

## ИНФОРМАЦИЯ

11 ноября 2010 года исполняется 100 лет со дня рождения Бориса Романовича Лазаренко. Мы начинаем публикацию серии статей лауреата Ленинской премии, Главного конструктора электроискрового оборудования электронной промышленности СССР Б.И. Ставицкого «Из истории электроискровой обработки материалов», более 50 лет посвятившему этому направлению науки и техники.

**Б.И. Ставицкий**

### ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Глядя на нынешнее лидерство в области создания электроискрового оборудования таких фирм, как AGIE, Charmilles, FINE Sodick и Mitsubishi Electric, нынешнему поколению молодых инженеров трудно поверить, что эта технология появилась в бывшем СССР. Более того - именно советские учёные и инженеры первые лет 20-30 существования электроискровой обработки действительно были «впереди планеты всей». Первые десятилетия развития электроискровых технологий практически все нынешние мировые лидеры в этой области только тем и занимались, что изучали советские достижения и пытались их копировать в своих установках. Наступило время ответить на вопрос, почему СССР потерял лидерство в электроискровых технологиях? Борис Романович Лазаренко в одном из своих писем от 27 апреля 1948 г. к руководству уже предупреждал о возможности такой перспективы.



*«Многовековое царствование механического способа обработки металлов, перевернувшего мир в прошлых столетиях, - кончается.*

*Его место занимает, несомненно, более высокоорганизованный процесс, когда обработка металла производится электрическими силами.*

*Не может быть причин, которые бы приостановили развитие и движение этого революционного процесса, ломающего существующие представления об обработке материалов.*

*Ему будет принадлежать будущее, и притом – ближайшее будущее».*



Б. Лазаренко 1947 г.

К числу выдающихся открытий XX века относится изобретение советскими учеными, супругами Борисом Романовичем и Наталией Иоасафовной Лазаренко, принципиально нового способа обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов — электроискровой обработки, основанного на использовании высококонцентрированных электрических разрядов для съема с обрабатываемой заготовки или нанесения на нее материала.

Этот способ открыл новую эру в развитии металлообработки, обеспечив использование электрической энергии непосредственно для формообразования деталей из любых токопроводящих и полупроводниковых материалов независимо от их физико-химических и механических свойств, а также упрочнения и легирования их поверхностей.

Появившись в 1938 г., электроискровой способ обработки материалов открыл неограниченные возможности для совершенствования различных производств. Приоритет советских ученых Б.Р. и Н.И. Лазаренко в открытии этого принципиально нового способа обработки подтверждается авторским свидетельством № 70010 от 3.04.1943 г., а также патентами других государств: Франции № 525414 от 18.06.1946 г., Великобритании № 285822 от 24.09.1946 г., США № 6992718 от 23.08.1946 г., Швейцарии № 8177 от 14.07.1946 г., Швеции № 9992/46 от 1.11.1946 г., а также многочисленными публикациями.

За открытие и разработку этого способа супругам Б.Р. и Н.И. Лазаренко в 1946 г. была присуждена Сталинская премия, а решением ВАК от 26 июня 1949 г. Б.Р. Лазаренко была присуждена ученая степень доктора технических наук.

Однако появление электроискровой технологии в начале 40-х годов было в какой-то степени преждевременным, так как уровень развития ряда отраслей техники тогда (да и два-три десятилетия спустя) не обеспечивал достаточно полной реализации его возможностей.

С одной стороны, применявшиеся традиционные методы металлообработки вполне отвечали потребностям промышленности, а основные потребители электроискрового способа еще только появлялись. С другой стороны, в то время еще не были созданы устройства, появившиеся только в конце XX века и позволяющие наиболее эффективно использовать достоинства электроискровой обработки: 32 разрядные ЧПУ, линейные двигатели, обеспечивающие скорости сервоподач до 600 мм/с с максимальным ускорением до 2G, очень малой инерцией, отсутствием люфтов и погрешностей шага, минимумом трения, дискретностью до 0,1 мкм, быстродействующие коммутационные приборы, высокоточные датчики линейных перемещений и измерительные линейки с дискретностью до 0,1 мкм, конструкции функциональных узлов станочных модулей (в том числе из специальной керамики).

По мере развития техники, с появлением новых материалов, устройств и приборов, особенно с расширением возможностей и повышением надежности управляющих микро ЭВМ были созданы высокопроизводительные и особо точные электроискровые обрабатывающие комплексы, существенно расширилась область применения этого способа обработки материалов, повысилась эффективность его использования в промышленности. Этим и объясняется непрерывное обновление способа и неисчерпаемость его возможностей.

В многолетнем соревновании с другими способами металлообработки электроискровой способ доказал свою перспективность, чрезвычайную простоту осуществления, малую энергоемкость и практически неограниченную область применения. О популярности этой технологии говорит и тот факт, что в Японии, являющейся сегодня мировым лидером в выпуске электроискрового оборудования, уже в середине 90-х годов ежегодно производилось более шести тысяч подобных установок, а прирост их выпуска достигал 30–35% в год. Одной из ведущих компаний (24 % мирового рынка) в производстве EDM-комплексов с компьютерными ЧПУ-генераторами (32-разрядными мультипроцессорными системами) является японская фирма FINE Sodick. В январе 2005 г. она выпустила уже свой 10000-й электроискровой станок с линейными приводами, на что потребовалось чуть более 6 лет.

### **Первый этап:**

#### **Укroшение искровых разрядов**

Первый этап (1938-й – конец 1940-х гг.) — открытие электроискрового способа и экспериментальное доказательство того, что по своим технологическим возможностям он превосходит обработку металлов механическим резанием. Это было показано в 1943–1946 гг.

Изучив закономерности, управляющие разрушением электрических контактов на экспериментальной установке (рис. 1), установив возможность получения порошков с помощью электрических искровых разрядов (рис. 2) и получив первые отверстия в металлах (рис. 3–5), изобретатели способа сделали прогноз, что нет и не может быть токопроводящих материалов, которые бы не обрабатывались электрическими разрядами.

С тех пор прошло 70 лет, однако нам неизвестно, чтобы кто-нибудь нашел хотя бы одно исключение из этого правила. Изобретатели, также установив инверсию электрической эрозии – из дуговой формы в искровую форму разрядов, пришли к выводу, что для размерной обработки материалов пригодна только искровая форма (рис. 6–8). Как только разряд переходит в область дугового импульса, он начинает «расползаться» по поверхности анода. Действие ионных процессов вызывает сильный нагрев поверхности электрода, вплоть до её оплавления. Это хорошо видно на рис. 8 (в левой части снимка), где отверстие, полученное при помощи восьмигранного электрода, очень приближенно напоминает восьмигранник. Поверхность металла сильно обожжена и оплавлена. Однако на изготовление этого отверстия затрачено в несколько раз больше времени, чем на изготовление отверстия при помощи искровых разрядов, изображенного справа. В этом случае полностью отсутствуют следы какого-либо нагревания поверхности, а само отверстие имеет весьма четкие контуры.

Б.Р. и Н.И. Лазаренко особо подчеркивали, что именно в искровом разряде наиболее целесообразно концентрировать электрическую энергию во времени и в пространстве. Ими были сформулированы особенности этого процесса:

- 1) простота получения искровой формы разряда;
- 2) исключительная легкость управления интенсивностью процесса обработки, позволяющая либо «обрушивать» на место обработки потоки мощнейших разрядов, грубо рвущих порции металла по строго заданным направлениям, либо заставлять искру проводить «ювелирную» работу.

Тем не менее, несмотря на то что авторы указывали на возможность применения способа для точного изготовления деталей, он вначале стал применяться преимущественно для вспомогательных и заготовительных работ. Таких как измельчение металлов в порошок (нужный для металлокерамики, взрывчатых веществ, химических производств и т.п.); извлечение из деталей сломанного инструмента (свёрл, метчиков и т. п.); заточки инструмента оснащенного твердосплавными пластинами; упрочнение и легирование металлорежущего инструмента; разрезание заготовок из легированных металлов. В этом направлении в основном и проводились соответствующие научные исследования и конструкторские разработки.

Между тем промышленное применение электроискрового способа началось до его официальной регистрации. Он использовался в первые годы Великой Отечественной войны на Урале при изготовлении реактивных снарядов для легендарных ракетных установок «Катюша». Устройство для извлечения сломанного инструмента из корпусов реактивных снарядов «Катюша», созданное на Уралмаше, и одна из экспериментальных установок с вибратором представлены на рис. 9, а на рис. 10 – станок контактного действия начала 1940-х годов.

На рис. 11 – надпись «научись делать чёрную работу в науке!» сделана электроискровым способом на стекле, а на рис.12 – портрет В.И. Ленина, выполненный электроискровым нанесением серебра на поверхность вороненой стали. Для осуществления таких работ был разработан аппарат для электроискрового гравирования и росписи (рис. 13).

На основе исследований о поведении материала электродов под действием различных форм разряда (независимо от способов увеличения напряженности электрического поля) авторы сделали следующие обобщения:

- каждой форме самостоятельного электрического разряда соответствует присущая ей полярность эрозии электродов;
- искровая форма разряда сопровождается преобладающей убылью анода;
- переход искровой формы электрического разряда в дуговую форму (и обратно) сопровождается инверсией электрической эрозии.

#### **Второй этап:**

##### **Максимум производительности, минимум качества**

Второй этап (конец 1940-х — середина 1950-х гг.) развития техники электроискровой обработки – создание научно-исследовательских лабораторий, начало подготовки специалистов высшей квалификации в области электроискровой обработки материалов и создание первых в мире промышленных типов электроискровых установок, начало их выпуска.

В середине 40-х гг. по инициативе Б.Р. Лазаренко в Московском авиационном технологическом институте (МАТИ), директором которого в те годы был Михаил Андреевич Попов, организовали лабораторию электроискровой обработки металлов (рис. 14–15).

Лаборатория была оснащена установками различного назначения – для разрезания металлов вращающимся диском толщиной до одного миллиметра, прошивки отверстий любого профиля, круглого шлифования и др., созданными преимущественно на базе металлорежущих станков – круглошлифовального и сверлильных.

В марте 1949 г. в МАТИ состоялась научно-техническая конференция студентов, посвященная XI съезду ВЛКСМ (рис. 16). На секции электроискровой обработки, которой руководил лауреат Сталинской премии Б.Р. Лазаренко, студенты-дипломники сделали четыре доклада об электроискровой обработке металлов. Подводя итоги работы секции и оценивая доклады студентов, он подчеркнул важность начавшейся подготовки инженеров по электроискровой обработке металлов. Обратил особое внимание присутствующих на преимущества и перспективность применения этого нового способа по сравнению с механическим и другими методами металлообработки, подчеркнул важность расширения научно-исследовательских работ в этой чрезвычайно перспективной и начавшей развиваться отрасли техники.

Но вскоре случилось непредвиденное. Борис Романович, не получив поддержки у нового руководства МАТИ в организации подготовки специалистов высшей квалификации по специальности «Электроискровая обработка материалов в авиастроении», был вынужден прекратить сотрудничество с институтом, и электроискровая лаборатория, расположенная в те годы в здании МАТИ на Петровке, к 1950 г. прекратила свое существование. Поэтому начатая мной дипломная работа, посвященная электроискровому шлифованию литых магнитных сплавов типа «АЛНИКО», руководителем которой был Б.Р. Лазаренко, оказалась под угрозой. И мне пришлось все эксперименты проводить в одной из лабораторий ЦНИЛ-Электром, расположенной тогда у Красных Ворот в Хоромном переулке в доме № 4.

Для осуществления различных технологических процессов электроискровым способом в ЦНИЛ-Электром уже были созданы различные конструкции установок: для разрезания заготовок различного профиля, шлифования, прошивки разнообразных отверстий, упрочнения и легирования различного металлорежущего инструмента и деталей машин, аппараты для электроискрового гравирования и росписи...

Впрочем, вскоре, а именно 16 июня 1948 г., Постановлением Правительства СССР, подписанным И.В. Сталиным, была создана Центральная научно-исследовательская лаборатория электрической обработки материалов (ЦНИЛ-Электром), руководителем которой утвердили Б.Р. Лазаренко. На первых этапах она входила в состав НИИ-627 Министерства электропромышленности СССР. Поэтому уже в конце 1940-х — начале 1950-х годов ЦНИЛ-Электром, руководимая Б.Р. Лазаренко, стала не только базой для подготовки специалистов высшей квалификации, но и «кузницей кадров», из которой вышли первые советские ученые - «электроискровики» (рис. 17).

В те годы в ЦНИЛ-Электром (в лаборатории, руководимой Б.Н. Золотых) проводились фундаментальные исследования в области физических основ электроискровой обработки металлов. К сожалению, при этом внимание уделялось лишь исследованию электрической эрозии электродов в искровом разряде при запасах энергии в импульсе в пределах от десятых долей джоуля до нескольких джоулей, пригодных только для грубой и предварительной обработки. Не изучалась эрозия электродов при энергиях импульсов меньше тысячных долей джоуля. А именно этот диапазон энергий характерен для электроискровой прецизионной обработки металлов. Кроме того, применявшаяся методика была трудоемкой, не могла отражать в полной мере процессы, происходящие на электродах, и давать объективную картину воздействия искрового разряда на аноде и катоде.

Тем временем для осуществления различных электроискровых процессов были созданы соответствующие конструкции установок — для прошивки разнообразных отверстий, разрезания заготовок, шлифования, заточки, упрочнения и легирования различного металлорежущего инструмента.

На рис. 18 показана одна из созданных в ЦНИЛ-Электром экспериментальных электроискровых установок для разрезания различных материалов движущейся лентой. В качестве межэлектродной среды использовалась водная суспензия каолина, обеспечивающая наибольшую производительность процесса.

На рис. 19 — примеры электроискрового разрезания профилей на дисковой пиле, где электродом-инструментом служил диск из кровельного железа. Швеллеры размером от № 6 до № 16 разрезались за 20–84 секунды. Уголки размером от № 4 до № 10 — от 12 до 50 секунд. Железнодорожный рельс разрезался за 90 секунд. Внизу заготовки хромистой стали Ø 50 мм, разрезанные на пяти разных режимах — грубых и чистовых. На рис. 20 — разрезанный рельс на фоне электрода-диска.

Показательно шлифование слоистых магнитопроводов, набранных из отдельных металлических пластин, изолированных одна от другой и предназначенных для трансформаторов, дросселей, якорей и статоров электрических машин, чтобы уменьшить магнитные потери. Однако при обработке этих магнитопроводов заусенцы, появляющиеся в результате абразивного шлифования, соединяют отдельные пластины, вследствие чего появляются замкнутые витки и, как следствие этого, — резко возрастают магнитные потери. Электроискровое шлифование не дает заусенцев, поэтому оно весьма желательно при шлифовании магнитопроводов. На рис. 21 представлен ротор электродвигателя, правая часть которого отшлифована абразивным диском, а левая — электроискровым способом. На рис. 22 — пример электроискрового круглого шлифования магнитного сплава и схема модернизированной шлифовальной головки с изоляцией шпинделя и коллектором с токоподводом через меднографитовые щетки. Шлифование осуществляется на напряжении 24 вольта от блока селеновых выпрямителей.

Интересным вариантом применения электроискрового способа явилось шлифование — приработка мукомольных валков Ø 250 мм в отработанном авиационном масле или смеси 2/3 машинного и 1/3 веретенного масел (рис. 23). Как известно, для размалывания зерна в муку от мельничных валков необходимы высокая механическая стойкость и определенная степень шероховатости, необходимая для захватывания зерна. Абразивное шлифование валков, изготовленных из отбеленного чугуна, было малоэффективным и требовало большого расхода абразивов и электроэнергии. При электроискровом процессе мельничные валки шлифуют друг друга. В этом случае нет электрода-изделия или электрода-инструмента. Полярность электродов (двух валков) периодически меняется. Таким образом, мельничные валки в процессе электроискровой обработки как бы пришлифовываются один к другому. Исследования, выполненные Б.М. Горбуновым, показали неоспоримые преимущества электроискрового шлифования по сравнению с абразивным. Время обработки и расход электроэнергии при этом сократились в 4 раза. Кроме того, в производственных

условиях установлено повышение производительности мельничных агрегатов на 20% при использовании валков, обработанных электроискровым способом.

Электроискровое шлифование отличается от процесса механического абразивного шлифования следующими особенностями:

- 1) осуществляется без какого-либо давления на «инструмент» и изделие;
- 2) электрод-инструмент в виде диска изготавливается из обычного серого чугуна, совершенно не нужен какой-либо абразивный материал;
- 3) одним и тем же диском с одной установки изделия, изменяя лишь параметры электрической схемы, можно осуществлять бесступенчатую шлифовку изделия – от грубой до самой чистой поверхности;
- 4) поскольку снимаемые частицы металла отделяются нормально к поверхности, отсутствует затирающее действие диска, благодаря чему после шлифовки все дефекты поверхности (например, микротрещины) легко обнаруживаются;
- 5) возможно одним и тем же диском шлифовать любые по твердости материалы, в том числе весьма вязкие;
- б) процесс шлифования можно совместить с одновременным упрочнением обрабатываемой поверхности путем легирования её в процессе обработки различными химическими элементами из межэлектродной среды.

Если сравнивать металлические образцы, один из которых изготовлен любым из методов механической обработки резанием, а другие – электроискровым способом, то ясно, что они очень сильно различаются даже по внешнему виду.

После механической обработки поверхность покрыта более или менее глубокими бороздками – следами воздействия режущих элементов инструмента. При этом поверхностный слой металла получает механический сдвиг в одном направлении. Поэтому как по внешнему виду, так и внутреннему состоянию металл неоднороден в различных направлениях. После электроискровой обработки вся поверхность покрыта накладывающимися одна на другую лунками и производит впечатление поверхности, обработанной мелкой дробью. При электроискровом легировании металл, выброшенный из анода, достигает катода (легируемой поверхности) и оседает на нем, имея такой вид, как будто на гладкую поверхность брошена пригоршня жидкой глины. В обоих последних случаях свойства поверхности идентичны во всех направлениях.

Электроискровой процесс позволяет значительно изменять исходные физические и химические свойства изделий. Поэтому Н.И. Лазаренко еще в 1960 г. обратила внимание на терминологию в этой области: *«Прежде всего, необходимо указать, что электроискровой способ разделяется на два основных технологических приема: обработку в жидкой среде и обработку в газообразной среде, которая имеет в практике несколько названий в зависимости от получаемого результата. Её называют электроискровым упрочнением, покрытием, улучшением, цементацией, наплавкой и т. п. Такое разнообразие названий не может быть признанным правильным и вызывает путаницу при внедрении этого нового способа. Поэтому процессу изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами в газообразной среде, очевидно, правильнее присвоить название, более полно его определяющее, а именно: «электроискровое легирование металлических поверхностей».*

Было выяснено, что даже простое «облучение» поверхности образца искровыми разрядами приводит к повышению стойкости изделия на истирание. Кроме того, повышается его коррозионная стойкость. Уже в конце 1940-х – начале 1950-х годов электроискровое легирование – упрочнение режущего инструмента – получило широкое распространение. Изучению этого процесса было посвящено много диссертаций. На рис. 24 представлена электроискровая установка УПР-1 для поверхностного легирования и росписи металлических поверхностей, разработанная ЦНИЛ-Электром НИИ-627 МЭП СССР. Вибратор установки включен потенциометрически на балластное сопротивление, благодаря чему частота его срабатывания увеличивается с уменьшением емкости. Это приводит к тому, что скорость нанесения покрытия при переходе к более мягким режимам не уменьшается. Вес вибратора – всего 120 г. Вибрационная система расположена в его корпусе. Кроме того, установка оснащается электропером для нанесения росписи на любых металлах.

Многие предприятия различных отраслей промышленности, находившиеся в Бердянске, Воронеже, Ленинграде, Комсомольске-на-Амуре, Куйбышеве, Новосибирске, Омске, Харькове и др., не располагая возможностью централизованного получения электроискрового оборудования, вынуждены были проектировать и изготавливать это оборудование своими силами.

Ленинградский завод киноаппаратуры КИНАП освоил серийный выпуск электроискровых установок КЭИ-1 для легирования металлических поверхностей (рис. 25). Установка имеет

двухполупериодный выпрямитель на газотронах ВГ-129, питающий контур искрового разряда. Харьковский тракторный завод также выпускал электроискровые установки для легирования металлов собственной конструкции (рис. 26). В конце 1940-х гг. электроискровое легирование разнообразного режущего инструмента из быстрорежущих сталей и вырубных штампов получило широкое применение. Так, на заводе «Электросила» имени С.М. Кирова электроискровому легированию подвергалось 20% всех видов инструмента и до 70% штампов. На Кировском заводе электроискровому легированию подвергались выпускаемые инструментальным цехом фасованные и канавочные резцы, спиральные сверла, цилиндрические, дисковые и концевые фрезы, пилы Геллера, зенкеры и напильники. Это увеличивало их стойкость в 5–6 раз.

Из всех промышленных электроискровых установок, выпускаемых в Советском Союзе в те годы, наибольшего внимания заслуживают установки Ленинградского карбюраторного завода им. В.В. Куйбышева, который, по сути, в течение многих лет был основным поставщиком электроискрового оборудования для отечественной промышленности и некоторых зарубежных стран. Этим мы обязаны талантливому инженеру Е.М. Левинсону, который внес неоценимый вклад в развитие электроискрового способа обработки металлов.

Из многочисленных процессов электроискровой технологии процесс изготовления отверстий в деталях топливной аппаратуры полностью вытеснил в Советском Союзе из производства операцию механического сверления этих отверстий. Опытом установлено, что процесс изготовления отверстий диаметром 0,35 мм в сталях является граничным, когда производительность электроискровой и механической обработки металла, поддающегося резанию, приблизительно одинакова. А по мере уменьшения диаметра отверстий трудности их сверления резко возрастают, в то время как производительность электроискровой обработки держится почти на одном уровне (даже при применении РС-генератора и керосина в качестве межэлектродной среды). Одна из первых попыток применения электроискровой обработки в основном производстве была предпринята в 1948 г. – переход на электроискровое изготовление отверстий диаметром 0,15 мм в деталях дизельной топливной аппаратуры. Объектом обработки являлся распылитель из сравнительно твердой стали 50ХФА, в носике которого требовалось просверлить шесть сопловых отверстий диаметром 0,15+0,01 мм (рис. 27). Начатое в 1947 г. производство отечественных насос-форсунок и принятая при организации их производства американская технология сверления отверстий на специальных станках (рис. 28) с горизонтальным расположением шпинделя при скорости его вращения до 60 000 об/мин не удовлетворяли темпам роста их выпуска.

В 1947–1948 гг. при изготовлении отверстий  $\varnothing 0,15^{+0,01}$  мм в массово-выпускаемых деталях (распылителях дизельной топливной аппаратуры) электроискровой метод полностью вытеснил операцию механического сверления. На рис. 29 представлена электроискровая установка Ленинградского карбюраторного завода ЛКЗ-20 для изготовления отверстий в распылителях дизельных насос-форсунок. При этом уже на первых порах, то есть без каких-либо элементов автоматизации, производительность возросла в 6 раз, а брак снизился до 0,5 %. Позднее на участке электроискровой обработки отверстий, оснащенный полуавтоматическими установками, производительность возросла в 300 раз. На рис. 30 показана часть цеха Ленинградского карбюраторного завода, где в деталях топливной аппаратуры (в распылителях топлива) электроискровым способом изготавливаются отверстия  $\varnothing 0,15+0,01$  мм, площадь сечения которых значительно меньше 1 мм<sup>2</sup>. На рис. 31 представлена электроискровая узкоспециализированная установка ЛКЗ-34, предназначенная для обработки деталей массового выпуска (одного типоразмера). На ней обрабатываются распылители дизельных насос-форсунок, в которых одновременно изготавливаются шесть отверстий  $\varnothing 0,15+0,01$  мм. Производительность обработки распылителей с шестью отверстиями в каждом – 900 шт. за 8 часов.

Завершающим этапом автоматизации электроискровой обработки сопловых отверстий в распылителях на ЛКЗ является создание автомата, не требующего участия оператора в процессе обработки (рис. 32). На нём распылители 7 засыпаются в бункер 30 с вращающимся диском 29. Засыпка бункера производится на 8-10 часов непрерывной работы автомата. Один работник может обслужить большой парк таких автоматов. С момента перехода от механического сверления на электроискровую обработку производительность выросла в 300 раз!

Уже к 1949 г. Ленинградский карбюраторный завод им. Куйбышева выпустил более 1000 электроискровых установок 48 моделей и модификаций. Среди них не только установки для обработки деталей массового выпуска – распылителей дизельных насос-форсунок для впрыска топлива, в которых изготавливаются отверстия  $\varnothing 0,15+0,01$  мм. Кроме того – установки для инструментальных производств:

- ЛКЗ-57 для изготовления мелких вырубных штампов и профильных фильер из твердых сплавов и сталей (рис. 33);
- ЛКЗ-49 для прорезания узких щелей латунной или медной лентой в деталях из твердых сплавов, стали и цветных металлов (рис. 34);
- ЛКЗ-55 для разрезания тонким вращающимся диском твердосплавных деталей и раскря твердосплавных пластинок, прорезания щелей в цангах и втулках (рис. 35);
- Для электроискровой заточки инструмента и шлифования деталей из различных материалов;
- Для изготовления полостей крупных кузнечных штампов...

В 1951 г. издательство Машгиз выпустило монографию Е.М. Левинсона и Е.И. Владимировой «Электроискровые установки», а многие электроискровые установки, созданные за рубежом, были сделаны по типу конструкций завода ЛЕНКАРЗ.

Значительный вклад в развитие электроискровых технологий, в автоматизацию процессов внес и Б.Г. Гуткин (Ленинградский филиал ВПТИ МТрМ). Он создал ряд полуавтоматических установок для изготовления отверстий  $\varnothing 0,15-0,3$  мм с точностью от 0,006 до 0,02 мм в распылителях и для шлифования их рабочего конуса, а также для изготовления сеток с круглыми отверстиями малого диаметра. Его опыт в этом был описан в монографии «Автоматизация электроискровых и анодно-механических станков» (изд-во. Машгиз, 1952), в статье «Электроискровые полуавтоматы для обработки отверстий малого диаметра» (в кн.: Новые методы электрической обработки металлов. М. – Л., 1955).

16 мая 1956 г. Промышленно-экономическая газета в № 46 писала о том, что на Харьковском тракторном заводе имени Серго Орджоникидзе электроискровая лаборатория и отдел главного технолога сконструировали и изготовили 8-шпиндельный электроискровой станок для шлифовки корпуса распылителя топливного насоса трактора ДТ-54 (рис. 36). На нём обрабатываются одновременно восемь деталей. Производительность станка – до 1000 деталей в смену. Станок обслуживается одним рабочим. На снимке – инженер В. Половнев осматривает детали, обработанные Л. Наторовой на этом станке.

Диапазон применения электроискровых установок стал распространяться как на обработку деталей, величина которых измеряется в микронах, так и крупных изделий, вес которых достигает нескольких тонн.

Однако анализ развития электроискрового способа в этот период показывает, что основные усилия исследователей были направлены на рост производительности процесса за счет увеличения энергии и длительности разрядов – до нескольких джоулей и сотен или тысяч микросекунд соответственно. Господствовало стремление получать максимальную интенсивность съема металла в единицу времени – за один искровой разряд. Однако это приводило к существенному снижению точности обработки и ухудшению качества обработанной поверхности, появлению проблем с удалением из зоны обработки продуктов эрозии, структурным изменениям в поверхностном слое материала. Точность изготовления деталей определялась сотыми или даже десятными долями миллиметра, а шероховатость обработанной поверхности составляла не менее 5–10 мкм  $R_a$ .

В середине 50-х годов распространялось даже мнение, что предел возможностей электроискровой технологии достигнут, особенно в отношении точности и минимальной шероховатости, и что этот способ нельзя применять для окончательной обработки. **Некоторые исследователи даже утверждали, что при малых энергиях и длительностях импульсов будет отсутствовать съем материала.**

Столь одностороннее направление работ привело в конечном итоге к значительной задержке развития в СССР такого перспективного направления, как электроискровая прецизионная обработка.

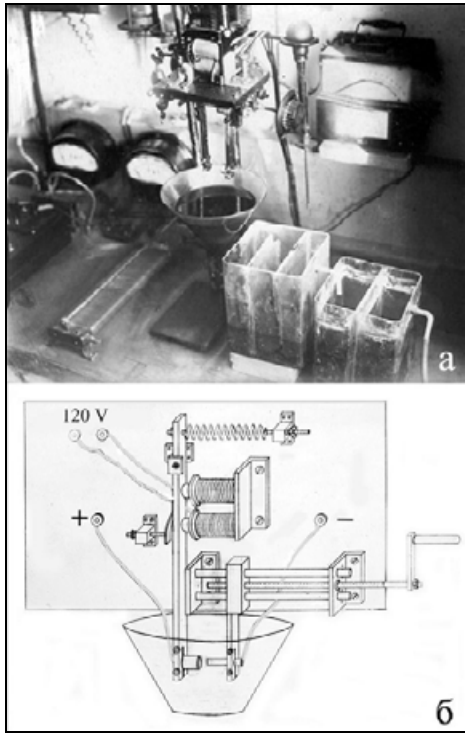
Процессы обработки с максимально возможной производительностью в СССР в то время развивали Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков (ЭНИМС) и СКБ электроэрозионного оборудования Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности. Ими был создан ряд станков (4В721, 4В722, 4723, 4А724 и др.), на которых точность обработки деталей не превышала 0,02–0,07 мм, а наименьшая шероховатость обработанной поверхности лежала в пределах 10–25 мкм.

В это же время, в начале 1950-х гг., за рубежом начали создаваться фирмы, занимающиеся разработкой электроискрового (ЭИ) оборудования.

В их числе – швейцарские компании AGIE и Charmilles. В 1953 г. Кёси Иноуэ зарегистрировал первую в Японии и одну из первых в мире компаний по производству электроискровых станков Japax. В Японии уже с 1949 г. работы по ЭИ обработке велись в рамках исследовательской фирмы – Японского института электроискровой обработки металлов. В названии фирмы JAPAX – Japan (Япония) + X (движение в будущее, неизведанное).



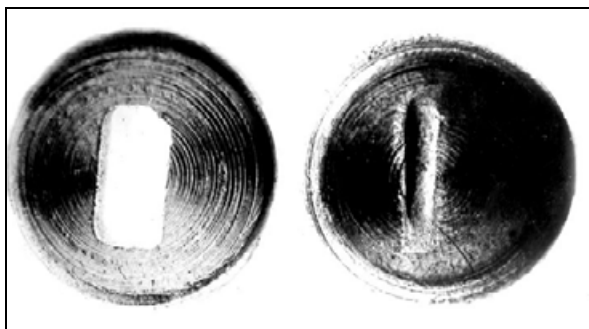




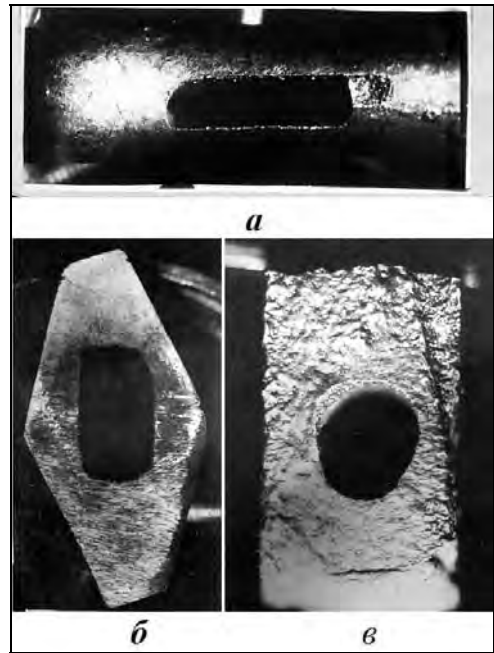
**Рис.1** Первая электроискровая установка для изготовления порошков («воронка»), на которой впервые в мире была открыта возможность применения электроискрового способа для обработки металлов



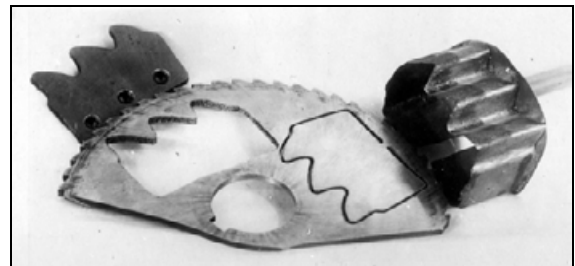
**Рис.2** Материал электродов, измельченный электрическими разрядами



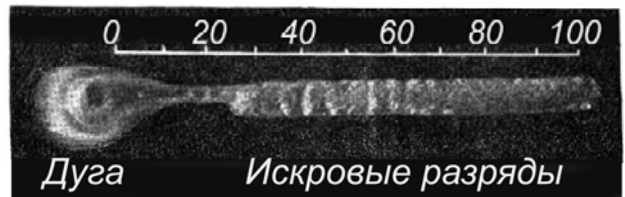
**Рис.3** Внешний вид электродов, на которых впервые была доказана возможность размерной обработки токопроводящих материалов искровыми импульсами электрического тока (1943 г.)



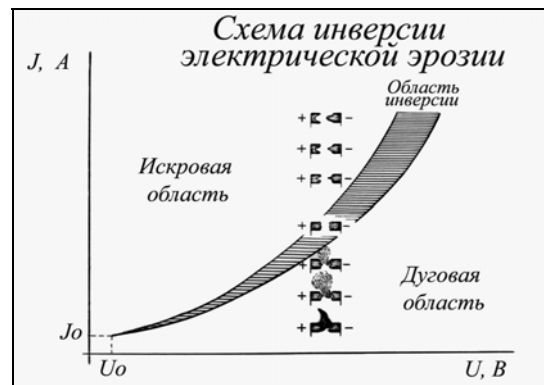
**Рис.4** Первые отверстия, изготовленные электроискровым способом медным инструментом: а) в вольфраме, б) в твердом сплаве, в) в магнитном сплаве (1943 г.)



**Рис.5** Контурное вырезание элемента пилы трепанацией



**Рис.6** Эрозиограмма дуговой и искровой форм разряда



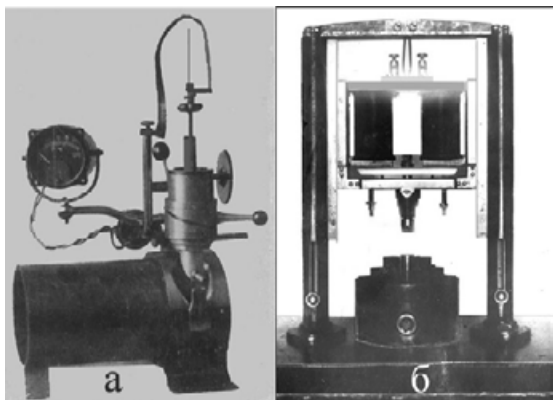
**Рис.7** Схема инверсии электрической эрозии



**Рис.8** Восьмигранные отверстия, изготовленные в стальной фрезе дуговым и искровым электрическими разрядами



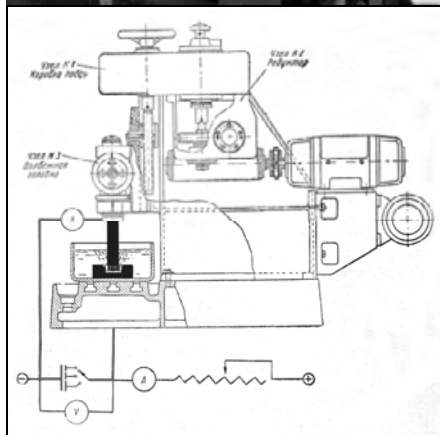
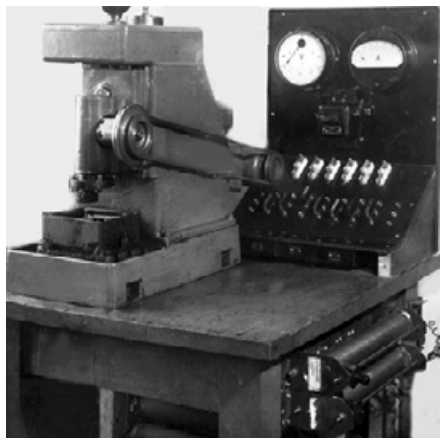
**Рис.11** Надпись «НАУЧИТЕСЬ ДЕЛАТЬ ЧЕРНУЮ РАБОТУ В НАУКЕ!», выполненная электроискровым способом на стекле



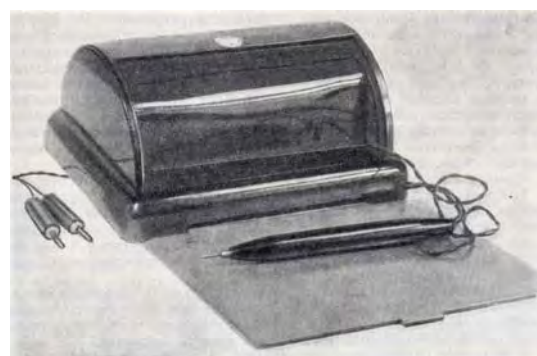
**Рис.9** Устройство (а) для извлечения сломанного инструмента из корпусов реактивных снарядов «Катюша» и одна из первых установок с вибратором (б)



**Рис.12** Портрет В.И. Ленина и картина «Тройка», выполненные на пластинах вороненой стали электроискровой росписью серебром (1947 г.)



**Рис.10** Электроискровой станок контактного действия ЭПС-КМП (1944 г.)

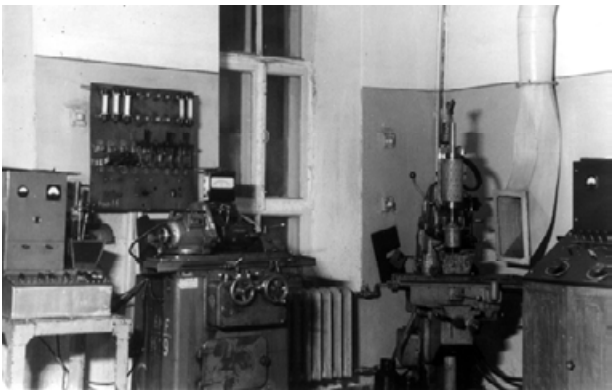
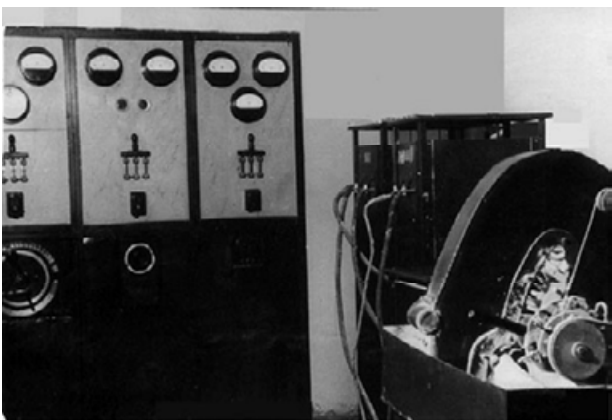


**Рис.13** Аппарат для гравировки и росписи (1957 г.)





**Рис.14** Б.Р. Лазаренко (в центре) среди сотрудников лаборатории электроискровой обработки материалов МАТИ. Слева направо: Т.И. Макеева, Д.З. Митяшкин, А.М. Белов, Б.Н. Лямин (1948 г.)



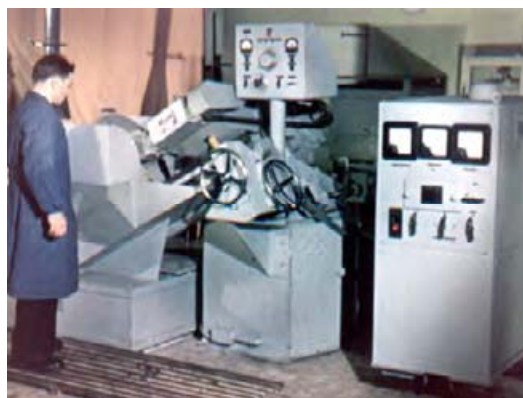
**Рис.15** В лаборатории электроискровой обработки материалов МАТИ (1948 г.)



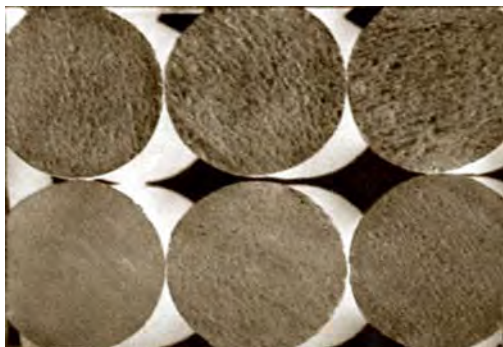
**Рис.16** Из программы научно-технической конференции студентов (1949 г.)



**Рис.17** Б.Р. Лазаренко среди молодых ученых ЦНИЛ-Электром. Слева направо: Б.Р. Лазаренко, В.К. Невежин, Б.Н. Золотых и Е.А. Деев (1950 г.)



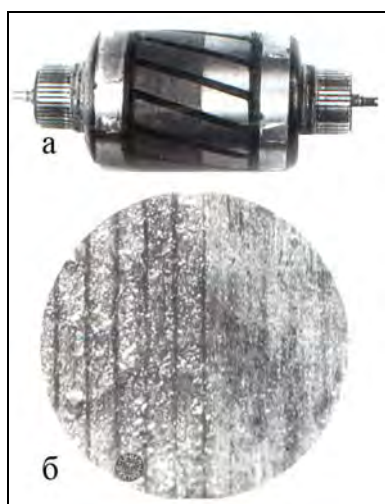
**Рис.18** Экспериментальная электроискровая установка для разрезания различных материалов движущейся лентой



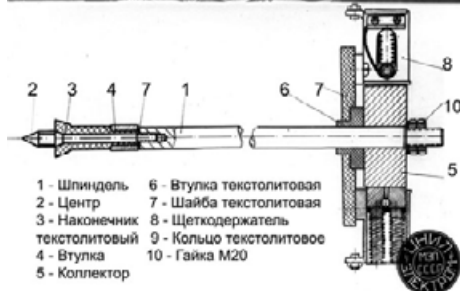
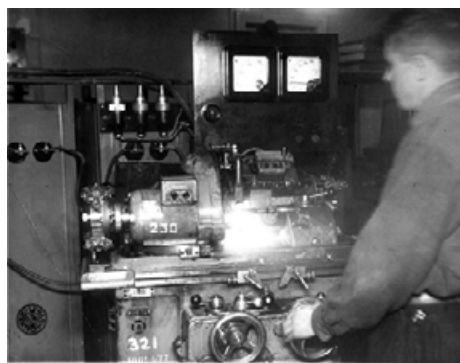
**Рис.19** Примеры электроискрового разрезания профилей на дисковой шпindle, где в качестве электрода-инструмента использовался диск из кровельного железа



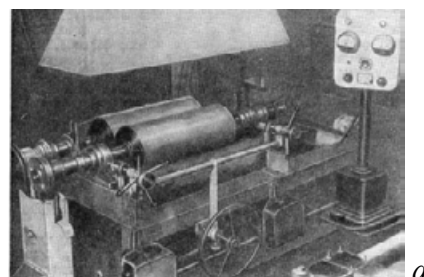
**Рис.20** Разрезанный рельс на фоне электрода-диска из кровельного железа



**Рис.21** Ротор электрической машины после шлифования: **а** – при помощи абразива (левая часть ротора), **б** – то же, но при увеличении



**Рис.22** Электроискровое круглое шлифование магнитного сплава и схема шлифовальной головки с изоляцией шпинделя и коллектором с токоподводом через медно-графитовые щетки



**Рис.23** Установка для электроискрового шлифования – приработки мукомольных валков (**а**), вид (**б**) и микрофотография (**в**) их поверхности.  $R_a = 20 - 25$  мкм (1960 г.)

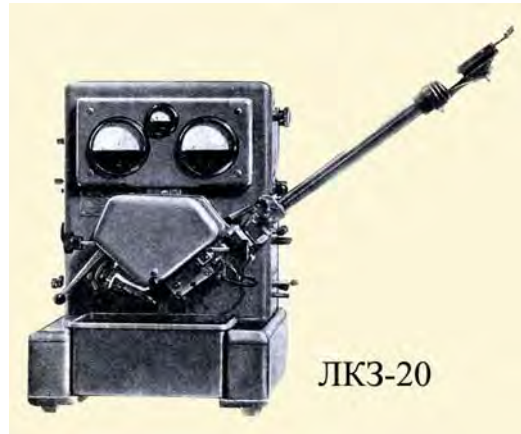




**Рис.24** Аппарат КЭИ-1 для электроискрового легирования и сборочный цех аппаратов на ленинградском заводе КИНАП (1949 г.)

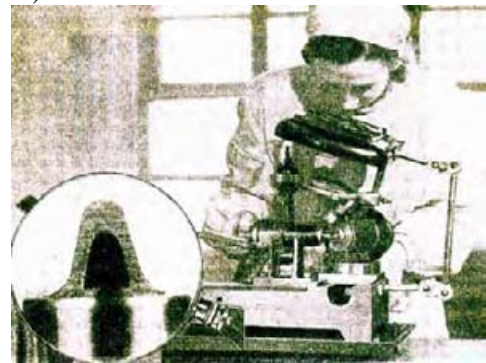


**Рис.25** Электроискровая установка легирования металлических поверхностей Харьковского тракторного завода

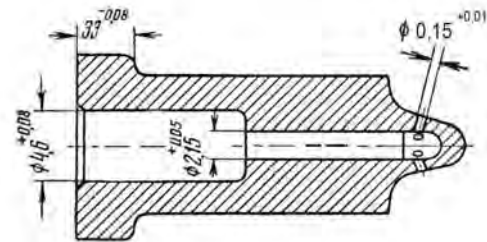


ЛКЗ-20

**Рис.26** Электроискровая установка ЛКЗ-20 для изготовления отверстий  $\varnothing 0,15^{+0,01}$  мм в распылителях дизельных насос-форсунок (1957 г.)



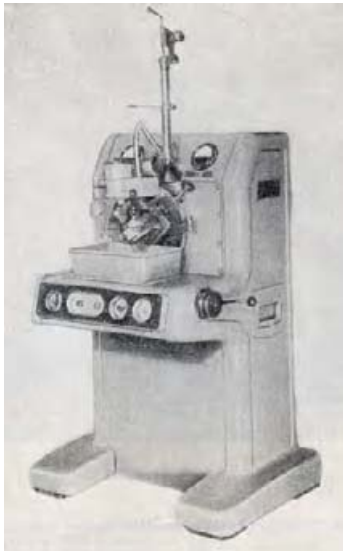
**Рис.27** Сверление отверстий  $\varnothing 0,15$  мм в распылителях для насос-форсунок на быстроходном сверлильном станке с пневматическим приводом



**Рис.28** Распылитель насос-форсунок



**Рис.29** Часть цеха Ленинградского карбюраторного завода, где электроискровым способом изготавливают отверстия в распылителях топлива



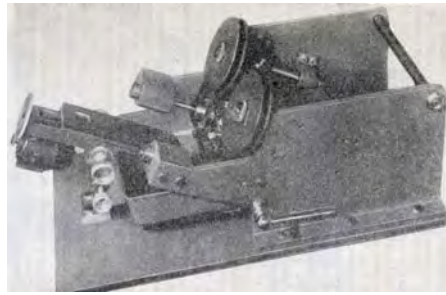
**Рис.30** Электроискровая узкоспециализированная установка ЛК3-34, предназначенная для обработки деталей массового выпуска (одного типоразмера)



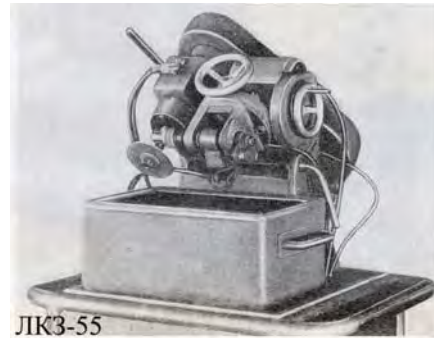
**Рис.31** Автомат для электроискровой обработки отверстий  $\varnothing 0,15$  мм



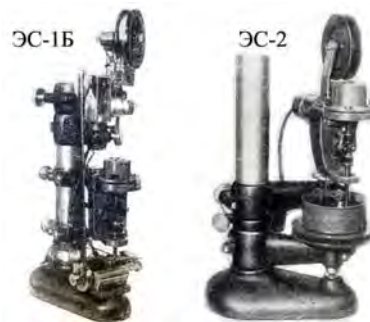
**Рис.32** Установка ЛК3-57 для изготовления мелких штампов, профильных фильер и волок



**Рис.33** Установка ЛК3-49 для прорезания узких щелей латунной или медной лентой



**Рис.34** Установка ЛК3-55 для разрезания тонким вращающимся диском



**Рис.35** Установки для изготовления сеток с круглыми отверстиями малого диаметра ЭС-1Б и ЭС-2



**Рис.36** 8-шпиндельный электроискровой станок для шлифовки корпуса распылителя топливного насоса трактора ДТ-54

⇒ Продолжение следует