

## К 70-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Человек всегда стремился к жизни в комфортных условиях, обеспечить которые мог прогресс в области создания и использования новых орудий труда. Около восьмисот тысяч лет тому назад было создано первое орудие труда – шелльское каменное рубило. Потребовались сотни тысяч лет, чтобы в результате проб и ошибок появились ашелльские орудия – овалы, круглые и утолщенные рубила. Затем прошли тысячелетия, и возникли мустьерские орудия – остроконечник и скребло.

Орудия труда положили начало историческому процессу преодоления противоречий между физиологической ограниченностью человека и все возрастающей потребностью создания и усовершенствования «второй природы». Бронза, а затем железо повысили возможности человека в этом отношении. С начала бронзового века начинается все усиливающаяся борьба за «покорение металла». В недрах ремесленного производства возникло производство машин-орудий с использованием режущего инструмента, что определило характер промышленной революции, вызвавшей огромный рост производительности труда.

Первейшее требование классического века металлообработки – использование в качестве инструмента резца, материал которого обязательно должен быть тверже обрабатываемого. Каждый раз появление нового материала порождало необходимость в еще более твердом резце. Проблема обработки материалов становилась все острее и могла стать тормозом на пути научно-технического прогресса. Замкнутый круг в обработке материалов был разорван нашими выдающимися соотечественниками Б.Р. и Н.И. Лазаренко, которые гениально заменили резец



Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко.

электрической искрой, т.е. электронным потоком.

В апреле 1943 г. в г. Свердловске сотрудники эвакуированного из Москвы Всесоюзного электротехнического института супруги Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко получили авторское свидетельство на изобретение № 70010 «Способ обработки металлов и других токопроводящих материалов».

Это событие явилось началом принципиально новой эпохи в тысячелетней истории технологии обработки материалов.

До открытия Б.Р. и Н.И. Лазаренко металлические изделия заданной формы получали преимущественно с помощью обработки резанием или давлением, заполнения жидким металлом полости формы, по конфигурации соответствующей детали (литейное производство), сварки. Эти методы обработки в большинстве случаев удовлетворяли условиям производства, использующего в качестве конструкционных и инструментальных материалов железоуглеродистые сплавы. Однако с появлением в начале прошлого века быстрорежущих сталей (1900 г.), твердых сплавов (1925 г.), а затем сверхтвердых материалов на основе карбидов, боридов, нитридов остро встала проблема их обработки. Образовался разрыв между возможностями металлургии (особенно порошковой), создающей материалы с более совершенными свойствами, и методами их обработки.

Техника требовала нового метода обработки материалов вне зависимости от их твердости, прочности и хрупкости.

Этот разрыв устранили советские ученые – супруги Лазаренко, которые предложили для обработки материалов использовать в качестве рабочего инструмента концентрированный поток электронов, возникающий при электрическом разряде. После открытия электроэрозионного метода обработки (ЭЭО) стало возможным не только осуществлять формообразование материалов вне зависимости от их твердости, прочности и хрупкости (электроэрозионная размерная обработка – ЭЭРО), но и изменять структуру, фазовый, химический состав поверхности материалов (электроискровое легирование – ЭИЛ), а также получать этим методом порошки заданных размеров (электроэрозионное диспергирование материалов – ЭЭД).

Предложенные после ЭЭО лазерный и электронно-лучевой методы расширили возможности технологии обработки материалов. При использовании этих методов происходят сходные физико-химические процессы, связанные с воздействием концентрированных потоков энергии на вещество. Общим для названных процессов является использование концентрированных потоков энергии не только для формообразования поверхностей, но и для их модификации.

Сразу же после открытия метод ЭЭО нашел практическое применение на одном из оборонных заводов в г. Свердловске, фронт получил дополнительно тысячи снарядов для легендарных «Катюш».

Широкому распространению метода как в СССР, так и за рубежом способствовали талант и целеустремленность молодых ученых, создание Б.Р. и Н.И. Лазаренко первого в мире электроискрового станка. Б.Р. Лазаренко считал в то время, что в области ЭЭО сделаны лишь первые шаги – «от многогранного процесса было взято лишь то, что лежало на поверхности».

Тесные рамки небольшой лаборатории – сначала заводской, а затем отраслевой – ограничивали проведение работ, связанных с решением проблем по исследованию процесса ЭЭО и использованию его в народном хозяйстве.

В связи с этим одной из основных задач в послевоенный период стал перевод лаборатории Б.Р. Лазаренко в систему АН СССР, а также создание научной школы.

Но только в 1955 г. лаборатория становится самостоятельной организацией союзного значения и переводится в систему АН СССР. Однако уже в 1961 г. в соответствии с постановлением правительства ряд институтов технического профиля АН СССР был передан в профильные министерства. Лабораторию Б.Р. Лазаренко перевели именно в то министерство, которое он резко критиковал за недостаточное внимание к методу ЭЭО и срыв планов по выпуску оборудования. Ученый опасался за судьбу своей лаборатории, понимая, что проводимые им и его учениками исследования ведут к новым открытиям и теоретическим обобщениям.



Б.Р. Лазаренко и его аспиранты Н.Г. Андреев, А.Д. Верхотуров, В.С. Сычев.

Уже в первых работах, да и впоследствии супруги Лазаренко неустанно подчеркивали, что «от электричества взято далеко не все, оно обладает многими возможностями, основанными на использовании более глубоких, еще неизвестных свойств».

Неукротимая энергия Б.Р. Лазаренко, постоянная генерация новых идей в различных областях знаний от электротехники до биологии, широкая эрудиция, инстинкт великого экспериментатора не терпели узких рамок отраслевых научных организаций, и он переехал в г. Кишинев, стал работать в Академии наук Молдавской ССР. Это был трудный выбор – уезжал он один: семья, друзья, ученики остались в Москве. С 1961 г. и до последних дней жизни (1979 г.) Б.Р. Лазаренко работал в АН Молдавии директором Института прикладной физики, с 1974-го – вице-президентом, создал институт с опытным заводом, научную школу, известную далеко за пределами СССР. Особое внимание в этот период он уделяет развитию метода ЭИЛ, материаловедческим аспектам формирования поверхностных слоев электродов после воздействия искровыми разрядами.

Еще в период работы во Всесоюзном электротехническом институте перед Б.Р. Лазаренко была поставлена задача, связанная с «борьбой против электрической эрозии материалов» и созданием безыносных электрических контактов. После многочисленных тщательных экспериментов по изысканию материалов, не поддающихся электрической эрозии, он делает вывод, что нет физических явлений «вредных», есть явления недостаточно изученные. А электрическая эрозия – неотъемлемое свойство любых токопроводящих материалов.

Особенность стиля научной работы Б.Р. и Н.И. Лазаренко – периодическая систематизация экспериментальных данных в виде определенных «обобщений». Начав с нескольких, в одной из последних они предложили уже 37 обобщений, касающихся не только ЭЭО, но и важнейших вопросов, имеющих отношение к прохождению электрического тока через электролит, воздействию электрического тока на живые организмы. Эти обобщения – своего рода итог большой теоретической и экспериментальной работы Б.Р. и Н.И. Лазаренко.

### **История открытия и развития метода ЭЭО (Екатеринбург, Москва, Кишинев)**

Стартом к открытию ЭЭО можно считать исследования Б.Р. Лазаренко, начатые в 1936 г. во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ), в лаборатории профессора В.В. Усова. В основу этих исследований было положено изучение инверсии электрической эрозии металлов и методов борьбы с разрушением контактов. Завершающий этап этой работы Б.Р. Лазаренко проводил в 1941 – 1943 гг. в Свердловске (ныне Екатеринбург), куда эвакуировали ВЭИ. Исследования велись совместно с Н.И. Лазаренко.

Было установлено, что за счет электрической эрозии электродных материалов под действием импульсных разрядов можно получить порошки любых металлов, сплавов и металлических композиций – от легкоплавких до самых тугоплавких. Во-вторых, работа контактной системы в искровой области практически всегда сопровождается перенесением материала электродов с анода на катод, что позволяет электроэрозионным способом получать покрытия почти всеми металлами на токопроводящих материалах. Для этого процесса авторы разработали три типа электродных устройств на основе вибрирующего и вращающихся дискового и щеточного анодов. Подобные конструкции широко используются в установках для ЭИЛ и в настоящее время.

При изучении влияние плотности тока на скорость образования порошковой массы было обнаружено, что электрод-катод, имеющий меньшую площадь, глубоко врезается в электрод-анод, при этом очень точно копирует на нем свою геометрическую форму и размеры. С помощью вращающегося диска катода можно разрезать любые токопроводящие материалы.

Электроэрозионное разрушение можно использовать как средство формообразования деталей из любых токопроводящих материалов.

В апреле 1943 г. супруги Лазаренко возвращаются в Москву в связи с тем, что туда из ВЭИ (Свердловск) в НИИ электромеханики был переведен отдел профессора А.С. Займовского. А уже в июне 1943-го на ученом совете ВЭИ Б.Р. Лазаренко защищает кандидатскую диссертацию «Инверсия электрической эрозии металлов и методы борьбы с разрушением контактов».

Здесь уместно привести выдержку из заключительной части первой небольшой книги, посвященной электрической эрозии (ЭЭ), написанной Б.Р. и Н.И. Лазаренко в 1944 г.: «Мы полагаем, что нам удалось показать, что можно действие отрицательных явлений (электрической эрозии) весьма эффективно использовать в промышленности. Результаты использования электрической эрозии показывают, что при этом мы имеем дело не только с сокращением расхода энергии, материала, рабочей силы и так далее. Более того, здесь со всей очевидностью встает вопрос об освоении новых производственных процессов, о внедрении в промышленности новой, во многих случаях единственно возможной технологии».

Поскольку в основе рассматриваемого способа лежит физический процесс, называемый электрической эрозией металлов, а применяемые для его осуществления электрические импульсы в большинстве случаев характеризуют искровую форму электрического разряда, то авторы уже в первых публикациях о способе дали название этому методу «электроэрозионная обработка металлов» (ЭЭО), или «электроискровая обработка металлов» (ЭИО). С тех пор под этими названиями он вошел в литературу, в том числе и в зарубежную.

Для изучения физических и технологических аспектов данного способа и разработки оборудования для проведения процесса ЭЭО токопроводящих материалов из отдела проф. А.С. Займовского была выделена лаборатория № 7, которую возглавил Б.Р. Лазаренко. Несмотря на тяжелые военные (1943 – 1945), а также первые послевоенные годы, поражает исключительно интенсивная и плодотворная научно-исследовательская и прикладная деятельность создателей способа ЭЭО. Как уже было отмечено, в 1944-м выходит в свет их первая книга под названием «Электрическая эрозия металлов», ставшая сенсацией в области технологии обработки металлов. В ней были намечены основные области использования ЭЭО в технологии машиностроения и приборостроения. Появление через год второй книги, в которой приведены конкретные конструкции станков электроэрозионного действия и описаны основные технологические характеристики электроэрозионного способа обработки металлов, вызвало бурное развитие ЭЭО в технологии машиностроения не только в СССР, но и за рубежом.

За этот же период под руководством Б.Р. Лазаренко небольшой коллектив лаборатории № 7 (она входила в состав НИИ электромеханики) впервые в мире создал ряд образцов электроэрозионных станков для изготовления штампов, гравирования, заточки инструмента, прошивочно-копировальных работ, резки металла. Эти разработки открыли путь для внедрения ЭЭО на промышленных предприятиях страны.

Комплекс работ, выполненных Б.Р. и Н.И. Лазаренко с 1943 г. по 1945 г., был высоко оценен государством – в июне 1946-го им была присуждена Государственная премия. В газете «Правда» от 27 июня 1946 г. их имена стояли в одном ряду с выдающимися учеными СССР членами-корреспондентами Академии наук СССР – М.В. Келдышем (впоследствии президент АН СССР), С.А. Христиановичем, Б.М. Вулом.

В июне 1948 г. Б.Р. Лазаренко защитил в Московском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана докторскую диссертацию «Электроискровой способ обработки металлов». На защите диссертации Б.Р. Лазаренко сказал: «...не может быть причин, которые бы приостановили развитие и движение этого революционного процесса, ломающего существующие представления об обработке материалов. Ему принадлежит будущее, и притом – ближайшее будущее».

Последующий ход развития ЭЭО металлов подтвердил его слова.

К тому времени большой объем физических и технологических исследований и значительное расширение сферы использования ЭЭО в машиностроении потребовали новой организационной структуры. В 1948 г. в составе НИИ электромеханики была создана Центральная научно-исследовательская лаборатория электрических методов обработки материалов (ЦНИЛ-Электром), которую возглавил Б.Р. Лазаренко. В 1955-м она вошла в систему АН СССР со статусом самостоятельного научно-исследовательского учреждения, с непосредственным подчинением Президиуму АН СССР. Это было не рядовое событие, и как оно произошло, рассказал один из самых первых и талантливых учеников Лазаренко Борис Никифорович Золотых, впоследствии д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Он отмечал, что в создании лаборатории ярко проявился огромный организаторский талант Б.Р. Лазаренко. Без активной поддержки, а порой даже при довольно сильном противодействии ему удалось к началу 50-х гг. создать Центральную лабораторию электрических методов обработки, ставшую к 1955-му научно-исследовательским центром общегосударственного значения.

К сожалению, с непониманием важности интенсивного развития и широкого использования ЭЭО в машиностроении со стороны некоторых организаций, – например, Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности СССР, его КБ, НИИ и руководящих специалистов, еще неоднократно будет сталкиваться Б.Р. Лазаренко.

Мы считаем своим долгом затронуть эти негативные явления, казалось бы, не имеющие прямого отношения к научно-исследовательским и практическим достижениям лаборатории Б.Р. Лазаренко, чтобы читатели поняли одну из причин, повлиявшую на современное состояние ЭЭО в Российской Федерации в сопоставлении с достижениями в данной области техники таких стран как США, Япония, Швейцария.

Большой научный задел, наличие молодого талантливого коллектива – все, что Борис



*Единомысленники и последователи Б.Р. Лазаренко.*

Романович успел создать за 1943–1948 гг., и его невероятная работоспособность заложили фундамент дальнейшего развития и практического использования ЭЭО в промышленности. Среди производственников Б.Р. Лазаренко приобрел единомысленников, которые высоко оценили возможности ЭЭО и стремились к совместной деятельности с ее авторами.

Уже в 1947-м в Ленинграде инженерами Е.М. Левинсоном и Е.И. Владимировым при участии Б.Р. Лазаренко был создан первый промышленный вариант копировально-прошивочного

станка с автоматическим приводом подачи электрода-инструмента. Значительный резонанс вызвала работа (при поддержке ЦНИЛ-Электром) инженеров Ленинградского карбюраторного завода, где электроискровое изготовление отверстий диаметром 0,15 мм в деталях дизельной топливной аппаратуры (взамен механического сверления) использовалось в массовом производстве.

Предварительный этап внедрения показал, что замена ручного механического сверления на электроискровую обработку на одном станке снижает брак с 50 до 0,5% при повышении производительности труда в 6 раз, а при использовании полуавтоматических электроискровых установок производительность одного оператора выросла в 300 раз. Позднее в работах Б.И. Ставицкого и его коллег, впервые в мире разработавших в НПП «Исток» технологию и оборудование для прецизионной электроискровой обработки деталей электронных приборов, показано, что этот процесс не только повышает производительность в десятки, а в отдельных случаях – в сотни раз, но и позволяет создавать элементы деталей для новых приборов, которые изготовить другими методами (лазерным, электроннолучевым, электрохимическим и т.п.) невозможно. Это был уникальный технологический прорыв в электронном приборостроении.

Замечательным примером совместной научно-исследовательской и конструкторской работы ЦНИЛ-Электром и НПП «Исток» является создание первого в мире промышленного прецизионного электроэрозионного проволочного станка с числовым программным управлением (ЧПУ мод. 4531). Поток таких разработок и внедрений нарастал очень быстро.

Отдельные примеры убедительно показывали широкие возможности ЭЭО и необходимость быстрее ее внедрения в машино- и приборостроение.

Создав принципиально новые способы обработки токопроводящих материалов – ЭЭО и ЭИЛ, супруги Лазаренко понимали, что для глубокого изучения и внедрения в производство этих способов необходимы увлеченные и инициативные, с высоким уровнем подготовки специалисты и единомышленники. Поэтому значительная часть их творческой жизни была связана с организацией научно-технического коллектива, который смог бы реализовать в настоящем и будущем все возможности сделанного ими открытия.

На первом этапе развития ЭЭО (1943–1945 гг.) Б.Р. Лазаренко начал создавать научно-технический коллектив на базе лаборатории № 7. В 1945 г. в НИИ электромеханики была открыта аспирантура и появился первый аспирант – инженер Борис Никифорович Золотых, выпускник физического факультета МГУ, перешедший в лабораторию № 7 с авиационного завода.

Учитывая уровень аспиранта, Борис Романович нацелил его на теоретические и экспериментальные работы физического плана. Б.Н. Золотых предложил модель процесса ЭЭО, основанную на тепловых явлениях (плоских источниках тепла), возникающих на электродах при низковольтных импульсных разрядах в жидкости.

Кандидатская (1948) и последующая докторская (1968) диссертации Б.Н. Золотых послужили базой теоретических и технологических основ процесса ЭЭО.

Б.Н. Золотых на высоком профессиональном уровне провел экспериментальные исследования явлений на электродах и в межэлектродном промежутке, протекающих при импульсных разрядах в диэлектрических жидкостях. Разработал модели, описывающие энергетические процессы в искровом разряде (тепловые в поверхностных слоях электродов, гидродинамические в межэлектродном промежутке), обосновал физические модели эвакуации материала (претерпевшего фазовые превращения) с поверхности электродов в объем рабочей среды и удаления твердых продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Эти исследования можно отнести к разряду классических. Надо отдать должное Борису Романовичу, к выбору

учеников он относился очень внимательно и строго. И вместе с тем, как вспоминает Б.Н. Золотых, несмотря на свой далеко не простой характер, никогда не подавлял инициативу сотрудников, давал «зеленую улицу» исследованиям, которые, казалось бы, шли вразрез с его собственными представлениями о сущности тех или иных явлений. И ярким примером этого может служить публикация двух статей, рассматривающих основы ЭЭО с разных позиций, которые напечатали в сборнике работ ЦНИЛ-Электром, изданных АН СССР. Их поместили рядом. Автором одной из статей был Б.Н. Золотых, другой – Б.Р. и Н.И. Лазаренко, причем ответственным редактором этого издания являлся Б.Р. Лазаренко.

После реорганизации в системе АН СССР ЦНИЛ-Электром в 1965 г. перестал существовать. Центр научных исследований в области новых направлений электрической обработки материалов переместился в Институт прикладной физики (ИПФ) АН Молдавской ССР. Научные разработки и исследования, относящиеся к области физики и технологии ЭЭО, возобновились в Московском институте электронного машиностроения – МИЭМ (ныне Московский государственный университет электроники и математики), на кафедре технологии электронного машиностроения под руководством Б.Н. Золотых. Перейдя на педагогическую работу в МИЭМ и проработав там в течение 40 лет, он подготовил немало инженеров, а также и большую группу кандидатов и докторов наук – второе поколение единомышленников Б.Р. Лазаренко. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, д-р. техн. наук. Б.Н. Золотых за творческий вклад в ракетно-космическую, электронную и атомную технику награжден правительственными наградами и медалями Федерации космонавтики РФ. Он решил большую часть задач, сформулированных его учителем.

Для успешного и быстрого развития и внедрения ЭЭО в практику Борис Романович уделял внимание изучению различных аспектов процесса, в том числе технологических и технических, связанных с разработкой и изготовлением механизированного и автоматизированного оборудования. После Б.Н. Золотых в лаборатории № 7 была защищена работа технологического плана Е.А. Володина, а затем – Н.Ф. Фатеева, вызвавшие широкий интерес у производителей. Практически новое направление в ЭЭО пришло с диссертационной работой Б.И. Ставицкого, первая встреча которого с Борисом Романовичем состоялась в 1950 г., когда он был еще студентом-дипломником.

Проблема специалистов в области ЭЭО материалов стояла очень остро, и для их подготовки в области электрических методов обработки материалов Б.Р. Лазаренко начал читать лекции для студентов Московского авиационного технологического института (МАТИ). Причем Бориса Романовича попросили руководить разработкой учебных планов для чтения курса лекций. Б.Р. Лазаренко понимал, что «...через год эти студенты станут первыми специалистами по электроискровой обработке, отряд наших единомышленников получит доброе пополнение». Он не ошибся – пройдут годы, и его дипломник Борис Иванович Ставицкий будет одним из признанных специалистов в области ЭЭО, при поддержке и тесном научном контакте со своим учителем впервые в мире разработает технологию и оборудование для прецизионной электроискровой обработки.

Благодаря трудам Б.И. Ставицкого, Е.В. Холоднова, В.Л. Кравченко, К.К. Гуларяна и других это направление превратится в самостоятельную отрасль машиностроения, называемую электроискровым прецизионным станкостроением, а ее основатели (Б.И. Ставицкий, М.М. Федоров, Е.В. Холоднов) удостоятся Ленинской премии.

Руководство научно-исследовательскими работами в Центральной лаборатории и организацию внедрения ЭЭО в промышленность Борис Романович сочетал с педагогической деятельностью в МАТИ, а также руководством рядом научно-исследовательских групп в НИИ, с

работой в Президиуме АН СССР, сначала в качестве ученого секретаря Президиума АН СССР, а затем – исполняющего обязанности заместителя академика-секретаря Отделения технических наук АН СССР.

В лаборатории ЦНИЛ-Электрома получили развитие исследования воздействия низко- и высокочастотных колебаний непосредственно на процесс электроэрозионной обработки. За комплекс выполненных работ коллектив в составе И.А. Бакуто, М.К. Мицкевича, В.К. Малышкина, Ж.А. Мрочка (ФТИ АН БССР), А.Ф. Бабицкого, Е.А. Ржановского был удостоен Государственной премии БССР.

Достаточно точно и полно характеризовал этот период деятельности Бориса Романовича Б.А. Беленький в книге, посвященной жизни и творчеству ученого: «Годы работы в президиуме АН в жизни Лазаренко оставили глубокий след. Общение с выдающимися учеными, работа под их руководством обогатили его как ученого и как организатора науки. Большая школа научила многому. А главное – мыслить широко, уметь сосредоточиться на главном, увлекать и вести за собой научную молодежь».

С конца 1955 г. по февраль 1958 г. Б.Р. Лазаренко находился в Китае в качестве советника при президенте АН КНР, где он участвовал в разработке перспективного плана развития науки и техники. После возвращения ученого в СССР в ЦНИЛ-Электром на стажировку была отправлена группа китайских специалистов. Здесь в течение 1959–1962 гг. они постигали теоретические основы и технику ЭЭО-материалов. А еще раньше, в конце 40-х – начале 50-х гг., сюда приезжали специалисты из социалистических стран Восточной Европы. Первым зарубежным учеником Лазаренко был талантливый инженер из Чехословакии Индржик Станек. Уезжая, он сказал: «Ваш метод, шеф, в Чехословакии найдет широчайшее применение». И слово сдержал. Его активная деятельность на родине способствовала тому, что Чехословакия одной из первых среди стран Восточной Европы начала проводить научные исследования и конструкторские работы в области ЭЭО для станкостроения. Проволочный вырезной электроискровой станок с фотоэлектрическим управлением движением по заданным координатам на Всемирной выставке «EXPO-58» в Брюсселе завоевал главный приз и Золотую медаль.

К началу 60-х гг. возникло и получило развитие международное сотрудничество в области электрических методов обработки материалов – Международный симпозиум по электрическим методам обработки (ISEM). В организацию и становление этого сотрудничества значительный вклад внесли Б.Р. Лазаренко (СССР), доктор-инженер И. Станек (Чехословакия), профессор, доктор Е. Матиас (Швейцария), доцент М.М. Шушка (Чехословакия), представители других стран. Симпозиум ISEM-1 был организован научно-техническим обществом ЧССР и состоялся в сентябре 1960 г. в Праге. Как отметил Б.Р. Лазаренко, ведущие специалисты в области электроискровой обработки металлов из 11 стран мира, впервые собравшись вместе, засвидетельствовали этим всеобщее признание электроискровой обработки материалов как новой области электрофизики, имеющей большое теоретическое и практическое значение. Можно условно считать 12 сентября 1960 г. (открытие первого симпозиума) днем рождения ЭЭО в мировом масштабе.

ISEM обеспечил интенсивный обмен опытом, который способствовал быстрому развитию научных и практических исследований в области ЭЭО-материалов. По договоренности симпозиум проводился раз в три года,

Много лет спустя – к 60-летию открытия ЭЭО – ученики Б.Р. Лазаренко из КНР прислали статью в журнал «Электронная обработка материалов» об экспериментальных и теоретических исследованиях ЭЭО в Китае. Они отметили большую помощь, оказанную им лично Борисом Романовичем и его сотрудниками в изучении и освоении процесса ЭЭО, а также сообщили о

достижениях их страны в этой области: 200 специализированных заводов по изготовлению электроэрозионного оборудования, 200 тысяч промышленных рабочих в этой области, более 15 тысяч станков с ЧПУ выпущено в 2002 г., при ежегодном увеличении 10-20% и т.п. В завершение статьи авторы написали: «В китайском народе говорят: «Пей воду и не забывай о том, кто вырыл колодец». Этой народной мудростью ученики Б.Р. Лазаренко очень верно оценили его жизненную и творческую деятельность.

Значительную роль в формировании нового научного направления «физика, химия и технология электрической обработки материалов» сыграло издание трудов Центральной научно-исследовательской лаборатории электрической обработки материалов под руководством Б.Р. Лазаренко, а также сборника «Физические основы электроискровой обработки материалов» под редакцией Б.А. Красюка. Но особое значение в этом отношении имел журнал «Электронная обработка материалов», созданный Б.Р. Лазаренко.

В 40-е 50-е гг. география использования ЭЭО и ЭИЛ охватила почти всю страну. Во многих промышленных городах РСФСР, Украины, Белоруссии и других республик Союза на предприятиях, в конструкторских бюро, в НИИ возникали центры по изучению физических основ ЭЭО и ЭИЛ, разработке технологий и оборудования для внедрения этих процессов в производство. Как правило, представители таких центров устанавливали контакты с ЦНИЛ-Электром, изучали ее научные и практические достижения, получали детальные консультации.

Лаборатория по сути стала Всесоюзным научным центром в области ЭЭО и ЭИЛ, а при ее вхождении в 1955 г. в состав АН СССР осуществляла координацию работ как головная организация.

В союзных республиках наиболее крупные центры по комплексному исследованию ЭЭО и ЭИЛ были созданы в Минске, в Физико-техническом институте (ФТИ) АН БССР, и в Киеве, в Институте проблем материаловедения (ИПМ) АН УССР. В 1964 г. к ним присоединился центр, созданный Б.Р. Лазаренко в Кишиневе, в Институте прикладной физики АН МССР.

В Москве основными задачами крупных ведомственных центров, созданных в 50-60-е гг., были изучение и разработка технологических процессов и создание оборудования для ЭЭО, достаточно широко были развернуты исследования в области ЭИЛ, научные и практические результаты которых нашли применение на авиационных и других предприятиях. Всесоюзный



Дальневосточники, доктора наук – последователи метода Б.Р. Лазаренко.

исследований по ЭИЛ именно в этом регионе.

институт авиационных материалов (ВИАМ) и Научно-исследовательский институт авиационной технологии (НИИАТ) проводили исследования в содружестве с ИПФ АН МССР, ИПМ АН УССР и Институтом металлофизики АН УССР. Практически это был еще один центр, работающий в области ЭИЛ, расположенный в столице РСФСР.

Для дальневосточников особый интерес представляет развитие

### **Развитие метода ЭЭО в Хабаровске**

После распада СССР центр по исследованию ЭИЛ переместился в созданный в 1991 г. Институт материаловедения ХабНЦ ДВО РАН в г. Хабаровске. Работы велись в следующих

направлениях: исследование физической сущности процесса ЭИЛ (С.Н. Химухин, С.А. Пячин), создание нового оборудования (С.В. Николенко) и новых электродных материалов (Ю.И. Мулин, С.В. Николенко), изучение физико-химических свойств легированного слоя (ЛС) (Ю.И. Мулин, С.Н. Химухин, Л.А. Коневцов).

По тематике ЭИЛ защищены две докторские диссертации (Ю.И. Мулин, С.Н. Химухин), а также 12 кандидатских (С.В. Николенко, С.А. Пячин, Д.В. Ярков, С.В. Коваленко, А.Н. Вишневский, А.В. Козырь, Т.В. Глабец, Д.Л. Ягодзинский, М.А. Теслина, Л.А. Коневцов, И.А. Астапов, А.А. Бурков). Кроме того, защищены кандидатские диссертации: А.М. Сундуковым – по ЭЭРО, М.И. Дворником – по электроэрозионному диспергированию твердых сплавов.

По исследованию процесса ЭИЛ Институт материаловедения тесно сотрудничает с ТОГУ (проф. Ри Хосен, зав. кафедрой «Литейное производство и технология металлов»), где была подготовлена и защищена кандидатская диссертация по ЭИЛ Е.В. Муромцевой, а также с Амурским госуниверситетом, где также была защищена кандидатская диссертация по ЭИЛ В.В. Соловьевым (руководитель – проф. В.А. Ким), и Комсомольским-на-Амуре государственным техническим университетом, где была выполнена и защищена докторская диссертация М.Ю. Сариловым по ЭЭРО материалов. Осуществляется непрерывное и плодотворное сотрудничество Института материаловедения с Институтом химии ДВО РАН (лаборатория д-ра техн. наук П.С. Гордиенко) по исследованию состава, структуры и свойств электроискровых покрытий.

...В 1961 г. Б.Р. Лазаренко избирают действительным членом Академии наук МССР и он становится директором Института энергетики и автоматики, который в 1964 г. был преобразован в Институт прикладной физики (ИПФ). ИПФ стал работать по двум крупным научным направлениям, которые условно можно назвать «физическое» (8 лабораторий) и «техническое» (6, а в дальнейшем – 8 лабораторий). Организатором, идейным и научным руководителем лабораторий электроискровой обработки материалов (ЭИОМ), импульсной газовой электроники (ИГЭ) был Б.Р. Лазаренко.

При ИПФ был создан Опытный завод (ОЗ) с конструкторским бюро (КБ), в 1965 г. начал выходить научный и производственно-технический журнал «Электронная обработка материалов» (ЭОМ), основанный Б.Р. Лазаренко, остававшимся его главным редактором вплоть до своей кончины 26.08.1979 г.). С 1979 г. и по настоящее время главным редактором издания является академик М.К. Болога. Журнал переиздается на английском языке в США под названием «Surface Engineering and Applied Electrochemistry».

Журнал стал важным источником информации по новым электрическим методам обработки материалов.

Исследования по электродинамической теории ЭЭО Борис Романович начал еще в Москве, и эти работы были успешно продолжены в лаборатории ЭИОМ. Чтобы расширить сферы использования электрической эрозии для обработки неметаллических материалов, в лаборатории ИГЭ были начаты исследования особенностей электроэрозии некоторых групп монокристаллов полупроводников и полуметаллов (германий, кремний, соединения  $A^3B^5$  – InSb, GaSb, CdSb, InAs, GaAs, InP, GaP; карбид кремния, Bi, Sb, сплавы Bi-Sb), проводившиеся под руководством Б.Р. Лазаренко и С.П. Фурсова А.Е. Гитлевичем.

Изучались электроэрозионные явления на поверхности полупроводниковых монокристаллов при воздействии импульсных разрядов в жидкости и вариант переноса материала с металлического электрода на поверхность полупроводника с целью формирования омических и выпрямляющих контактов. Было установлено, что электрическая эрозия монокристаллов полупроводника приводит к появлению поликристаллического слоя в зоне воздействия разряда. Дефектность монокристалла в зоне разряда связывалась с пластической деформацией, изучаемой по распределению дислокаций, выявляемых методом избирательного травления. На

монокристаллах дислокации можно было наблюдать только после предварительного удаления поликристаллического слоя. Избирательное травление, проведенное сразу после воздействия разряда, не выявило дислокаций вблизи и в области зон поражения монокристалла разрядом. Они обнаруживались только в том случае, когда образцы перед травлением подвергались отжигу. Если кристаллы протравить сразу после воздействия электроискрового разряда, а затем отжечь, то вторичное травление не обнаруживает дислокаций, возникающих в результате электрической эрозии. Это свидетельствует, что генерация и движение дислокаций – результат реализации энергии, накопленной в тонком напряженно-деформированном слое кристалла. Удаление этого слоя при травлении устраняет источник дислокаций. Характерно, что минимальная температура отжига, требуемая для появления дислокаций в зоне электроэрозии, соответствует температуре разупрочнения и началу температурной зависимости микротвердости, обнаруженной при исследовании механизма пластической деформации материалов с ковалентными связями.

Используя этот эффект, показали возможность создания локальных p-n переходов в зоне воздействия разрядов за счет того, что диффузия соответствующих элементов в объем монокристалла проходит на большую глубину (диффузия идет по дислокациям, генерируемым напряженно-деформируемым слоем), чем на необработанных участках.

Напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев, полученных в результате воздействия импульсных разрядов, служит не только источником дислокаций, интенсифицирующих диффузионные процессы при отжиге, его можно использовать и для гетерирования различных типов дефектов в монокристаллах полупроводников.

С самого начала изучения и использования ЭИЛ авторов этого метода интересовал механизм ограничения толщины формируемого слоя на катоде (детали). Достаточно большой круг основных (базовых) исследований по ЭИЛ впервые проведен Н.И. Лазаренко. Обоснование ограничения толщины формируемого слоя на катоде связывалось с химическим взаимодействием материалов электродов с элементами межэлектродной среды при ЭИЛ в воздухе с образованием твердых растворов, окислов и нитридов, препятствующих взаимодействию вновь поступающих на катод порций материала анода с уже нанесенными, а также с «охрупчиванием» и разрушением сформированного слоя. В дальнейшем установлено, что на наличие максимума на кривой массопереноса могут сказываться появление и накопление дефектов кристаллической решетки в подложке и нанесенном слое, возникновение напряжений и т.п.

Цикл исследований ЭИЛ в различных межэлектродных средах показал возможность существенного улучшения количественных (массопереноса) и качественных (равномерность, сплошность, пористость, однородность структуры, уменьшение окислов, нитридов и т.д.) показателей формируемых на катоде слоев при обработке в инертных и восстановительных газах. Но вопросы с ограничением толщины наносимых слоев на катоде и природа этого явления остались открытыми, что и послужило одной из причин проведения научно-исследовательских работ по влиянию вакуума на процесс ЭИЛ.

Эти исследования выполнил аспирант ИПФ С.З. Бакал под руководством супругов Лазаренко. Работа велась в содружестве с ИПМ АН УССР. Также был разработан бесконтактный вариант нанесения покрытий при ЭИЛ в вакууме, при котором с помощью электрического поля часть продуктов электроэрозии осаждалась на подставной электрод. Например, получены покрытия из молибдена на алюминии, меди, коваре и т.п.

Впоследствии возник вопрос о продолжении подобных исследований по ЭЭО и ЭИЛ монокристаллов полупроводников с целью изучения обнаруженных явлений на других группах монокристаллов и оценки их практического приложения. Борис Романович посчитал актуальным сосредоточить усилия на физических и технологических аспектах ЭИЛ, начать работы по созданию новых вариантов ЭИЛ, источников импульсов, механизированного,

автоматизированного и специального оборудования для расширения сферы промышленного использования метода. Это было связано с запросами промышленности и возможностью организации выпуска различных типов установок на опытном заводе (ОЗ), который уже с 1964 г. начал разработку и готовил к выпуску серию установок типа ЭФИ-Электром (модернизированный вариант установки Электром-5, созданной в ЦНИЛ-Электром под руководством Н.И.Лазаренко). В тот же период началась разработка и более мощной установки Электром-25 для ЭИЛ крупногабаритных деталей.

Проблему молодых специалистов в области ЭЭО, ЭИЛ и других сферах электрофизических методов Борис Романович решил как и в свое время в Москве. В 1967 г. он начал читать курс лекций по обработке материалов в Кишиневском политехническом институте (КПИ) и уже в конце 60-х – начале 70-х гг. в ИПФ и на опытный завод пришла большая группа выпускников КПИ. В лабораториях появились молодые инженеры В.В. Михайлов, В.Н. Ткаченко, А.В. Рыбалко, А.М. Парамонов, Н.Я. Парканский. Вскоре они поступили в аспирантуру. Знания, которые они получили, слушая лекции Б.Р. Лазаренко, и увлечение его идеями помогли им быстро войти в научно-исследовательский процесс и приступить к выполнению самостоятельных заданий. С целью тематического объединения работ новых специалистов в июле 1971 г. Б.Р. Лазаренко издает приказ об организации экспериментально-технологической группы ЭИЛ (руководитель А.Е. Гитлевич).

Спектр НИР для молодых специалистов был широкий: от исследований в области физики импульсных разрядов, материаловедения металлов и сплавов до создания новых технологических приемов и конструкторских разработок.

Эффективным оказался процесс выполненный под руководством А.Д. Верхотурова при комбинированной обработке безвольфрамовых твердых сплавов типа КНТ. Почти одновременно независимые работы выявили возможность использования предварительного электроискрового легирования поверхностей деталей или инструмента для интенсификации диффузионных процессов. Исследования, выполненные В.В. Михайловым, подтвердили, что с помощью вращающегося электрода-инструмента можно увеличить производительность ЭИЛ в 3-4 раза, формировать покрытия 100% сплошности при толщине более 0,2-0,5 мм.

Подход к формированию коррозионностойких поверхностных слоев методом ЭИЛ, предложенный Борисом Романовичем в совместных работах с ВНИИК, был реализован в дальнейших исследованиях и завершился внедрением в промышленность в начале 80-х гг. Изучение возможностей использования ЭИЛ для коррозионной защиты металлических деталей и конструкций было продолжено в сотрудничестве с Институтом физической химии (ИФХ) АН СССР, в лаборатории коррозии сплавов, руководимой профессором Н.Д. Томашовым, с участием д-ра хим. наук Г.П. Черновой, Л.П. Корниенко, Т.А. Федосеевой, Т.В. Чукаловской, В.В. Бандуркина, Т.Н. Устинской и др.

ИПФ и опытный завод разработали и изготовили установку типа «Плоскость-3», оснащенную различными источниками импульсов, вибрирующим и многоэлектродным вращающимся инструментом. Образец такой установки был поставлен в г. Ижевск на автозавод, где изучалась возможность использования ЭИЛ для защиты от коррозии относительно больших по площади ( $\geq 1\text{ м}^2$ ) плоских конструкций автомашин из стали 3 путем формирования покрытий из алюминия или его сплавов. Эту совместную работу провели специалисты автозавода, Ижевского государственного университета, Физико-технического института Уральского отделения АН СССР.

При исследовании отмечено, что возможности ЭИЛ позволяют реализовать одновременно два механизма коррозионной защиты – электрохимический и кроющий.

Кроющий механизм защиты от коррозии методом ЭИЛ обоснован в работе А.В. Козырь в Институте материаловедения ДВО РАН.

В работе Т.В. Глабец часть исследований связана с изучением электрохимических и коррозионных свойств стали 45 при ЭИЛ переходными металлами V–VI, VIII групп. Агрессивной средой служила 0,1; 0,01; 0,001 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Определяющую роль в защите от коррозии в агрессивной среде играет физико-химическая природа легирующего материала. Переходные металлы Cr, Co, Ni и некоторые другие могут обеспечить протекторный и кроющий механизм коррозионной защиты стали 45.

Одним из эффективных методов, предотвращающих коррозию металлоконструкций в грунте, является катодная защита (КЗ), которая осуществляется с помощью малорастворимых анодных материалов. В лабораториях электроискровой обработки материалов и гальванических покрытий ИПФ АНМ выявлены возможности формирования методом ЭИЛ покрытий на титане в качестве малорастворимых анодов (МРА) для КЗ. Следует отметить, что возможности ЭИЛ в области коррозионной защиты выявлены далеко не полностью. Исследования показали большие возможности метода для получения покрытий с эффективными электрохимическими и коррозионными характеристиками. Широкое практическое использование ЭИЛ в этом направлении ждет своих решений.

На твердом сплаве ВК6 положительный эффект по созданию легированного слоя (ЛС) впервые отмечен в работах И.А. Подчерняевой (Киевский институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича) электродом на основе TiCN-AlN. Однако вызвали интерес систематические исследования формирования ЭИЛ-покрытий, направленные на повышение работоспособности вольфрамсодержащих твердых сплавов (ВТС) в связи с недостаточной их жаростойкостью в диапазоне рабочих температур. Такие исследования были выполнены в ИМ ХНЦ ДВО РАН (г. Хабаровск) Л.А. Коневцовым. В результате были даны рекомендации по применению ЭИЛ-покрытий для повышения эксплуатационных свойств ВТС. Для значительного повышения жаростойкости ВТС рекомендованы покрытия электродными материалами из алюминия, титана, хрома; для повышения трибологических свойств – Ti и керамикой на основе TiB<sub>2</sub> и ZrB<sub>2</sub> с пластической связкой Ni-Cr-Al. Работа апробирована и выполнялась по рекомендации ЗАО «ДВ-Технология», г. Комсомольска-на-Амуре. Исследования показали, что во всех случаях жаростойкость образцов с ЭИЛ-покрытиями выше, чем без покрытий. При этом фазовый состав покрытия изменяется с ростом температуры.

Полученные результаты приводят к выводу о необходимости создания защитных покрытий на поверхности режущих материалов из ВТС с целью повысить температурное сопротивление окислению, их можно создать методом ЭИЛ.

При известных достоинствах ЭИЛ присущи определенные недостатки: невозможность использовать электроды с высоким удельным сопротивлением, трудности нанесения материалов на определенные виды подложки, невысокая производительность, ограниченность толщины формируемых слоев и т.п. В то же время значительное распространение в промышленности получили методы нанесения защитных покрытий из порошковых материалов, характеризующиеся высокой производительностью и чрезвычайно широким выбором используемых материалов. Детальный анализ процессов формирования покрытий с заданными свойствами указал на целесообразность создания способа, который бы сочетал достоинства ЭИЛ с большими технологическими возможностями порошкового напыления. Разработка такого способа стала темой исследовательской работы Н.Я. Парканского. Установлено, что оптимальный вариант формирования покрытий из порошковых материалов достигается, когда совместно с низковольтными сильноточными импульсами ( $U \sim 50-400$  В, энергия разряда  $W \sim 550$  Дж) при

подаче частиц в межэлектродный промежуток (МЭП) под действием сил гравитации на МЭП налагается электрическое поле 0,5-3 кВ/мм.

Процесс ЭИЛ на основе порошковых материалов существенно расширил технологические возможности метода (если исходить от базового контактного процесса), так как дал возможность применять большую гамму материалов (в том числе токонепроводящих) и составлять из них различные смеси в любых пропорциях. Варьируя состав и дисперсность порошка, энергетические параметры процесса, удельное время обработки и т.д., можно создавать покрытия с заданным фазовым составом, структурой, пористостью и другими характеристиками. Так, при использовании смеси порошков, содержащих 50-60% никеля и 40-50% алюминия, при определенной энергии разряда (18-35 Дж) формируются покрытия, состоящие из наиболее стойких алюминидов  $Ni_3Al$  и  $NiAl$ , обеспечивающие их высокую жаростойкость (до 1500-1600°C) и микротвердость (600-680 кгс/мм).

Достаточно сложный и эффективный по результатам эксперимент, связанный с обработкой в канале разряда при ЭИЛ порошковой массы урановой руды, обеспечил почти десятикратное увеличение выхода урана.

Технология ЭИЛ порошковыми материалами позволяет целенаправленно управлять структурой формируемого слоя. Варьирование энергетическими режимами процесса, расходом порошка, подаваемого в МЭП, дает возможность создать как плотное покрытие, так и покрытие, обладающее капиллярно-пористой структурой. Эта комплексная работа выполнялась группой ЭИЛ (Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий и др.) и сотрудниками лаборатории электрических методов управления тепловыми процессами ИПФ (Л.М. Молдавский, В.Д. Шкилев).

В работах А.И. Михайлюка по исследованию ЭИЛ покрытий на железе, титане, меди при их обработке одноименными материалами была выявлена субструктура формируемых слоев. Использовался метод съемки в скользящем дифрагмированном пучке, разработанный в Московском институте стали и сплавов.

...После кончины Бориса Романовича практически все его ученики, уже будучи руководителями аспирантов или научных сотрудников – соискателей ученых степеней, продолжали исследования как в области физико-технологических проблем контактного процесса (диссертационная работа А.И. Михайлюка, соруководитель А.Е. Гитлевич), так и новых вариантов ЭИЛ (диссертационные работы А.П. Абрамчука, П.В. Перетятку – руководитель В.В. Михайлов; П.А. Топала – руководитель А.Е. Гитлевич).

Для многих из этих организаций открытия Б.Р. и Н.И.Лазаренко представляли принципиально новые направления обработки материалов, требовавшие широких теоретических, экспериментальных и практических изысканий. Как известно, ведущей организацией в этом направлении в СССР была ЦНИИЛ-Электром, которая практически являлась Всесоюзным научно-исследовательским центром в области ЭЭО и ЭИЛ на академическом уровне. Для конкретных промышленных разработок и использования в основном ЭЭО непосредственно на предприятиях были сформированы крупные отделы в научно-производственных объединениях: «Техномаш» и «Исток» в Научно-исследовательском институте авиационной технологии (НИИАТ), в Московском машиностроительном объединении «Салют», в проектно бюро по станкам и оборудованию «ОКБСА», экспериментальном НИИ металлорежущих станков «ЭНИМС», а также в других научно-технических коллективах ряда отраслей промышленности, где ЭЭО позволяло выйти на новый технологический уровень производства и была экономически эффективна. Процесс ЭИЛ интенсивно использовался в Центральном научно-исследовательском институте тяжелого машиностроения (ЦНИИТМАШ). Применение более мощных установок, чем созданные в ЦНИЛ-Электром, позволило в 1,5-2 раза увеличить толщину формируемых слоев,

восстанавливать и упрочнять крупногабаритные детали (например, бандажи и буксы паровозов, лемехи тракторных плугов и т.п.) при более высокой производительности процесса во время их эксплуатации. Хотя при этом снижалось качество (равномерность, сплошность, неоднородность, шероховатость и т.д.) формируемого слоя. Последующая обработка нанесенного слоя поверхностно-пластической деформацией и другими методами позволяла обеспечить требуемые условия и ресурс работы упрочненных или восстановленных деталей.

В эти же годы ряд работ по упрочнению и восстановлению деталей и инструмента методом ЭИЛ применительно к предприятиям сельхозтехники провел А.В. Поляченко. Несколько позже в системе Министерства сельского хозяйства большой объем работ по технологии и модернизации оборудования для ЭИЛ осуществила организация «Ремдеталь» под руководством д-ра техн. наук Ф.Х. Бурумкулова. В настоящее время исследования и разработки в крупном масштабе продолжаются в Государственном научно-исследовательском технологическом институте ремонта машинотракторного парка (ГОСНИТИ) под руководством Ф.Х. Бурумкулова и В.И. Иванова.

С ликвидацией ЦНИЛ-Электром Н.И. Лазаренко перешла на работу во Всесоюзный институт авиационных материалов (ВИАМ), не прекращая исследования в области ЭИЛ применительно к требованиям и технологиям авиационной космической техники, самых передовых и инновационных отраслей машино- и приборостроения. Вместе со своими коллегами (Л.А. Чатинян, В.П. Разумов, О.М. Еган, А.Н. Герман, А.В. Беляков, О.Е. Кестнер, Л.Н. Леонова и др.) Н.И. Лазаренко выполнила серию работ, которые обеспечили использование ЭИЛ в новых отраслях техники при самых жестких технических условиях. Например, был рекомендован процесс ЭИЛ для пар трения без смазки до 800°С при использовании в качестве анодов ряда тугоплавких металлов их карбидов и некоторых боридов, а также алюминия. Созданы технологии процесса ЭИЛ длительноресурсных узлов авиационной техники с применением электродных материалов из бронзы Бр5М (БРОИСМО, БРОИСГРИ). Эти работы показали необходимость в комплексном подходе к разработке технологических процессов ЭИЛ с учетом физических особенностей, выборе электродных материалов и оптимальных энергетических параметров. Убедительным примером такого подхода явилось создание покрытий для узлов трения «Лунохода-1» (Н.И. Лазаренко, О.М. Еган, В.П. Разумов).

Другой центр по внедрению ЭИЛ в авиационные и космические технологии был организован в Научно-исследовательском институте авиационной технологии (НИИАТ). Там под руководством В.А. Снежкова были развернуты исследования и разработки технологии для упрочнения и восстановления деталей авиационных агрегатов методом ЭИЛ, создания универсального и специализированного автоматизированного оборудования для осуществления этих технологий, а также использования ЭИЛ в космических изделиях (в том числе на деталях корабля «Буран»). Было показано, что основное влияние на свойства легированного слоя оказывают фазовые превращения и термопластическая деформация, приводящие к формированию высокой плотности дефектов и возникновению остаточных напряжений. В конечном итоге эти явления при определенных условиях становятся причиной разрушения сформированного поверхностного слоя детали.

На основании проведенных исследований создано универсальное и специализированное автоматизированное оборудование для процесса ЭИЛ, разработаны технологии по упрочнению и восстановлению деталей авиационных агрегатов и космических изделий.

Московские центры по ЭИЛ, созданные в ВИАМ и НИИАТ, работали в тесном контакте, активно сотрудничали с Институтом прикладной физики АН МССР и Институтом проблем материаловедения АН УССР.

Фундаментальные и прикладные исследования по ЭЭО проводились в научных центрах Днепропетровска, Харькова, Днепродзержинска, Ленинграда, Новосибирска, Нижнего Новгорода и других городов Союза. Но в конце века страна осталась без научного центра, занимающегося проблемами и перспективным развитием метода ЭЭО и его практическим использованием. Наметилось значительное ее отставание в использовании электроискровых технологий. Ряд причин привел к отставанию России от ведущих мировых держав в области ЭЭО (в том числе в компьютеризации технологических процессов), главная из них – отрицательное и пренебрежительное отношение чиновников всех рангов к становлению в стране отечественной отрасли перспективного направления.

Следует заметить, после распада СССР у нас допущено значительное отставание в исследовании и практическом использовании метода, открытого Б.Р. Лазаренко («русского метода», как его называли за рубежом) по сравнению с передовыми мировыми державами. На современном этапе требуются усиленная работа, а также поддержка научных исследований в этом направлении властными структурами Российской Федерации.

*А.Д. Верхотуров, А.Е. Гитлевич,  
В.В. Михайлов, Л.А. Коневцов*