повреждения готовых штампов. Для всех операций, кроме окончательной доводки, применяются ультразвуковой и электроискровой способы, которые более многосторонни, чем шлифование алмазным кругом. Эти процессы являются также выгодными с экономической точки зрения. Для производства фасонных отверстий они более удобны, нежели шлифование алмазным кругом.

Применение электролитического и электродугового способов более ограничено, так как они непригодны для фасонной обработки и отделки штампов.

Обработка деталей турбинных лопаток. Турбинные лопатки обычно изготавливаются из твердых сплавов; они имеют сложную форму, а обрабатываемая площадь их достигает $12,9 \text{ см}^2$. Резание производится на глубину от 1,27 до 12,7 мм. При высокой чистоте поверхности форма детали должна быть изготовлена с точностью до 0,007 мм.

В настоящее время детали из сплавов подвергаются шлифованию кругами из окиси алюминия.

Другого способа обработки твердосплавных деталей в условиях массового производства в настоящее время нет. Алмазное фасонное шлифование слишком длительно и дорого. Если в месяц требуются сотни тысяч турбинных лопаток, то на каждую из них можно затрачивать не более нескольких минут.

Часть операций по обработке этих деталей можно выполнить электроискровым, ультразвуковым и электролитическим способами. Что же касается электродугового способа, то он не может обеспечить требуемого качества отделки и установленных допусков.

Нарезка в канале ствола пушки. В случае увеличения выпуска орудий потребуются ускоренные и более совершенные способы их обработки и шлифования. Новые процессы могут найти себе применение при нарезке каналов стволов, изготовленных из трудно обрабатываемых материалов.

Табл. 40 показывает, что для этого могут быть использованы электроискровой и ультразвуковой способы, тогда как электролитический и электродуговой вряд ли окажутся применимыми.

Обработка и шлифование дисков турбо-компрессоров. Изготовление дисков компрессоров повышенной прочности связано с большими трудностями при механической обработке и шлифовании таких сплавов обычными способами.

Шлифование алмазным кругом стоит слишком дорого и обладает недостаточной производительностью. Новые способы, за исключением электродугового, могли бы применяться для этих работ; особенно подходящим авторам представляется электролитический способ.

В заключение авторы обзора указывают, что многие из новых процессов и их комбинаций имеют большое будущее, однако способы их применения и экономичность еще не определены с достаточной точностью.

Электроискровое и электролитическое шлифование. Несмотря на то, что выводы, сделанные выше, были опубликованы несколько лет тому назад, существенного развития многие из перечисленных в табл. 40 способов не получили до сего времени. Вместе с тем электроискровая обработка в нескольких разновидностях распространилась за последние годы относительно широко.

В Англии [17] электроискровое шлифование осуществлено фирмой Sparcatron. Для этой цели использован обычный круглошлифовальный станок, бабка которого изолирована от станины, а рабочее напряжение подводится через контактные кольца к электроду (металлическому диску) и шлифуемой детали.

Непосредственно металлического контакта в процессе обработки между диском и деталью нет. Струя жидкого диэлектрика подается в зону обработки. Режимы обработки изменяются ступенями, соответственно меняя производительность и чистоту обработанной поверхности.

При электроискровом шлифовании на станке Sparcatron [17] детали длиной 121 мм и диаметром 19 мм интенсивность съема металла составляет около 0,038 мм³/мин.

При напряжении 22 в для черновой обработки требуется сила тока около 15 а, а для чистовой — 3 а.

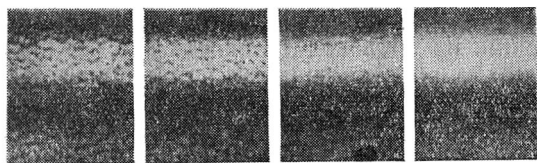
На фиг. 108 представлен образец, по длине которого проведена обработка на четырех различных режимах.

На заводах фирмы Pratt & Whitney Aircraft (США) были проведены опыты электроискрового профильного шлифования и заточки фасонного твердосплавного инструмента [38].

Для профилирования твердосплавного инструмента использовался вращающийся латунный электрод с профилем по окружности, обратным обрабатываемому резцу.

Обработка выполнялась на обычном заточном станке Brown & Sharpe, к которому был подключен в качестве источника питания пульт Elox. Обработка производилась в среде жидкого диэлектрика. Число оборотов диска могло изменяться от 50 до 500 об/мин.

Подача стола осуществлялась специальным серводвигателем, поддерживающим зазор 0,0035—0,0050 мм. Для доводки поверхности до $H_{ск} = 1,5$ мк с поверхности снимается 55—60 мм³/мин твердого сплава. Величины радиусов при электроискровой заточке в данных условиях составляют 0,025—0,050 мм. Заусенцы и трещины, обычно сопутствующие механической заточке, в данном случае отсутствовали. Профилирование производилось в два прохода — на черновом и чистовом режимах.



Фиг. 108. Стальной валик с участками, обработанными электроискровым способом на различных режимах.

По принципу осуществления к электроискровым способам обработки тесно примыкает так называемое электролитическое шлифование (или низковольтная электрическая заточка), получившее применение в промышленности США.

В описании технологии этого способа отмечается, что к числу преимуществ электрического шлифования относится в первую очередь значительно меньший расход алмаза. В отдельных случаях экономия алмаза составляла от 63 до 93%, в среднем около 75% для рабочих скоростей, равных или не превышающих скорости при обычном шлифовании. Достоинством электрического шлифования является более редкая правка и заточка кругов. Правка кругов на металлической связке при помощи карандаша или при помощи обратного тока требуется очень редко, вследствие чего, из-за низкого износа, круги на металлической связке долго сохраняют свою форму.

Этот процесс обеспечивает получение более высокой чистоты поверхности инструмента.

Режущая способность твердосплавного инструмента после электрической заточки не отличается от производительности инструмента, заточенного обычным способом.

К числу достоинств способа относится и его экономическая эффективность. Так например, указывается, что стоимость алмазного круга при обычном шлифовании стружколомателей составляла 107,87 долларов на 15,6 см³ снятого твердого сплава. При электрическом шлифовании алмазным кругом с металлической связкой с тем же количеством твердого сплава обошелся лишь в 68 центов. Полная стоимость шлифования, включая стоимость электролита (без заработной платы), составляет 76 центов.

Этот способ имеет ряд недостатков. Электрическая заточка требует переоборудования стандартного абразивного заточного станка

и приобретения источника питания. Стоимость переоборудования станка превышает стоимость соответствующего заточного абразивного шлифовального станка. Учитывая стоимость алмазных кругов и необходимость постоянно затачивать инструменты из твердого сплава, эти капитальные затраты нельзя считать значительными.

Электролитическая заточка требует в 1,5 раза большей мощности, чем обычное шлифование на тех же станках.

При электролитической заточке может получаться неравномерная чистота поверхности, например, одна часть данной поверхности может быть более матовой, чем другая. Однако это не оказывает никакого влияния на производительность работы инструмента.

Разбрызгивание рабочей жидкости при шлифовании затрудняет эксплуатацию станка.

Представляют интерес данные производственного опыта из практики предприятий Детройта, где заточка твердосплавного инструмента производилась на станке Buga-Way электрическим и абразивным способами (табл. 40).

Таблица 40

Сравнительные данные двух способов заточки

Показатели	Способ заточки	
	электролитический	абразивный
Число заточенных инструментов	82	36
Линейный износ круга на 1 шт. инструмента в <i>мк</i>	0,1	4,25
Время шлифования одного инструмента в мин. . .	4—5	4—5
Средний съем твердого сплава на длину в <i>мк</i> . .	575	475
Количество испытанного инструмента в шт. . . .	48	26
Чистота поверхности инструмента $H_{ск}$ в <i>мк</i> :		
плоская поверхность	0,1—0,15	0,12—0,22
фасонная поверхность	0,25—0,35	0,35—0,40

Условия испытания заточенного инструмента: обдирочное точение, глубина резания 3 мм; обрабатываемый материал — никелевая сталь. Критерием стойкости инструмента была способность его не терять формы и сохранить удовлетворительную чистоту поверхности обрабатываемой детали.

Сравнивая расход алмаза при обычной абразивной заточке кругами на керамической связке и при электрической заточке кругами на металлической связке можно видеть, что расход алмаза при электрическом способе заточки ниже на 75% (скорость заточки одинакова). Стойкости инструментов, заточенных этими способами, одинаковы.

В другой серии опытов заточной станок был переоборудован таким образом, что заточка велась вручную с электролитом и без

него. Это было осуществлено установкой дополнительного стола на основной стол станка с тем, чтобы поднять уровень инструмента до нормального положения, при котором ведут заточку.

Учитывая разницу в концентрации алмаза в обоих кругах, можно сказать, что при электрическом способе заточки потребовалась только $\frac{1}{2}$ часть количества алмаза, расходуемого для работы обычным способом, причем заточка велась примерно при одинаковых скоростях (табл. 41).

Таблица 41

Износ круга в зависимости от способов заточки

Способ заточки	Количество заточенного инструмента в шт.	Число типов заточенного инструмента	Общее время в мин.	Общий износ круга в мм
Абразивный	307	15	318	7,5
Электрический	307	15	309	1,25

Дальнейшие опыты производились на другом предприятии на ручном заточном абразивном станке, переоборудованном для электрической заточки. Была произведена заточка 100 шт. мелкого твердосплавного инструмента одинакового размера (табл. 42).

Таблица 42

Время заточки инструмента двумя способами

Способ заточки	Концентрация алмаза в круге	Износ круга на 100 шт. инструмента в мм	Общее время заточки на 100 шт. инструмента в мин.
Абразивный	50	10	130
Электрический	100	2	140

Принимая во внимание разницу в концентрации алмаза, для работы электролитическим способом потребовалось немногим больше $\frac{1}{3}$ количества алмаза, потребляемого при заточке абразивным способом, но производительность оказалась примерно на 8% ниже.

Опыты заточки стружколомателей на заводах Форда показали, что электрический способ вдвое производительнее, чем абразивный.

Быстрорежущие инструментальные стали шлифуются электрически с большей производительностью, чем твердые сплавы, причем чистота поверхности соответствует электрополировке.

Электроискровое шлифование на станках Еlox. Электроискровое шлифование производится некоторыми предприятиями США при помощи станков Еlox универсального назначения.

Заточка резцов. Резцы со стандартной пластиной твердого сплава размером $12,7 \times 25,4$ мм с радиусом закругления 3,2 мм

обрабатываются с допуском 0,005 мм. Такие резцы применяются при всевозможных токарных работах.

При ручной заточке затрачивается 5,5 мин., а при электроискровой обработке на станке Еlox 3,5 мин., на снятие слоя в 0,25 мм и увеличение радиуса с 0,8 до 3,2 мм.

Стойкость резцов, заточенных на станке Еlox, на 300% выше, чем стойкость их после абразивной заточки, так как отсутствуют зазубренные кромки, трещины и риски, неминуемые при абразивной заточке. Кромки резца получаются острыми. Таким образом, преимущество электроискровой заточки резцов на станках Еlox заключается в следующем:

- а) большой срок жизни инструмента;
- б) отсутствуют температурные трещины;
- в) автоматически выдерживается высокая точность;
- г) отсутствуют заусенцы и пятна на режущей кромке;
- д) отсутствуют риски от заточки;
- е) мельчайшие углубления по всей поверхности обеспечивают лучшую смазку, лучшее удаление стружки, меньшее трение, следовательно, меньший нагрев при работе;
- ж) один человек может обслуживать два станка, что уменьшает затраты рабочего времени.

Шлифование V-образных канавок. В 24 образцах для испытания ударной вязкости шлифуются канавки. Половина образцов была закалена. Из каждой группы по 6 образцов были обработаны твердосплавными фрезами, в остальных — канавки прошлифованы латунным диском на станке Еlox.

Было установлено, что электрический способ обработки обеспечивает большую точность, чем фрезерная обработка, и лучшую чистоту поверхности. Электроискровое шлифование происходит в 3,5 раза быстрее (для закаленных образцов), причем микроструктура и ударная вязкость не изменяются. Все образцы получаются однотипными, разброс размеров меньший, чем при механической обработке; качество поверхности более высокое, так как микронеровности имеют скругленную форму. Показатели ударной вязкости у образцов высокой и низкой твердости при электроискровой обработке выше, чем у фрезерованных.

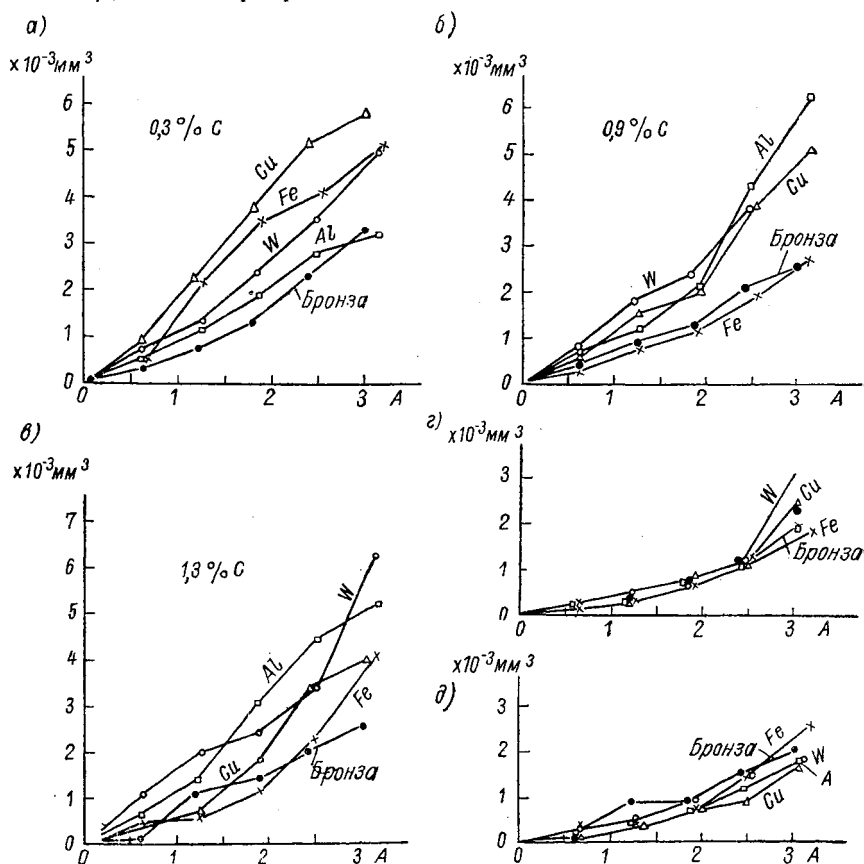
4. Материалы электродов-инструментов

Существенный интерес представляют данные о материалах, применяемых зарубежными предприятиями для изготовления электродов-инструментов, так как в большинстве случаев свойства и стоимость этих материалов определяют рациональность и экономичность применения того или иного способа.

По вполне объяснимым причинам объем этих сведений в ряду публикаций по вопросам электрообработки наименее обширен.

Одним из относительно полных материалов по этому вопросу является статья Blake [40], в которой сообщается о проведении исследований с электродами и обрабатываемыми деталями, изго-

товленными из различных материалов. Опыты проводились на станках мощностью 2 и 10 кВт, при глубине прошивания 2,5 мм, трубчатыми электродами диаметром от 9 до 12,7 мм; емкость 1700 мкф; частота разрядов 350 гц.

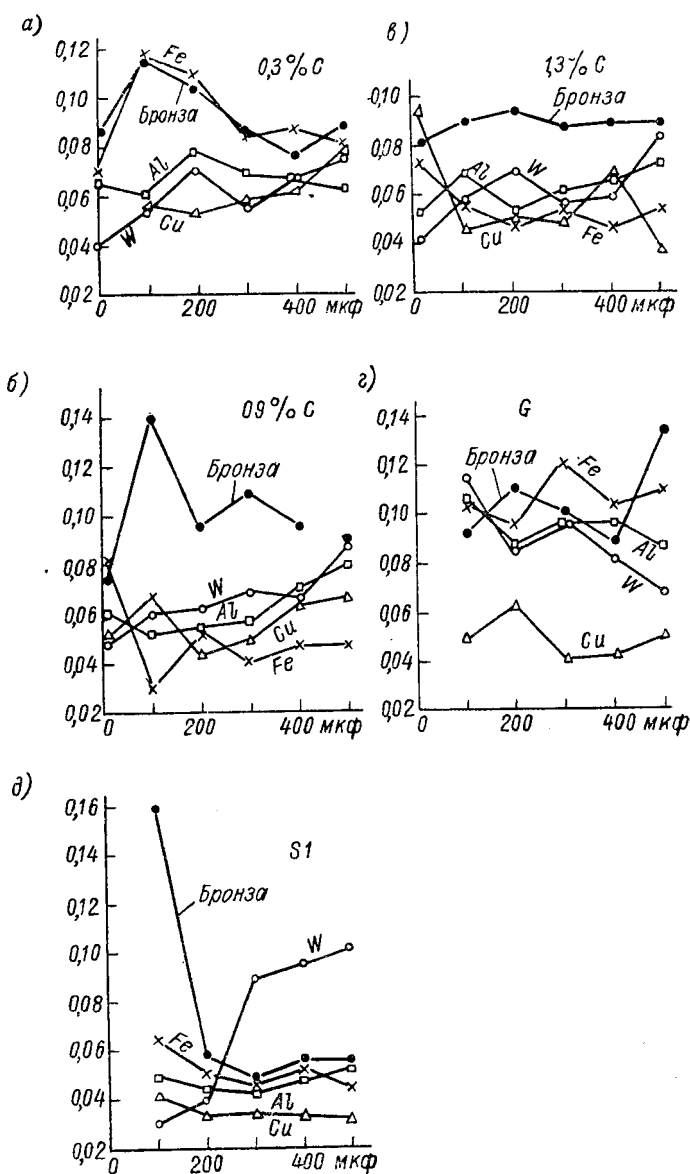


Фиг. 109. Объем лунки при различных сочетаниях материалов электрода и детали:

а) сталь с 0,3%С; б) сталь с 0,9%С; в) сталь с 1,3%С; г) твердый сплав G; д) твердый сплав S1.

В результате исследования были установлены съем металла в мкг/дж , скорость прошивания в $\text{см}^3/\text{мин}$ и относительный износ электрода-инструмента.

Установлено, что при 10 кВт была получена достаточно высокая производительность на различных материалах и что скорость прошивания возрастает с увеличением мощности, за исключением тех случаев, когда электрод-инструмент изготовлен из латуни, а детали — из вольфрамо-карбидного твердого сплава или вольфрама. В этих случаях съем металла почти не меняется при увеличении мощности от 6 до 10 кВт.



Фиг. 110. Отношение глубины лунки к диаметру при различных сочетаниях материалов электрода и детали:

а) сталь с 0,3% C; б) сталь с 0,5% C; в) сталь с 1,3% C; г) твердый сплав G; д) твердый сплав S1.

Установлено также, что сталь является непригодным материалом для электродов-инструментов, так как производительность обработки мала, а относительный износ велик. Вольфрам, наоборот, является хорошим электродом. К сожалению, широкого применения вольфрамовые электроды не нашли, так как они дороги и трудно поддаются обработке для придания им желаемой формы. Их можно применять (в виде проволоки), например, в качестве ленточной пилы. Материал нимоник может легко обрабатываться со скоростью $1,9 \text{ см}^3/\text{мин}$ латунным электродом. Например, отверстие диаметром 9 мм было просверлено вольфрамовым электродом в пластинке из нимоника толщиной 6 мм за 8 сек.

В различных электроискровых установках безконденсаторного типа для извлечения обломков инструмента и прошивания применяются в качестве материалов для электрода медь, латунь, молибден, эльконайт (сплав CuW).

Для обработки ковочных штампов фирма Elox создала новый материал для электродов под названием «эломет №1». Испытания на закаленной стали и на стали для ковочных штампов показали, что эломет № 1 имеет на 4% большую износостойкость, чем латунь. Для твердых сплавов эломет № 1 не рекомендуется.

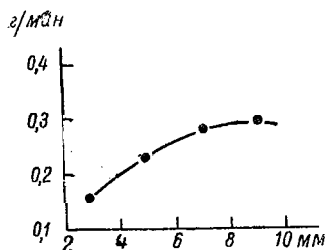
Новый материал рекомендуется для обработки матриц, ковочных штампов и т. д.; а в тех случаях, когда неизбежен большой расход электрода и его стоимость становится первостепенным фактором, эломет № 1 можно после использования переплавить и использовать снова.

Электроды из эломета № 1 могут быть изготовлены станочной обработкой, ковкой, литьем, штамповкой и протяжкой.

Влияние материала электрода на скорость искрового разрушения показано на графиках (фиг. 109), где представлена зависимость глубины лунки от энергии разряда. Скорость эрозии изменяется с изменением содержания углерода в стали. Для малоуглеродистых сталей применимы медные и железные электроды, для высокоуглеродистых сталей лучше применять алюминиевые и вольфрамовые.

Отношение глубины лунки к ее диаметру показано на фиг. 110; и здесь содержание углерода в стали оказывает влияние на результаты.

Медные и вольфрамовые электроды дают более плоские кратеры на образцах из малоуглеродистой стали, образуя более чистую поверхность. Для высокоуглеродистых сталей оказываются лучшими медные и железные электроды. Для обработки твердого



Фиг. 111. Влияние диаметра электродов на производительность. Электрод-латунь 40/60; емкость конденсатора — 50 мкф; ток постоянный — 100 в, 7 а; сопротивление 14 ом; изделие — мягкая сталь; диэлектрик — вода.

сплава G рекомендуются медные электроды, а для сплава SI — медные и алюминиевые.

Результаты исследования влияния площади электродов на производительность, проведенного в лаборатории Кигафуи [103], графически представлены на фиг. 111.

Опыты с многоэлектродными инструментами, проведенные в 1954 г., показали, что при схеме РС съем увеличивается в n раз (где n приблизительно равно числу электродов).

Следует отметить, что по сравнению с работами, относящимися к конструированию и изготовлению электроискровой аппаратуры и приспособлений, в области подбора материалов для электродов и изучения их стойкости за рубежом исследований проводится значительно меньше.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Weiser C. L., «American Machinist», 10. X. 1955.
2. Zіtka B. H., Эрозионное действие конденсированных разрядов в диэлектрической среде, «Сs. Cas. Fys.», 3, 1953, 3.
3. Сапу G., Bearbeitung mit Elektroerosionsmaschinen, Französische Maschinen, H. 12., XII. 1956, S. 35.
4. Патент ГДР № 10260, 22. VII. 1955, I. Erhardt.
5. Патент США № 2730602, 10. I. 1956.
6. Патент ГДР, № 10170, 29. VII. 1955, G. Munch, R. Zorn.
7. Патент ГДР, № 10261, 23. VIII. 1955, K. Scherbaum.
8. Adcock I., Spark Machining Process Sheet Metal industry, VIII. 1956.
9. Ullmann, Elektroerosive Feinbearbeitung kleinster Dimensionen. «Werkstatt und Betrieb»: Technische Rundschau, Blatt 4 № 20, 1956.
10. Dunod, Bearbeitung durch Elektrische Zerlegung, «Microtecnic», 1955, v. IX, № 1.
11. Opitz, Oberflächengüte, Masshaltigkeit und Gefügeveränderungen der Werkstücke bei Elektrischen Bearbeitungsverfahren, «Microtecnic», v. IX, № 1.
12. Axer H., A Study of Electro-Erosion Processes . . . , Sparks and Arcs, «The Machinist», 25. III. 1955, p. 529.
13. Iudkins and Dickey, Electromechanical Method «X», «The Iron Age», 26. VIII. 51, v. 108, № 4, p. 65.
14. Mironoff, Pfau, Electroerosive Bearbeitung, «Technische Rundschau», № 14, S. 25.
15. Heidenreich, Der Elektrische Lichtbogen als Bearbeitungsmittel, «Werkstatt u. Betrieb», I. 1955, H. 1, S. 1—52.
16. Roller, A New Method of Machining, The Engineer, X. 1951, p. 133.
17. Seed, Electro Spark Machining, «The Machinist», 28. VI. 1952, v. 96, № 26.
18. Каталог электроискровых станков фирмы Sparcatron, Англия, 1955.
19. Каталог электроискровых станков фирмы Sparcatron, Англия, 1956.
20. Каталог фирмы Wickman — Erodomatic, Англия, 1956.
21. Comp. des Compteurs, Die Bearbeitung von Hartmetallen mittels elektrischer Hochfrequenzfunken, «Microtecnic», v. IX., № 5, p. 267.
22. Ullmann, Elektroerosive Metallbearbeitung und ihre Anwendung in der Praxis, «Werkstatt und Betrieb», Jg. 89, 1956, H. 2, S. 82.
23. Hinüber u. Rüdiger, Neuere Verfahren der Metallbearbeitung insbesondere die Elektro — Erosion, «Werkstatt und Betrieb», Jg. 87., 11. 1954, H. 2, S. 53.

24. Каталог фирмы AEG — Elotherm, Elbo Maschinen, ФРГ.
25. Каталог фирмы Charmilles, Швейцария, 1955.
26. Каталог фирмы Charmilles, Швейцария, 1956.
27. Каталог электроискровых станков фирмы La Soudure Electrique Languepin, Франция, 1956.
28. Das Bohren mit gesteuertem Lichtbogen, «Werkstattstechnik und Maschinenbau», Jg. 45, V. 1955, H. 5, S. 246.
29. Mironoff et Pfau, Une nouvelle Methode d'usinage des Metaux par Electroerosion, «Machine Moderne», VII—VIII. 1955, p. 33.
30. Metallbearbeitung durch Electroerosion, «Technische Rundschau», 2. IX. 1955, B. 1, Blatt 5, № 37, S. 34.
31. Bearbeitung harter Werkstoffe durch Elektrische Funkenentladungen, «Feinwerktechnik», Jg. 59, №. 8, 1955.
32. Glasny, Die derzeitigen elektroerosiven Bearbeitungs-Maschinen, «Deutsche Elektrotechnik», V. 1956, № 5, Jg. 10 S. 38.
33. Müller, Zur frage der elektroerosiven Metallbearbeitung, «Elektrotechnik» Jg. 9, VI. 1955., H. 6, S. 45.
34. Williams, Woodford, Smith, Recent Developments in the Theory and Design of Electric Spark Machine Tools, «Electrical Engineering», V. 1954, p. 83.
35. New Processes will Machine the «Unmachinable», «The Machinist», 24. V. 1952, p. 788.
36. Adcock I., The Electro-Erosion process, «Machinery», 21. VIII. 1953, v. 83, p. 355.
37. Charmilles Eleroda D-1 Spark Erosion Machining Equipment, «Machinery», 21. X. 1955, v. 87, p. 937.
38. Merry and Wheeler, Spark Sharpening of Carbide tools, «Machinery», 3. XII. 1954, v. 85.
39. Rudorff, Electro-Spark Erosion for Metal Machining and Cutting, «Welding & Metal Fabrication», XI. 1953, p. 425.
40. Blake, High Power Spark Erosion Machine, «The Engineer», 18. II. 1955, p. 221.
41. Grodzinski P., Unorthodox Methods of Machining Hard Materials, «Metallurgia», I. 1953, p. 34.
42. Adcock I., Electro-Erosion Machining, «The Machinist», 25. VII. 1953, p. 1197.
43. Alden, Electro Spark Machining, Mechanical Engineering IX. 1953, p. 701.
44. Каталог электроискровых станков фирмы Usim, Франция.
45. Electric Spark Erosion, «Aircraft Production», VIII. 1952, p. 271.
46. Weizel B., Rompe R., Theorie Elektrischer Lichtbögen und Funken, Leipzig, 1950.
47. Zitka B., Vliv fyzikalnich vlastnosti materialu elektrod na transport hmoty pri kratkych kondensovani vybojich, Čs. Čas. Fys., 3, 1953, 80.
48. Sobra K., Zitka, B., Poznamky k sekundarnim energedickym procesum v jiskrovych vybojich, Čs. Čas. Fys., 3, 1953, 172.
49. Zitka B., Erosivni účinky kondensovani vybojich v dielektrickem prostredí, Čs. Čas. Fys., 3, 1953, 221.
50. Hermoch V., Zitka B., Sobra K., Skupenske zmeny na elektrodach v kondensovani vybojich, Čs. Čas. Fys., 4, 1954, 305.

51. K o c S., Vyboji v Leidenfrostove vrstve rtutove pary, Čs. Čas. Fys., 3, 1953, 380.
52. H e r m o c h V., Vliv nevodive vrstvy na povrchu elektrod na prubeh kondensovaného elektrického Vyboje Čs. Čas. Fys., 4, 1954, 28.
53. K o c S., Plasma v Kondensovaných Vybojích, Čs. Čas. Fys., 3, 1953, 468.
54. K o c S., Elektrodové spady v kondensovaných vybojích, Čs. Čas. Fys., 3, 1953, 444.
55. «The Tool Engineer», IV. 1956, v. 36, № 4, p. 97.
56. «Machinery (L)» VII. 1956, v. 88, № 2269, p. 729.
57. «Machine Production» I. 1956, v. 15, № 1, p. 62.
58. Проспекты выставки: II Strojirenska Vystava-Brno, Чехословакия, 1956.
59. W i l l i a m s, Theory of Electric Spark Machining, «Electrical Engineering», III. 1952, v. 71, № 3, p. 257.
60. «Journal of Applied Physics», I. 1956, v. 27, № 1, p. 32.
61. Проспекты института Vuma (Чехословакия).
62. Каталог фирмы Jарaxтрон, Япония, 1956.
63. B r u m a, Theorie des generateurs de decharges electriques Intermittentes, «Electricite», X. 1955, p. 281.
64. Проспект предприятия Динамо (Румыния), 1953.
65. Strojirenska Vyroba, 1956, 8, 4.
66. Metzger L. H., Keeler G., Electrolytic Grinding: What it is How to do it, «The Machinist», 21. II. 1953, p. 304.
67. G r o d z i n s k i P., Unorthodox Methods of Machining Hard Materials, «Metallurgia», I. 1953, p. 34.
68. «Machinery» (L), 1955—1956.
69. Каталоги фирмы Agietron, Швейцария, 1956.
70. Каталоги фирмы Elox (Elox Electrical Discharge Machining Application and Processing Data), США, II. 1956.
71. Каталог фирмы Technoimpex (Funkenerosions Apparat Spinhor), Венгрия, II. 1956.
72. Патент США № 2427588.
73. Патент США № 2374348.
74. Патент США № 2383383.
75. Патент США № 2415690.
76. Патент США № 2441319.
77. Патент США № 2501954.
78. H a r d i n g H., Arc Machining Makes Hard to Cut Jobs Easy, «The Machinist», 5. IV. 1952, v. 96, № 14, p. 514.
79. Drafto Metal Disintegrator, «The Machinist» (N. J.), 1946, v. 90, № 4, p. 154.
80. S t e i g e r w a l d K. H., «Physik», 4, 1953, S. 123 (по Hinuber u. Rüdiger).
81. S t e i g e r w a l d K. H., «Optik», 5, 1949, S. 469 (по Hinuber u. Rüdiger).
82. H a r d i n g H. V., «Machinery» (N. Y.), 1947, v. 53, № 7, p. 161.
83. Проспект фирмы Elox (Tarmaster Electron Drill), США, Michigan, V. 1955.
84. «Machinery» (Япония), 1956, № 12, p. 1147.
85. Справочник технолога машиностроителя, т. II, Машгиз, 1957.
86. Справочник машиностроителя, изд. 2-е, Машгиз, 1956, т. 5, гл. X.
87. Л е в и н с о н Е. М., Электроискровая обработка, Лениздат, 1957.
88. Библиотечка электротехнолога, вып. I—IX, Машгиз, 1952.
89. П о п и л о в Л. Я., Д е м ч у к И. С. и др., Электротехнология, Судпромгиз, 1952.

90. Новые методы электрической обработки материалов, под ред. Л. Я. Попилова, Лонитомаш, кн. 36, Машгиз, 1955.
 91. Лазаренко Б. Р., Электроискровая обработка металлов, ГЭИ, 1959.
 92. Электрические методы обработки металлов, под ред. Улицкого, Машгиз, 1951.
 93. Weiser, Electrical Discharge Diesinker, «The Machinist» (N. Y.), 10. X. 1955.
 94. Ecker, Die Stabilisierung des Lichtbogens vor Anode und Kathode, «Z. f. Physik» 1954, Bd. 136.
 95. Ecker, Die Erscheinung des beweglichen Einfach und Mehrfachbrennflecks an der Kathode des Elektrischen Lichtbogens, «Z. f. Physik», 1954, Bd. 136.
 96. Ein Vielseitiges Elektro Erosionengerat, «Maschine u. Werkzeug», 1956, № 7.
 97. Metallbearbeitung mit Elektrischen Funken, VDI, 13. X. 1956.
 98. Machine Elox de Precision travaillant par decharge Electrique, «Machine Moderne. II. 1955, p. 69.
 99. Mironoff u. Pfau, Une nouvelle Methode d'usinage des Metaux par Electro Erosion machine Eleroda D-1, «Machine Moderne», VIII. 1955, p. 35.
 100. Merry u. Wheeler, L affutage des Carbures avec des «Meutes» en Laiton, «Machine Moderne», I. 1955.
 101. Les Machines a usiner par etincelage Wickman, «Machine Moderne», 1. 1955, p. 31.
 102. Metzger L., Keeleric G., Electrolytic Grinding, «The Machinist», 1953, v. 97, № 8, p. 304.
 103. Dr Hisao Kurafuyi, Researches in Our Laboratory Electro Discharge & Electrolytic Machining», Tokyo, VI. 1957.
 104. Kiyoshi Inoue E., A Study on Electrical Discharge at Microscopical Gap in Liquid, Nippon Discharge Machining Laboratories Inc., 1957.
 105. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект, Машгиз, 1955.
 106. Давыдов А. С., Электроконтактная обработка, «Станки и инструмент» 1956, № 7.
 107. Early H., Down W., Experimental Studies and applications of Explosive Pressures Produced by Sparks in Confined channels, Department of Electrical Engineering, University of Michigan, I. 1953.
 108. Каталог станка ND-5 фирмы Ikegaya Jарах (Япония), 1957.
 109. Лазаренко Б. Р., Электроискровой способ обработки металлов, «Вестник Машиностроения», 1947, № I, с. 25—36.
 110. Teubner E., Method and Apparatus for Electrically Disintegrating Metal Material, U. S. Pat. 2, 650, 979, 1. IX. 1953.
 111. Bruma M., Magat M., L'Usinage par Electricite, International Mechanical Engineering Congress, Milan, X. 1953.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Вопросы теории	6
1. Общие сведения	—
2. Электроискровая обработка	9
3. Электродуговая обработка	63
4. Анодно-механическая обработка	69
5. Прочие методы электрической обработки	76
Глава II. Оборудование	77
1. Станки и приспособления для получения полостей и отверстий	—
2. Станки и приспособления для заточки и шлифования	102
3. Прочие конструкции станков и приспособлений	109
Глава III. Применение электрических методов обработки	113
1. Обработка отверстий и полостей	—
2. Извлечение обломков инструмента	128
3. Шлифование	130
4. Материалы электродов-инструментов	138
Использованная литература	143

Лев Яковлевич ПОПИЛОВ,
Евгений Максимович ЛЕВИНСОН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Редакторы издательства *И. А. Бородулина и Т. Л. Лейкина*

Технический редактор *Л. В. Соколова*

Корректор *Г. А. Дудусова*

Подписано к печати 15/IV 1958 г.

М-02847

Формат бумаги 60×92¹/₁₆

Печ. листов 9,25

Уч.-изд. листов 9,8

Тираж 10 000 экз.

Заказ 3661.

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

4 р. 90 к.

21
11237



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Ленинград, ул. Дзержинского, 10