

Б.И. Ставицкий

УСЛОВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ В ОБЫЧНОЙ ВОДЕ

*Федеральное государственное унитарное предприятие НПП ИСТОК,
ул. Вокзальная, 2, г. Фрязино, 141120, Московская область, Россия*

1. Предисловие

В связи с широким распространением электроискрового прецизионного оборудования, оснащенного компьютерными ЧПУ-генераторами, особый интерес для создателей и потребителей этой техники представляет информация о возможности электроискрового изготовления высокоточных деталей в обычной воде из водопровода без ее дополнительной очистки и деионизации. Тем более, что в зарубежных публикациях последних лет утверждается, что точная обработка должна осуществляться в углеводородной жидкости (масле или керосине), а в воде могут производиться только менее точные работы. Более того, по мнению некоторых зарубежных специалистов, «вырезка контуров с малыми геометрическими элементами проволокой $\varnothing < 0,1$ мм в воде – технологическая профанация». Это утверждение обосновывается тем, что боковой зазор при резании в воде значительно больше, чем в углеводородной жидкости, где он равен 4 мкм.

Такое мнение вызывает удивление, поскольку в электронной промышленности СССР еще 40 лет назад были разработаны новые методы изготовления особо точных деталей электроискровым способом, в числе которых способ изготовления деталей электродом-проволокой и метод последовательного копирования профиля электрода-инструмента. В 1963 году за разработку этих методов была присуждена Ленинская премия, подтвердившая мировой приоритет Советского Союза в области электроискровой прецизионной обработки материалов.

Электроискровая обработка электродом-проволокой $\varnothing 15\text{--}50$ мкм начала применяться в конце пятидесятых годов для прорезания узких (30–50 мкм) пазов на торцах электродов-инструментов, предназначенных для изготовления цельных сеток клистронов, а затем – замедляющих систем электронных ламп обратной волны (ЛЮВ) миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. В качестве межэлектродной среды вначале применялся керосин, а затем и вода.

Для изготовления особо миниатюрных деталей электронных приборов нами применялась вольфрамовая проволока ВА-3 $\varnothing 6\text{--}10$ мкм [1–9]. В зависимости от режима обработки (напряжения на электродах U_0) межэлектродный зазор составлял 1–5 мкм, а ширина паза, прорезаемого такой проволокой, – от 8 до 55 мкм. Причем это не эпизодическое изготовление деталей, а их серийное производство. Количество деталей, изготавливаемых в месяц одним оператором, превышало 100 штук, а более 90% их изготавливалось электродом-проволокой диаметром не более 0,03 мм.

Отметим, что минимальный диаметр проволоки, применяемой на зарубежном оборудовании, – 0,030 мм. При этом ширина паза – 38 мкм. При четырех проходах она достигает 48 мкм. Таким образом минимальный зазор на сторону составляет 4 – 9 мкм.

В [9] на рис. 15 представлено количество замедляющих систем ЛЮВ, изготовленных еще в 1961 году электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 15\text{--}50$ мкм. В течение года были изготовлены:

- 302 замедляющих системы, состоящих из четырех пластин толщиной 0,04 мм каждая (442 паза шириной $0,018^{+0,002}$ мм с шагом $0,054^{\pm 0,0015}$ мм), электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 15$ мкм;
- 583 замедляющих системы электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 25\text{--}40$ мкм (пазы шириной от $0,03^{+0,002}$ до $0,045^{+0,002}$ мм);

- 124 замедляющих системы электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 50$ мкм (пазы шириной $0,055^{+0,002}$ мм).

Таким образом, это не эпизодическое изготовление деталей, а их серийное производство в количестве сотен штук разных типоразмеров.

Мы позволим снова воспроизвести уже опубликованные ранее в [9] фотографии (рис. 12–14) некоторых элементов замедляющих систем ЛОВ, изготовленных в дистиллированной воде. Для большей наглядности фотографии представлены в одном масштабе.

На рис. 1 слева показан фрагмент замедляющей системы (ЗС), имеющей 166 пазов шириной $0,06^{+0,002}$ мм, изготовленных электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,05$ мм в двух медных пластинах толщиной по $0,07$ мм каждая. Зазор на сторону не превышает 5 мкм.

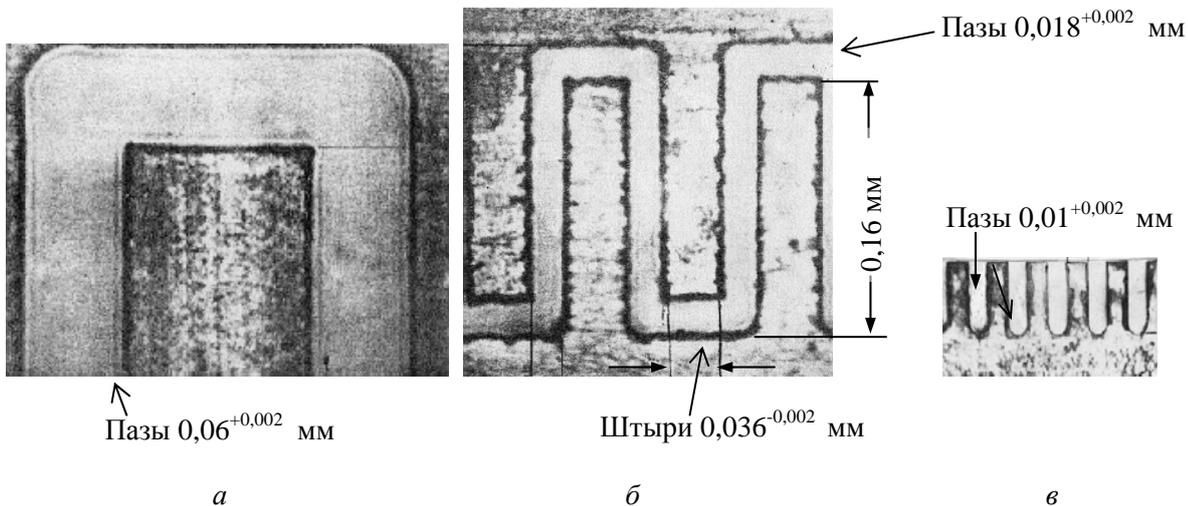


Рис. 1. Фрагменты замедляющих систем ЛОВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, изготовленных электродом-проволокой ВА-3 диаметром $0,05$ мм (а); $0,015$ мм (б) и $0,008$ мм (в).

На рис. 1,б – фрагмент ЗС, имеющей 618 пазов шириной $0,018^{+0,002}$ мм и штырей шириной $0,036^{+0,002}$ мм, высотой $0,16$ мм, изготовленных проволокой ВА-3 $\varnothing 0,015$ мм в четырех медных пластинах толщиной по $0,04$ мм каждая. Здесь зазор на сторону не превышает $1,5$ мкм. Режим обработки (для проволоки ВА-3 $\varnothing 0,015$ мм, удельное сопротивление которой $0,38$ Ом·мм): $U_o = 26$ В, $C_{ш} = 300$ пФ, $t_u = 0,6$ мкс, $W_o = 0,1$ мкДж. Межэлектродная среда – дистиллированная вода. Скорость обработки $1,6$ мм/мин.

Обе ЗС, показанные на рис. 1,а,б, собраны из тонких медных пластин, между которыми проложены специальные медные прокладки, создающие в необходимых местах пролетные каналы системы.

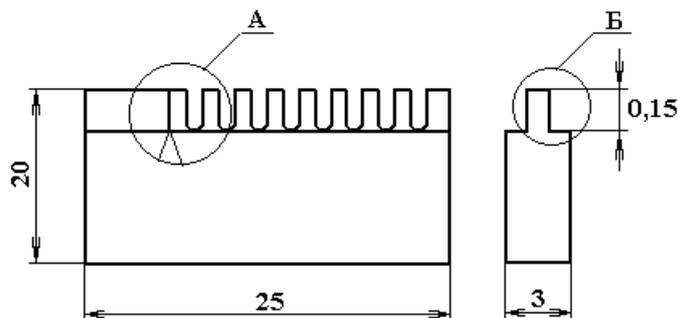
ЗС (рис. 2), фрагмент которой изображен на рис 1,в, изготовлена из цельной медной заготовки 20×25 мм толщиной 3 мм. По длинной ее стороне электроискровым способом (электродом-проволокой) сформировано «лезвие» толщиной $0,2$ мм и $L = 25$ мм, в котором на всю длину проволокой ВА-3 $\varnothing 0,015$ мм прорезаны четыре паза шириной $b = 0,02^{+0,005}$ мм на глубину $h = 0,12^{+0,008}$ мм с шагом $0,04$ мм (рис. 2,Б). Поперек этого «лезвия» с пазами электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,008$ мм прорезано 590 пазов шириной $b = 0,01^{+0,002}$ мм на глубину $h = 0,05^{+0,005}$ мм (рис. 2,А). Здесь зазор на сторону не превышал 1 мкм.

Совершенно ясно, что изготовление пазов шириной $0,02$ мм для традиционных методов обработки само по себе представляет непреодолимые трудности. Тем более, когда речь идет о прорезании четырех таких пазов с шагом между ними не более $0,04$ мм практически на «лезвии» толщиной $0,2$ мм и длиной 25 мм.

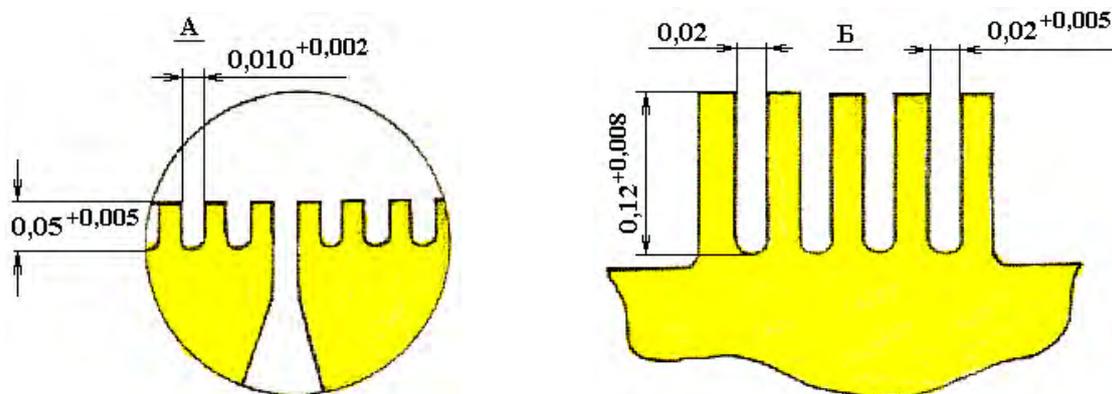
Приведенные примеры наглядно показывают, что изготовление весьма точных и ажурных деталей электродом-проволокой $\varnothing 0,006$ – $0,05$ мм в воде не «технологическая профанация», а убедительная иллюстрация отставания зарубежных фирм от опыта советской электронной техники в области электроискровой прецизионной обработки материалов.

В табл. 1 приведены размеры некоторых ЗС миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, которые изготавливаются электроискровым способом электродом-проволокой ВА-3 диаметром от $0,006$ мм до $0,05$ мм. Межэлектродной средой служит дистиллированная вода, так как

для изготовления таких миниатюрных деталей электронных приборов пригодна только чистейшая вода. Источник питания – транзисторный генератор импульсов, обеспечивающий отсутствие электрохимических процессов. Количество замедляющих систем, изготавливаемых одним оператором в смену – 100–120 штук в месяц (среднее время изготовления одной системы – 1,5 часа).



Блок замедляющей системы из меди МБ



Вид А. Элементы замедляющей системы

Сечение Б

Пазы $b = 0,02^{+0,005}$ мм, шаг 0,04 мм, $L = 25$ мм

Рис. 2. Замедляющая система субмиллиметрового диапазона длин волн.

Таблица 1. Размеры миниатюрных замедляющих систем некоторых ЛОВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн

Паз, мкм	Зуб		Шаг, мкм	Число шагов, шт.	Число пластин, шт.	Толщина пластины, мкм
	ширина, мкм	высота, мкм				
8^{+2}	8	23^{-2}	$16^{\pm 1}$	1000	5–6	25
10^{+2}	12	34^{-2}	$22^{\pm 1,5}$	590	6	25
10^{+2}	15	60^{-2}	$25^{\pm 1,5}$	580	3	30
18^{+2}	36	160^{-2}	$54^{\pm 1,5}$	442	4	40
20^{+2}	36	160^{-2}	$56^{\pm 1,5}$	618	4	40
30^{+2}	40	210^{-2}	$70^{\pm 1,5}$	335	3	50
50^{+5}	60	300^{-2}	$110^{\pm 1,5}$	216	2	50
55^{+5}	95	500^{-3}	$150^{\pm 2}$	166	2	70

Для изготовления таких деталей ЭП используются различные материалы, широко применяющиеся в электронной промышленности: медь и ее сплавы (например, хромистая бронза); молибден, вольфрам и другие тугоплавкие металлы. В качестве межэлектродной среды используется дистиллированная вода, а источника питания – транзисторный генератор импульсов, обеспечивающий отсутствие электрохимических процессов [7, 8, 10, 11, 12].

К сожалению, при весьма убедительных достижениях зарубежных фирм в создании нового электроискрового оборудования для изготовления деталей электродом-проволокой, оснащенного современными 32-разрядными компьютерными ЧПУ-генераторами и биполярной системой Super BS,

странно звучит утверждение, что «в воде могут производиться только менее точные работы, и она непригодна в качестве межэлектродной среды для вырезки контуров с малыми геометрическими элементами проволокой $\varnothing < 0,1$ мм».

По-видимому, такое мнение сформировалось в связи с тем, что зарубежными фирмами не полностью решена проблема изготовления деталей в обычной воде даже с появлением биполярной импульсной системы Super BS.

2. Влияние межэлектродной среды на эффект эрозии электродов

Традиционно в качестве межэлектродной среды при электроискровой обработке применялись углеводородные жидкости (например, керосин).

Однако при использовании углеводородов в процессе их разложения образуются твердые углеродные частицы, способствующие засорению межэлектродного промежутка. Если это керосин ($C_{10}H_{22}$), то на 142 г разложенного керосина приходится 3 г твердых углеродных частиц [13]. Поэтому при обработке в керосине в зоне обработки выделяется огромное количество твердых продуктов его разложения (в дополнение к металлу, выбрасываемому из зоны поражения разрядом), которые интенсивно забивают межэлектродное пространство, существенно ухудшают условия эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки и приводят к затуханию процесса, если не принять мер по улучшению естественной или созданию их принудительной эвакуации.

Новые сведения о влиянии межэлектродной среды на эффект эрозии электродов под действием искровых разрядов микросекундной длительности были получены нами с помощью методики групповых лунок [2, 3].

Установлено, что при прочих равных условиях параметры лунок в керосине и этиловом спирте отличаются незначительно, но их объемы в воде в два раза меньше, чем в керосине [6].

В табл. 2 показано влияние межэлектродной среды на параметры лунок, образованных на меди при $W_o = 250$ мкДж, $t_u = 0,5$ мкс.

Таблица 2. Основные параметры лунок, образованных на меди при искровых разрядах малой энергии и длительности ($W_o = 250$ мкДж, $t_u = 0,5$ мкс)

Межэлектродная среда	D , мкм	h , мкм	b , мкм	$V \cdot 10^7$, мм ³	Минимальный диаметр плоского дна d , мкм
Керосин	31	3	2	11,4	2 – 3
Этанол	30	3	1,7	10,3	6
Вода дистиллированная	24	2,6	1,7	6,0	4

Примечание: D – диаметр, h – глубина, b – ширина, V – объем.

Наилучшей средой для электроискровой обработки деталей электронных приборов является чистая вода (ее электросопротивление находится на уровне 10^4 Ом·см). Она практически не образует в процессе обработки каких-либо твердых продуктов разложения, обычно забивающих межэлектродный промежуток в случае применения углеводородных жидкостей, которые к тому же являются пожароопасными и образуют при своем разложении вредные продукты (например, оксид углерода).

Благодаря работам [4–8, 10–12, 14–17 и др.], выполненным в электронной промышленности, были созданы генераторы биполярных импульсов напряжения микросекундной длительности, позволившие вести электроискровую обработку в обычной воде из водопровода без боязни возникновения электрохимических процессов, существенно повысить производительность процесса (особенно при обработке стальных деталей), улучшить качество обработанной поверхности и условия труда.

Здесь же уместно напомнить, что в воде происходит анодный электролитический съем металла. При сравнении характеристик обработки в воде и керосине вкладом электрохимической реакции можно игнорировать (так как более 90% приходится на действие искрового разряда).

3. Некоторые особенности работы генераторов импульсов для прецизионной электроискровой обработки материалов в воде

Одним из наиболее перспективных направлений в развитии прецизионной электроискровой обработки материалов является обработка в воде. По сравнению с электроискровой обработкой в углеводородных средах обработка в воде отличается дешевизной и повышенной безопасностью, отсутствием вредных паров, твердых продуктов разложения среды, науглероживания и загрязнения

обрабатываемых поверхностей, что совершенно недопустимо при изготовлении деталей электронных приборов. Однако вода – слабопроводящая жидкость, которая при пропускании через нее постоянного тока электролизуется и выделяет водород и кислород. Кроме того, протекание в воде постоянного тока вызывает активные электрохимические процессы анодного растворения вследствие того, что вода – слабый электролит. Результатом этих процессов является повышенная коррозия деталей и электродов, растравливание обработанных поверхностей, ухудшение точности обработки и изменение химического состава поверхностных слоев [14–16].

Практика применения электроискровой прецизионной обработки материалов в отечественной электронной промышленности показывает, что нежелательные электрохимические процессы практически можно исключить и не учитывать, когда последовательность холостых импульсов напряжения, подаваемых на электроды от импульсного источника питания для электроискровой обработки, не вызывает постоянного тока через межэлектродную среду, т.е., иначе говоря, не имеет постоянной составляющей напряжения ($U_{cp} = 0$). В случае использования импульсного напряжения необходимо применять разнополярные импульсы, у которых площадь положительного импульса напряжения равна площади отрицательного импульса напряжения. Именно такая последовательность импульсов имеет нулевую постоянную составляющую. Однако это условие является необходимым, но недостаточным. При использовании таких импульсов не удастся исключить электролиз обычной воды из водопровода, имеющей проводимость 50–100 мкСм. Нами было установлено [15], что для прецизионной электроискровой обработки в воде наиболее приемлемыми по форме холостыми импульсами напряжения являются биполярные импульсы прямоугольной формы, не содержащие постоянной составляющей, у которых амплитуда положительного импульса, по крайней мере, в два раза больше амплитуды отрицательного импульса напряжения, а его длительность находится в пределах 3–4 мкс.

Это достигается применением либо трансформатора, выходная обмотка которого подключается непосредственно к электродам, либо двух каналов, формирующих положительные и отрицательные импульсы напряжения на электродах.

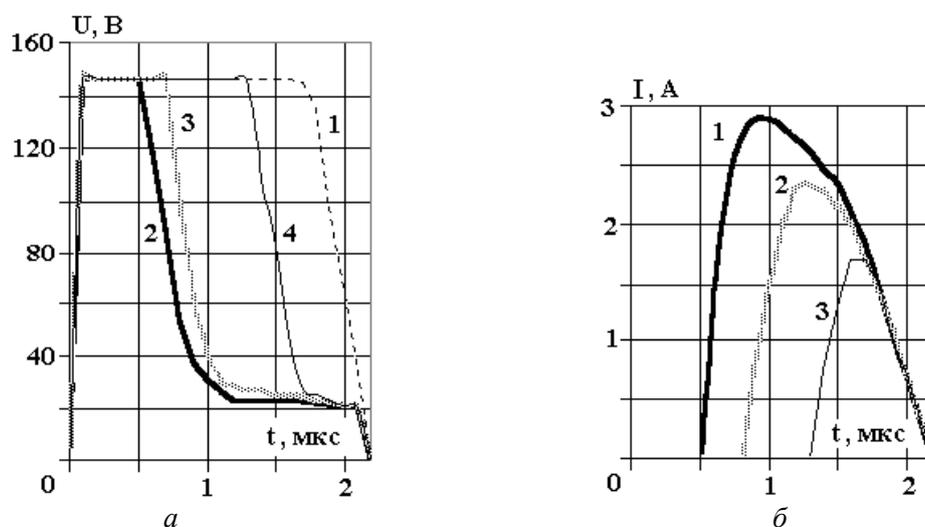


Рис. 3. Эпюры импульсов напряжения U на электродах (а) и импульсов тока I (б) с различным запаздыванием разрядов: а: 1 – U_0 ; 2 – U_1 ($t_3=0,5$ мкс); 3 – U_2 ($t_3=0,7$ мкс); 4 – U_3 ($t_3=1,25$ мкс), б: 1 – I_1 ($t_3=0,5$ мкс); 2 – I_2 ($t_3=0,7$ мкс), 3 – I_3 ($t_3=1,25$ мкс).

Было установлено [10, 14], что амплитуда импульса тока, протекающего через межэлектродное расстояние, зависит от времени запаздывания t_3 момента пробоя от начала импульса напряжения на электродах, причем с увеличением времени запаздывания амплитуда рабочего импульса тока уменьшается. Это объясняется тем, что часть тока, отдаваемого источником постоянного напряжения, к моменту пробоя замкнулась через индуктивность.

На рис. 3 представлены эпюры импульсов напряжения U на электродах (а) и импульсов тока I (б) с различным запаздыванием разрядов: 0,5 мкс (U_1, I_1), 0,7 мкс (U_2, I_2) и 1,25 мкс (U_3, I_3). На рис. 3,б видно, что вершина импульса тока спадающая, то есть величина тока разряда уменьшается с увеличением запаздывания начала разряда с момента возникновения напряжения на электродах.

Следует также отметить, что при пробое межэлектродного расстояния амплитуда импульса напряжения, следующего непосредственно за рабочим импульсом (искровым разрядом), возрастает по сравнению с амплитудой импульса напряжения, следующего за холостым импульсом. Это может

вызвать нестабильную работу системы автоматического регулирования межэлектродного расстояния, использующей напряжение на электродах в качестве критерия регулирования.

4. Заключение

Подводя итоги современного состояния электроискрового изготовления контуров деталей с малыми геометрическими элементами электродом-проволокой $\varnothing < 0,1$ мм в воде, можно констатировать ошибочность взглядов специалистов известных зарубежных фирм, занимающихся разработкой и производством современного электроискрового оборудования.

Такое их заблуждение можно объяснить только тем, что применяемые за рубежом биполярные импульсные системы, например, Super BS, не полностью исключают условия для электролитической эрозии и коррозии. Кроме того, как это следует из рекламных данных, эта система обеспечивает шероховатость обработанной поверхности R_{max} за один проход не менее 20 мкм, что соответствует $R_a > 5$ мкм. Шероховатость же обработанной поверхности $R_a = 2$ мкм может быть достигнута только при двух проходах. Как известно, электроискровые обрабатывающие комплексы, созданные в отечественной электронной промышленности [4–6], обеспечивают формообразование деталей примерно с такой же шероховатостью поверхности ($R_a \leq 2$ мкм) за один проход и при использовании в качестве межэлектродной среды обычной воды из водопровода (без осуществления ее деионизации).

Наши исследования [14–16 и др.] показали, что для исключения возможности возникновения электрохимических процессов при изготовлении деталей в воде, использование полностью биполярных импульсов напряжения является необходимым, но не достаточным условием. Надо, чтобы при равенстве площадей положительного и отрицательного импульсов напряжения амплитуда положительного импульса напряжения была, по крайней мере, в два раза больше амплитуды отрицательного. При этом форма положительного импульса напряжения была близка к прямоугольной, так как с увеличением длительности переднего фронта импульса напряжения повышается наиболее вероятное время запаздывания момента пробоя от начала импульса напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Труды НИИ МРТП СССР. 1957. № 11. С. 67–88.
2. Ставицкий Б.И. Исследование возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электровакуумных приборов. Кандидатская диссертация, ГС НИИ ГК СМ СССР по радиоэлектронике. г. Фрязино, 1958.
3. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Электроискровая обработка металлов. Вып. 2. АН СССР. 1960. С. 67–113.
4. Ставицкий Б.И. Некоторые виды оборудования для прецизионной электроискровой обработки металлов // Электронная обработка материалов. 1966. № 1. С. 11–27.
5. Stavitsky B.I. Equipment for Precision Eelectrospark Machining of Metals // Applied electrical phenomena. Consultants bureau No1, January – February 1966, P. 8 – 19. A translated of Electronnaya Obrabotka Materialov No1, January – February 1966. P. 11–27.
6. Ставицкий Б.И. Современный уровень и перспективы развития электроискровой прецизионной обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1967. № 5. С. 20–35.
7. Ставицкий Б.И. К вопросу об электрической эрозии токопроводящих материалов при искровых разрядах малой энергии и длительности // Электронная обработка материалов. 1969. № 2. С. 11–14.
8. Голубков А.К. Транзисторный генератор импульсов для электроискровой обработки // Электронная обработка материалов. 1969. № 5. С. 81.
9. Ставицкий Б.И. Электроискровая обработка материалов – способ Лазаренко на рубеже столетий. // Электронная обработка материалов. 2000. № 5. С. 25–40.
10. Безрук А.И., Пушков Ю.Т., Ставицкий Б.И. Электрическая эрозия при одиночных униполярных импульсах малой энергии и длительности // Электронная обработка материалов. 1971. № 1. С. 3–7.
11. Ставицкий Б.И., Коцушин С.В., Пушков Ю.Т. Электроискровое формообразование деталей электродом-проволокой с применением малогабаритных транзисторных генераторов // Электронная обработка материалов. 1975. № 2. С. 5–9.
12. Ставицкий Б.И., Бойко П.И., Коцушин С.В. Особенности электроискрового прорезания сверхузких пазов // Электронная техника, сер. 1, «Электроника СВЧ», 1977. Вып.10. С. 97–101.
13. Кисси Иноу. Электроискровое изготовление деталей электродом-проволокой (NC EDM).
14. Ставицкий Б.И., Коцушин С.В. Генераторы импульсов с индуктивными формирателями импульсов

- напряжения на межэлектродном промежутке // Электронная обработка материалов. 1978. № 1. С. 14–17.
15. Ставицкий Б.И., Конушин С.В. К вопросу об оптимальной форме холостых импульсов напряжения и рабочих импульсов тока при прецизионной электроискровой обработке в воде // Электронная обработка материалов. 1979. № 3. С. 5–8.
16. Ставицкий Б.И., Конушин С.В. Некоторые особенности работы транзисторных генераторов с индуктивно-емкостными формирователями для прецизионной электроискровой обработки // Электронная обработка материалов. 1979. № 3. С. 8–13.
17. Ставицкий Б.И., Ставицкая Н.Б. Основные особенности электроискровой прецизионной обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 5–9.

Поступила 26.09.2001

Summary

In a paper the outcomes of research electric-spark precision forming of details in usual water from a water pipe are resulted. Affirms that the electric spark machining in water without appearance of any electrochemical processes and corrosion of surfaces is possible only at observance of particular conditions. It is established that usage of bipolar voltage pulses is necessary, but not by a sufficient condition. It is necessary, that alongside with equality of areas of positive and negative voltage pulses, the amplitude of a positive voltage pulse was, at all events, twice more negative, and the shape of a positive voltage pulse was close to rectangular. The groundlessness of announcement of the foreign experts affirms, that a clipping of circuits with small geometric primitives by a wire diameter $< 0,1$ mm in water and precise processing should be carried out in a hydrocarbon fluid (oil or kerosene), and in water less precise operations can be manufactured only.
