

БОРИС РОМАНОВИЧ ЛАЗАРЕНКО – АВТОР ВЫДАЮЩИХСЯ ОТКРЫТИЙ В ТЕХНИКЕ XX ВЕКА. УЧЁНЫЙ И ОРГАНИЗАТОР НАУКИ (К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

А.Д. Верхотуров, А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов

“Первые десятилетия развития электроискровых технологий практически все нынешние мировые лидеры только тем и занимались, что изучали советские достижения и пытались их копировать в своих установках. Основных причин ведущего положения СССР было, пожалуй, две: сама технология зародилась именно в этой стране и была применена для изготовления передовых систем вооружений” [1].

Введение

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 – шельское каменное рубило. Потребовались сотни тысяч лет, чтобы в результате проб и ошибок появились ашельские орудия – овалы, круглые и утолщённые рубила. Затем прошли тысячелетия, и появились мустьерские орудия – остроконечник и скребло [2–4]. Наличие орудий труда положило начало историческому процессу преодоления противоречий между физиологической ограниченностью человека и всё возрастающей потребностью создания и усовершенствования “второй природы” за счёт преобразования и усовершенствования природы естественной.

Появление бронзы, а затем железа повысило возможности человека по созданию “второй природы”. С начала бронзового века начинается всё усиливающаяся борьба за “покорения 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 твёрже обрабатываемого. Каждый раз появление нового материала порождало необходимость в создании ещё более твёрдого материала резца. Проблема обработки материалов становилась всё острее и могла стать тормозом на пути научно-технического прогресса. И замкнутый круг в обработке материалов был разорван нашими выдающимися соотечественниками – Б.Р. и Н.И. Лазаренко, которые гениально заменили резец электрической искрой, то есть электронным потоком.

В апреле 1943 г. в г. Свердловске сотрудники эвакуированного из Москвы Всесоюзного электротехнического института, супруги Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко (рис. 1) получили авторское свидетельство на изобретение № 70010 “Способ обработки металлов и других токопроводящих материалов” [5].

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; обработки давлением; заполнения жидким металлом полости формы, соответствующей по конфигурации 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.), твёрдых сплавов (1925 г.), а затем сверхтвёрдых материалов на основе карбидов, боридов, нитридов [6, 7] остро возникла 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 твёрдости, прочности и хрупкости.



Рис. 1. Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко

Этот разрыв устранили советские учёные – 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 твёрдости, 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 [8–11]. 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 нашёл практическое применение на одном из оборонных заводов в г. Свердловске, фронт дополнительно получил тысячи снарядов для легендарных “Катюш”.

Широкому распространению метода как в СССР, так и за рубежом способствовали талант и целеустремлённость молодого учёного, а также создание Б.Р. и Н.И. Лазаренко первого в мире электроискрового станка [12]. 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 — вначале заводской, а затем отраслевой - ограничивали руководителя в проведении работ, связанных с решением всё возрастающих 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 в систему АН СССР, а также создание научной школы.

Только в 1955 г. лаборатория становится самостоятельной организацией союзного значения и переводится в систему АН СССР. Очень плодотворным оказался “академический” период в части создания физико-химических основ процесса ЭЭО, принципиально новых технологий, установок и приборов для осуществления процессов ЭЭО и ЭИЛ.

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. Мучительно долго размышлял Б.Р. Лазаренко о судьбе лаборатории и своём будущем. Он понимал, что проводимые научные исследования ведут к новым открытиям и теоретическим обобщениям. И это было только начало в области технологии электрической обработки (рис. 2).



Рис. 2. Б.Р. Лазаренко и аспиранты Н.Г. Андреев, А.Д. Верхотуров, В.С. Сычѳв

Уже в первых работах, да и впоследствии [12–14] супруги Лазаренко неустанно подчеркивали, что “от электричества взято далеко не всё, оно обладает многими возможностями, основанными на использовании более глубоких, ещё не известных свойств”. “Если интенсивно развивать науку об электричестве, то в этой области вновь появится много замечательных открытий, количество которых будет не меньше, чем в прошлом столетии”.

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. Кишинѳв, стал работать в Академии наук Молдавской ССР. Это был трудный выбор – уезжал он один: семья, друзья, ученики остались в родной 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 слоѳв электродов после воздействия искровыми разрядами.

После окончания учебы в МГУ и период работы во Всесоюзном электротехническом институте перед Б.Р. Лазаренко была поставлена задача, связанная с “борьбой против электрической эрозии материалов” и созданием безызносных электрических контактов. После многочисленных, тщательно проведенных экспериментов по изысканию материалов, не поддающихся электрической эрозии, Б.Р. Лазаренко делает вывод о том, что нет физических явлений “вредных”, есть явления недостаточно изученные. А электрическая эрозия – неотъемлемое свойство любых токопроводящих материалов.

Особенностью стиля научной работы Б.Р. и Н.И. Лазаренко является периодическая систематизация экспериментальных данных, которая оформлялась в виде определённых “обобщений”. Начав с нескольких обобщений в первых работах, в одной из последних они предложили уже 37 обобщений, относящихся не только к ЭЭО, но и к важнейшим вопросам, имеющим отношение к прохождению электрического тока через электролит, воздействию электрического тока на живые организмы. Обобщения, изложенные в [14], – это своего рода итог большой теоретической и экспериментальной работы Б.Р. и Н.И. Лазаренко

История открытия и развития метода ЭЭО (Екатеринбург, Москва, Кишинѳв)

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 счёт 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 щётчного анодов. Следует заметить, что 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 врежется в электрод-анод, при этом очень точно копирует на нём свою геометрическую форму и размеры. С помощью вращающегося диска катода, можно разрезать любые токопроводящие материалы. Так было установлено, что электроэрозионное разрушение можно использовать как средство формообразования деталей из любых токопроводящих материалов.

В апреле 1943 года супруги Лазаренко возвращаются в Москву в связи с тем, что из ВЭИ (Свердловск) в НИИ электромеханики (Москва) был переведён отдел профессора А.С. Займовского. И уже в июне 1943-го на Учёном совете ВЭИ Б.Р. Лазаренко защищает кандидатскую диссертацию по теме “Инверсия электрической эрозии металлов и методы борьбы с разрушением контактов”, в которой доказывает, что электроды контактных систем всегда подвергаются электрической эрозии, что является отрицательным фактором для таких устройств, а обнаруженное новое явление копирования формы и размеров катода в материале анода за счёт его электроэрозионного разрушения при искровых разрядах в диэлектрической жидкости позволяет использовать его как метод формообразования деталей из любых токопроводящих материалов.

Здесь уместно привести выдержку из заключительной части первой небольшой книги, посвящённой электрической эрозии (ЭЭ), написанной Б.Р. и Н.И. Лазаренко в 1944 г. [12]: “Мы полагаем, что нам удалось показать, что, работая над фактами вредными и изучая явления разрушительные, можно действие этих отрицательных явлений (электрической эрозии) весьма эффективно использовать в промышленности. Результаты использования электрической эрозии для проведения описанных элементарных процессов (способы электроэрозионной прошивки отверстий различных профилей, резки и гравировки металлов и сплавов, заточки инструмента, очистки и притирки металлических поверхностей и другие. – **Примеч. авторов**) 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 встаёт 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) [12] или “электроискровая обработка металлов” (ЭИО) [13, 15]. С тех пор под этими названиями он вошёл в литературу, в том числе и зарубежную [16].

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 тяжёлые военные (1943–1945 гг.), 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” (выпуск 1) [12], ставшая сенсацией в области технологии обработки металлов. В этой первой в мире работе, посвящённой ЭЭО, были намечены основные области использования ЭЭО в технологии машиностроения и приборостроения. Появление через год второй книги (вып. 2) [17], 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 начала внедрения ЭЭО на промышленных предприятиях страны.

Комплекс работ, выполненных Б.Р. и Н.И. Лазаренко с 1943 по 1945 г., был высоко оценён 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 учёными СССР членами-корреспондентами Академии наук СССР М.В. Келдышем (впоследствии президент АН СССР), С.А. Христиановичем, Б.М. Вулом [18].

В июне 1948 г. Б. Р. Лазаренко защитил в Московском высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана докторскую диссертацию на тему “Электроискровой способ обработки металлов”. На защите диссертации Б. Р. Лазаренко с присущей ему прозорливостью произнес: “...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 пророческие слова.

Защита диссертации подвела итог только части намеченных планов по изучению и внедрению в машиностроение и приборостроение ЭЭО. К этому времени большой объём 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 для становления и развития ЭЭО в стране, и как оно произошло, в своих воспоминаниях о совместной работе с Б. Р. Лазаренко рассказал один из самых первых и талантливых его учеников Борис Никифорович Золотых, впоследствии д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР (рис. 3).



Рис. 3. Б.Н. Золотых, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР

Он отмечал, что в создании лаборатории ярко проявился огромный организаторский талант Б.Р. Лазаренко [19]. Без активной поддержки, а порой даже при довольно сильном противодействии многих крупных специалистов, определявших в ту пору техническую политику в области развития технологии машиностроения и станкостроения, ему удалось к началу 50-х гг. создать Центральную лабораторию электрических методов обработки, ставшую к 1955-му научно-исследовательским центром общегосударственного значения [18].

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 ещё неоднократно будут сталкиваться Б.Р. Лазаренко и его коллектив.

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

Большой научный задел, наличие молодого талантливый коллектива, все, что Борис Романович успел создать за 1943–1948 гг., и его невероятная работоспособность заложили фундамент дальнейшего развития и практического использования ЭЭО в промышленности. В этой ситуации существенную роль сыграла связь Центральной лаборатории с предприятиями, НИИ и другими организациями, которые осваивали и продвигали ЭЭО в производство. В этом плане уместно привести несколько ярких примеров, показывающих уникальные возможности ЭЭО в промышленном производстве, особенно при серийном и массовом изготовлении изделий. Среди производственников Б.Р. Лазаренко приобрёл единомышленников, которые высоко оценили возможности ЭЭО и стремились к совместной деятельности с её 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 [20]. Более того, 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, электронно-лучевым, электрохимическим и т.п.) невозможно [21–23]. На тот период 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, так как эффект от использования ЭЭО, как правило, коренным образом менял технологию и культуру производства, а при определённой организации и условий процесса обработки резко повышал производительность изготовления изделий, что высоко поднимало экономическую планку ЭЭО.

Эти отдельные примеры убедительно показывали широкие возможности ЭЭО и необходимость быстрого её внедрения в машиностроение 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 увлечённые 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 (в 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 в лаборатории Б.Р. Лазаренко появился первый аспирант – инженер Борис Никифорович Золотых (см. 3), выпускник физического факультета МГУ, перешедший с авиационного завода в Лабораторию № 7.

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 источников тепла), возникающих на электродах при низковольтных импульсных разрядах в жидкости. В начале 1948 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему “О некоторых закономерностях искровой электрической эрозии металлов в жидкой диэлектрической среде”, которая явилась первой работой в области изучения физической

природы ЭЭО металлов.

Следует отметить, что кандидатская и последующая докторская диссертации (1968 г.) Б.Н. Золотых послужили базой теоретических и технологических основ процесса ЭЭО. В этих работах были проведены фундаментальные исследования природы электрической эрозии металлов, на основании которых была разработана общая физическая (феноменологическая) теория ЭЭО и предложены методы расчёта параметров техпроцесса.

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 объём рабочей среды, и удаления твёрдых продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Эти исследования можно отнести к разряду классических. Учитывая роль Б.Н. Золотых, один из ближайших соратников Б.Р. Лазаренко, в становлении и развитии ЭЭО, надо отдать должное Борису Романовичу, не ошибся в выборе одного из самых талантливых своих учеников. К выбору учеников Лазаренко 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 “зелёную 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 [24], и поместили рядом. Автором одной из статей был Б.Н. Золотых, другой - Б.Р. и Н.И. Лазаренко, причём ответственным редактором этого издания являлся Б.Р. Лазаренко. Отдав делу становления и развития ЭЭО более 60 лет, Б.Н. Золотых считал лучшими и самыми результативными годы совместной, почти 20-летней работы с 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) Академии наук 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 много инженеров и большую группу кандидатов и докторов наук – второе поколение единомышленников Б.Р. Лазаренко.

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, д.т.н. Б.Н. Золотых за творческий вклад в ракетно-космическую, электронную и атомную технику награждён правительственными наградами и медалями Федерации космонавтики РФ. Подводя итоги творческой деятельности одного из первых и выдающихся учеников Б.Р. Лазаренко, можно сказать, что Б.Н. Золотых решил большую часть задач, сформулированных его учителем. В области изучения физической природы и разработки физической теории ЭЭО он обеспечил на многие годы развитие открытия Б.Р. Лазаренко на базе фундаментальных научных данных. Скончался Б.Н. Золотых 17 апреля 2008 г., на 88-м году жизни.

Физические и теоретические исследования ЭЭО и защита кандидатской диссертации Б.Н. Золотых, выполненные в 1948 г., представляли собой только начальный этап и отдельное направление в комплексном исследовании ЭЭО. Для успешного и быстрого развития и внедрения ЭЭО в практику Борис Романович ставил задачу изучения различных аспектов процесса, в том числе технологических и технических, связанных с разработкой и изготовлением механизированного и автоматизированного оборудования. После защиты диссертационной работы Б.Н. Золотых в Лаборатории № 7 была защищена работа технологического плана Е.А. Володина, а затем – Н.Ф. Фатеева, вызвавшие широкий интерес у производственников. Практически новое направление в ЭЭО пришло с диссертационной работой Б.И. Ставицкого, первая встреча которого с Борисом Романовичем состоялась, когда он был ещё студентом-дипломником в 1950 году.

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). Причём с появлением такой специальности Бориса Романовича попросили руководить разработкой учебных планов для чтения курса лекций. После первой лекции его искренне поздравляли с педагогическим дебютом. Б.Р. Лазаренко понимал, что: “...через год эти студенты станут первыми специалистами по электроискровой

обработке, отряд наших единомышленников получит доброе пополнение” [18]. Он не ошибся – пройдут годы, и его дипломник Борис Иванович Ставицкий будет одним из признанных специалистов в области ЭЭО и при поддержке и тесном научном контакте со своим учителем в НПП “Исток” вперые 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, называемой электроискровым прецизионным станкостроением, а её основатели (Б.И. Ставицкий, М.М. Фёдоров, Е.В. Холоднов) удостоятся Ленинской премии.

Завершение формирования и становления научно-технического коллектива (ЦНИЛ-Электрома) в виде мощного научно-исследовательского центра всесоюзного уровня добавили ответственности авторам ЭЭО. Руководство научно-исследовательскими работами в Центральной лаборатории и организацию внедрения ЭЭО в промышленность Борис Романович сочетал с педагогической деятельностью в МАТИ (доцент), а также руководством рядом научно-исследовательских групп в НИИ, с работой в Президиуме АН СССР сначала в качестве учёного секретаря Президиума АН СССР, а затем - исполняющего обязанности заместителя академика-секретаря отделения технических наук АН СССР [18]. В лаборатории ЦНИЛ-Электрома получили развитие исследования воздействия низко- и высокочастотных колебаний непосредственно на процесс электроэрозионной обработки. Обобщение экспериментальных и теоретических исследований в этой области явилось предметом кандидатской диссертации М.К. Мицкевича. Позднее научные основы технологии электроэрозионного формообразования деталей штампов легли в основу докторской диссертации М.К. Мицкевича, а 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 журналист и писатель Б.А. Беленький в книге, посвящённой жизни и творчеству ученого: “Годы работы в президиуме АН в жизни Лазаренко оставили глубокий след. Общение с выдающимися учёными, работа под их руководством обогатили его как учёного и как организатора науки. Большая школа научила многому. А главное – мыслить широко, уметь сосредоточиться на главном, увлекать и вести за собой научную молодёжь” [18].

С конца 1955 г. по февраль 1958 г. Б.Р. Лазаренко командировали в Китай в качестве советника при президенте АН КНР, где он участвовал в разработке перспективного плана развития науки и техники и, безусловно, оказал большое влияние на становление и развитие ЭЭО в КНР. После возвращения ученого в СССР в ЦНИЛ-Электром на стажировку была отправлена группа китайских специалистов (Ху Чун Цзинь из Академии наук Китая, Лю-Цзин Чун из Харбинского политехнического института, Чен Цзэн Цин из Шанхайского коммуникационного управления и еще пять человек). Здесь в течение 1959–1962 гг. постигали теоретические основы и технику ЭЭО материалов.

Китайские инженеры явились второй волной зарубежных специалистов, которые проходили стажировку и научную подготовку в ЦНИИЛ-Электром. В конце сороковых и пятидесятых годов сюда приезжали в основном специалисты из социалистических стран Восточной Европы. Первым зарубежным учеником Лазаренко был талантливый инженер из Чехословакии Индржик Станек. На родине он возглавлял отдел в Научно-исследовательском институте механизации и автоматизации (НИИМА-“VUMA”) в словацком городе Новое Место под Вахом. Досрочно завершил и защитил диссертационную работу под руководством Б.Р. Лазаренко. И, уезжая, сказал: “Ваш метод, шеф, в Чехословакии найдёт широчайшее применение. Смею Вас в этом заверить твёрдо”. И слово своё 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. Уже к середине 50-х гг. НИИМА разработал более 10 типов электроискровых станков различного назначения, проволочный вырезной электроискровой станок с фотоэлектрическим управлением движением по заданным координатам на Всемирной выставке “EXPO-58” в Брюсселе завоевал главный приз и золотую медаль [25].

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. Важную роль в организации симпозиума сыграл И. Станек. Учредителями ISEM-1 были НИИМА и швей-

царская фирма AGIE. Как отметил Б.Р. Лазаренко, когда ведущие специалисты в области электроискровой обработки металлов из 11 стран мира впервые собрались вместе, то этим они засвидетельствовали 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) днём рождения ЭЭО в мировом масштабе.

ISEM обеспечил интенсивный обмен опытом, который способствовал быстрому развитию научных и практических исследований в области ЭЭО материалов, а также помог сохранить деловые и дружеские контакты специалистов в этой области во всём мире. По договорённости симпозиум проводился один раз в три года, и для участников большой честью было участие во многих из них основателей электрических методов обработки материалов супругов Лазаренко.

Много лет спустя – к 60-летию открытия ЭЭО – ученики Б.Р. Лазаренко из КНР прислали статью в журнал “Электронная обработка материалов” [26] 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. Он щедро отдавал свои идеи, знания и опыт всем тем, кто хотел познать суть и возможности его открытия.

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 [27–30], а также сборника “Физические основы электроискровой обработки материалов” под редакцией Б.А. Красюка [30]. Но особое значение в этом отношении имел журнал “Электронная обработка материалов”, созданный Б.Р. Лазаренко [31, 32].

Если вернуться к хронологии развития открытий Б.Р. и Н.И. Лазаренко, то в сороковые и пятидесятые годы 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.

После организации лаборатории ЦНИЛ-Электром (в 1948 г.) 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 [19].

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. Позже, в 1964 г. к ним присоединится центр, созданный Б.Р. Лазаренко в Кишиневе в Институте прикладной физики АН МССР.

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

Развитие метода ЭЭО (Киев, Минск, Хабаровск, Кишинёв, Москва)

Развитие метода ЭЭО в Киеве. Центральным стержнем научных изысканий Б.Р. Лазаренко было использование новых возможностей электрической энергии в различных областях науки, техники, сельского хозяйства. Лазаренко хорошо понимал, что ограниченными силами Института прикладной физики АН МССР эту глобальную проблему не решить. Необходимо привлечь широкий круг учёных, специалистов, работающих в различных направлениях естественных наук, и прежде всего материаловедов.

Особенно тесные отношения у ИПФ АН МССР, возглавляемого Б.Р. Лазаренко, сложились с

Институтом проблем материаловедения АН УССР, где первым зам. директора по науке был чл.-кор. АН УССР, выдающийся материаловед Г.В. Самсонов. Б.Р.Лазаренко и Г.В. Самсонова связывало не только прошлое: оба они москвичи, имели много общих знакомых, друзей. Им пришлось оставить Москву – это была их “внутренняя” эмиграция. Оба обладали мощным научным потенциалом, кипучей энергией, колоссальным трудолюбием, честным и прямым характером. Им было “тесно” в Москве: Самсонов уехал в ИПМ (Киев), а Лазаренко – в АН МССР (Кишинёв). Началом их тесной дружбы стало, прежде всего, сотрудничество в области решения научных проблем, связанных с ЭЭО.

Во второй половине 60-х гг. Г.В. Самсонов стал усиленно заниматься электродным материаловедением, в том числе для ЭЭО, что очень заинтересовало Б.Р. Лазаренко. Несмотря на то что Г.В.Самсонов был известным в мире материаловедом, основателем электродного материаловедения, при встрече с Н.И. Лазаренко (1972 г.) он сказал: “Мы ваши ученики”, что было искренним признанием выдающихся заслуг супругов Лазаренко.

Под руководством Г.В. Самсонова выполнены научные работы по выбору и созданию электродных материалов в Киевском политехническом институте, на кафедре порошковой металлургии, которую он создал и был ее заведующим (по совместительству) [33-35]. Впоследствии создается участок порошковой металлургии на Объединении им. С.П. Королёва (Киев) под руководством ученика Г.В. Самсонова, д.т.н. И.М. Мухи, где разрабатывались и изготавливались электродные материалы для ЭЭРО.

Электродное материаловедение для ЭИЛ начало развиваться под руководством Г.В. Самсонова преимущественно в ИПМ АН УССР, в отделе А.Я. Артамонова [36-39]. Научные работы в ИПМ проводились при совместном с ИПФ АН МССР обсуждении и выполнении экспериментальных и теоретических исследований [40-44]. Ведущие научные сотрудники ИПФ (И.И. Сафронов, А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов и другие) защищали диссертации в ИПМ [45-48], Б.Р. Лазаренко оппонировал диссертации сотрудников ИПМ, например [39]. Разработанные в ИПФ установки для ЭИЛ совместно исследовались и совершенствовались сотрудниками ИПМ.

Более того, по инициативе Б.Р. Лазаренко, по стратегическим направлениям руководство диссертационными работами осуществлялось совместно. Следует отметить, что Б.Р.Лазаренко смело привлекал молодых учёных к руководству диссертационными работами, охотно обсуждал с ними проблемные вопросы науки, не боясь потерпеть “поражения” в споре.

Объединение усилий двух академических институтов (ИПФ и ИПМ) по исследованию воздействия искровых разрядов на изменения свойств обрабатываемых поверхностей, созданию оборудования и электродных материалов требовало выхода на решение практических задач, что было связано с необходимостью подключения отраслевых научных организаций. Такой союз состоялся с институтами ВИАМ (Всесоюзного научно-исследовательского института авиационных материалов) и НИАТ (Научно-исследовательского института авиационной технологии). Были отработаны и внедрены технологии упрочнения ответственных деталей авиационной и оборонной промышленности, отмеченные Премией Совета Министров СССР.

Все это способствовало созданию в СССР электроматериаловедческого центра мирового значения по созданию и получению оборудования и материалов для ЭИЛ. Однако в связи со смертью Г.В. Самсонова (1975 г.), а затем Б.Р. Лазаренко (1979 г.) и распадом СССР надежды на создание такого центра мирового уровня, к сожалению, не оправдались.

Развитие метода ЭЭО в Минске. Исследования в области ЭЭО и ЭИЛ в ФТИ начали проводиться в Лаборатории электрофизики, которой руководил профессор, к.ф.-м. н. Илья Григорьевич Некрашевич, работавший по совместительству зав. кафедрой физики в Белорусском государственном университете БГУ, откуда шли в науку хорошо подготовленные физики.

Тематика лаборатории по проблеме физики электрических контактов исследованиями явлений эрозии материала контактов и его переноса была расширена в изучение физических явлений электрической эрозии материалов как основы принципиально новых методов обработки в двух направлениях – размерного формообразования (ЭЭО) и легирования поверхностей деталей (ЭИЛ).

Для знакомства с работами в области ЭЭО материалов директор ФТИ академик С.И. Губкин направляет в ЦНИЛ-Электром зав. лабораторией И.Г. Некрашевича и к.ф.-м. н. Н.В. Афанасьева. “Они вернулись вдохновлёнными увиденным и, конечно, были очарованы самим автором этого способа, его кипучей энергией”, – так пишет об этом д.т.н., профессор М.К. Мицкевич, один из крупнейших специалистов в области ЭЭО в Белоруссии и в СССР (тогда научный сотрудник Лаборатории электрофизики) [49–50]. К характеристике ситуации, отмеченной М.К. Мицкевичем, следует добавить и высказывание Б.Н. Золотых, который говорил, что Борис Романович умеет увлечь за собой и сделать своими единомышленниками как молодых, только начинающих свой путь, так и маститых

учёных (а ими были И.Г. Некрашевич и Н.В. Афанасьев).

Нельзя не отметить более чем полувековую научно-исследовательскую деятельность Лаборатории электрофизики ФТИ, внесшей значительный вклад в теорию и практику ЭЭО и ЭИЛ. Координация тематики лаборатории осуществлялась ЦНИЛ-Электром АН СССР, которую возглавлял Б.Р. Лазаренко, а исследования физических основ этих методов курировал Б.Н. Золотых.

Наиболее важные результаты Лаборатории электрофизики в области исследования ЭЭО и ЭИЛ дают представления о новых явлениях на электродах и в межэлектродном промежутке, обнаруженных при изучении физических особенностей импульсных разрядов, протекающих в условиях ЭЭО и ЭИЛ, о теоретической интерпретации экспериментальных данных, о разработках оригинальных технологических процессов ЭЭО и ЭИЛ и т.п.; полнее эти достижения описаны в работе М.К. Мицкевича [49].

В Минске проводились успешные работы в области ЭЭО в Физико-техническом институте (ФТИ) АН БССР и Белорусском политехническом институте [49]. Сработавшийся небольшой коллектив лаборатории с первых лет стал вносить существенный вклад в исследовании явления электрической эрозии. Чётко определились два различающихся по методике направления исследований: изучение процессов в единичном сильноточном разряде (И.Г. Некрашевич, М.К. Мицкевич, И.А. Бакуто) и электроэрозионной стойкости материалов по серийной методике (Н.В. Афанасьев, С.П. Миткевич). Кроме того, первое направление дополнялось решением некоторых вопросов электроэрозионной обработки, а второе – исследованием электроискрового упрочнения. Начиная с 1952 г., с уходом Н.В. Афанасьева на кафедру БПИ, работы в лаборатории проводились под руководством И.Г. Некрашевича.

Популярность новых методов обработки материалов привлекла внимание и других лабораторий института. Исследованием структуры поверхности, образующейся после электроискрового упрочнения, занималась Лаборатория металловедения под руководством академика К.В. Горева, а изготовлением ковочных штампов – Лаборатория обработки металлов давлением под руководством академика С.И. Губкина. В БПИ на кафедре физики Н.В. Афанасьев создал группу, которая изучала различные стороны электрической эрозии металлов. В университете на кафедре физики И.Г. Некрашевич создал коллектив, исследовавший физику явления электрической эрозии. В результате накопился значительный объём информации о различных сторонах явления электрической эрозии и освоено несколько технологических процессов, получивших внедрение на заводах Минска.

В 1955 г. была предложена гипотеза о пространственно-временной дискретности электроэрозионного процесса на электродах (И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто). В результате разряда на электроде остаётся интегральный эрозионный след, состоящий из множества мелких кратеров. В дальнейшем эти представления, обобщенные в отношении как видов источника тепла на электроде, так и множества разрядных каналов, получили название миграционной теории явления электрической эрозии металлов.

Особенно следует отметить исследования динамики электродных процессов на электродах с макронеоднородной поверхностью, проводимые с целью поиска путей повышения электроэрозионной стойкости металлокерамических и композиционных материалов. Была использована методика сверхскоростной фоторегистрации быстропротекающих процессов с использованием камеры СФР-2М с дополнительной светосильной оптикой. Совокупность полученной экспериментальной и теоретической информации позволила сформулировать практические рекомендации для разработки эрозионностойких композиционных материалов, а также существенно углубить представления о механизме возникновения и существования электродных пятен, об их свойствах и параметрах. По результатам этих исследований защищена кандидатская диссертация А.И. Бушик (1973 г.).

Благодаря своей оригинальности, новизне, фундаментальности и практической значимости исследования получили известность за пределами СССР, но в должной мере обобщены не были.

По мнению Б.Н. Золотых [19], непосредственного участника всех первых научно-исследовательских работ, проводимых под руководством Б.Р. Лазаренко, пик его научной деятельности и коллектива ЦНИЛ-Электром в области электроэрозионной обработки приходится на 1955–1965 гг. В этот период были выполнены фундаментальные исследования природы электрической эрозии металлов, на основе которых создается общая физическая теория этого явления и разрабатываются методы расчёта параметров техпроцесса ЭЭО. Работы, опубликованные в это время, получили международное признание и послужили основой для создания высокопроизводительного и высокоавтоматизированного оборудования как в СССР, так и за рубежом. Завершившиеся в конце 60-х гг. научные исследования по созданию общей физической (феноменологической) теории электроэрозионной обработки в СССР открыли новые возможности и дали новый импульс в её развитии.

Реальным стало решение задачи широкой автоматизации процесса ЭЭО и создание гибких технологических процессов ЭЭО, позволяющих удовлетворять широкий диапазон требований потребителя. С начала 70-х гг. электроэрозионные станки стали предметом экспорта.

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 [51]. 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 (Ю.И. Мулин, С.Н. Химухин, Л.А. Коневцов).

По тематике ЭИЛ защищены две докторские диссертации (Ю.И. Мулин, С.Н. Химухин) и 11 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). Кроме того, защищены кандидатские диссертации: А.М. Сундуковым – по ЭЭРО, М.И. Дворником по электроэрозионному диспергированию твёрдых 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 государственным университетом, где также была защищена кандидатская диссертация по ЭИЛ В.В. Соловьёвым (под руководством проф. В.А. Ким) и Комсомольским-на-Амуре Техническим университетом, где была выполнена и защищена докторская диссертация М.Ю. Сарилыным по ЭЭРО материалов. Осуществляется непрерывное и плодотворное сотрудничество Института материаловедения с Институтом химии ДВО РАН (лаборатория д.х.н. П.С. Гордиенко) по исследованию состава, структуры и свойств электроискровых покрытий.

Развитие метода ЭЭО в Кишиневе (ИПФ АН МССР). Реорганизация сети научных учреждений АН СССР и ее структуры в начале 60-х гг. привела к тому, что в промышленность была передана часть институтов и лабораторий технического профиля, что привело в конечном итоге к тому, что ЦНИЛ-Электром перестал существовать (в 1965 г.) [19]. Страна лишилась крупного академического центра фундаментальных исследований, а вместе с ним – возможности создавать новые технологические направления, а также опытные образцы оборудования в области ЭЭО и ЭИЛ.

Б.Р.Лазаренко понимал, что узкие рамки отраслевых научных организаций не позволяют вернуть фундаментальные исследования как в области ЭЭО и ЭИЛ, так и в других новых направлениях применения электрофизических процессов. Он был убежден, что решать намеченные научные проблемы можно только в системе Академии наук. При содействии вице-президента АН СССР А.В.Топчиева Лазаренко остается в системе АН, но переезжает на работу в Молдавию.

В 1961 г. Б.Р. Лазаренко избирают действительным членом Академии наук МССР, и он становится директором Института энергетики и автоматики, который после ряда реорганизаций в 1964 г. был преобразован в Институт прикладной физики (ИПФ). ИПФ стал работать по двум крупным научным направлениям, которые условно можно назвать «физическое», состоящее из восьми лабораторий, и «техническое» в составе шести (в дальнейшем – восьми) лабораторий [52]. Организатором, идейным и научным руководителем лабораторий электроискровой обработки материалов (ЭИОМ), импульсной газовой электроники (ИГЭ) был Б.Р. Лазаренко.

При ИПФ был создан Опытный завод с конструкторским бюро (КБ), в 1965 г. начал выходить научный и производственно-технический журнал «Электронная обработка материалов» (ЭОМ), основанный Б.Р. Лазаренко (первый и бессменный главный редактор, 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”.

Первые два раздела ЭОМ – «Электрическая размерная обработка материалов» и «Электрические методы обработки поверхности» тематически и информационно объединили практически всех специалистов Союза, работавших в области ЭЭО, ЭИЛ, электрохимической обработки и в других сферах науки и производства, где используются концентрированные источники энергии для обработки материалов (лазерная, плазменная, электронно-лучевая обработка и т.п.), а также из-за рубежа, учеников и сподвижников Б.Р. Лазаренко. Журнал стал важным источником информации по новым электрическим методам обработки материалов, исследования по которым были начаты в ИПФ по инициативе Б.Р. Лазаренко – по электрическим процессам в технике и химии, обработке биологических объектов и пищевых продуктов, оборудованию и приборам из отмеченных выше и смежных областей науки, обмену опытом работы в различных направлениях исследований по тематике журнала.

Исследования по электродинамической теории ЭЭО Борис Романович начал ещё в период становления процесса в Москве, и эти работы были успешно продолжены в лаборатории ЭИОМ.

С целью расширения 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), которые проводились под руководством Б.Р. Лазаренко и С.П. Фурсова одним из авторов этой публикации А.Е. Гитлевичем [46].

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, т.е. осуществлялся процесс ЭИЛ. Следует заметить, что в подавляющем большинстве случаев полярность процесса была обратной относительно ЭИЛ металлов. 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 о том, что генерация и движение дислокаций происходят в результате реализации энергии, накопленной в тонком напряженно-деформированном слое кристалла. Удаление этого слоя при травлении устраняет источник дислокаций. Характерно, что минимальная температура отжига $T_{от}$, 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 (например, для Ge $T_{от} > 300^\circ\text{C}$) [53].

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 генерирования различных типов дефектов в монокристаллах полупроводников [54].

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 [55, 56]. 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 [57] указывалось, что на наличии максимума на кривой массопереноса может сказываться появление и накопление дефектов кристаллической решетки в подложке и нанесенном слое, возникновение напряжений и т.п.

Цикл исследований ЭИЛ в различных межэлектродных средах, проведенный Н.И.Лазаренко [55], 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. Это 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, где был осуществлен ряд совместных экспериментов, обсуждались и корректировались отдельные этапы исследований [58]. Резюмируя этот обширный и

трудоемкий эксперимент (давление в рабочем объеме варьировалось в диапазоне $700\text{--}10^4$ мм рт.ст., а запас энергии при различных режимах ЭИЛ – от 0,1 до 0,9 Дж), отметим: при давлении $100\text{--}10^1$ мм рт.ст. в зависимости от состава материала электродов можно получить покрытия в 1,5–2 раза большей толщины и лучшего качества, чем при нормальном давлении воздуха; для некоторых сочетаний материала электродов (например, анод-молибден, катод-сталь 45) при ЭИЛ без перемещения вибрирующего анода формируются качественные покрытия толщиной до 2 мм, при этом площадь покрытия не превышает диаметр анода; с уменьшением давления в камере повышается качество покрытий: улучшается сплошность, равномерность, уменьшается пористость, количество окислов и других примесей и т.д.

Также был разработан бесконтактный вариант нанесения покрытий при ЭИЛ в вакууме, при котором с помощью электрического поля часть продуктов электроэрозии осаждалась на подставной электрод [59]. 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 более 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 этот же период началась разработка и более мощной установки Электром-25 для ЭИЛ крупногабаритных деталей.

Для интенсивного развития работ в области ЭИЛ в ИПФ и на ОЗ необходимы были специалисты. 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 и начале 70-х гг. в ИПФ и на Опытный завод пришла большая группа выпускников КПИ (часть из них преддипломную практику и дипломную работу выполняла в ИПФ и на ОЗ). В лабораториях появились молодые инженеры В.В. Михайлов, В.Н. Ткаченко, А.В. Рыбалко, А.М. Парамонов, Н.Я. Парканский и другие. Вскоре В.В.Михайлов, В.Н.Ткаченко, А.В.Рыбалко, позже – Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий поступили в аспирантуру. Знания, которые они получили, слушая лекции Б.Р. Лазаренко, и увлечение его идеями помогли быстро войти в научно-исследовательский процесс и приступить к выполнению самостоятельных заданий.

Появление новых сотрудников и аспирантов позволило Б.Р. Лазаренко развернуть исследования в области физики, технологии и опытно-конструкторских разработок, связанных с процессом ЭИЛ. С целью тематического объединения работ новых специалистов в июле 1971 г. он издает приказ об организации экспериментально-технологической группы ЭИЛ (руководитель – А.Е. Гитлевич).

В задачи группы входило исследование физических аспектов процесса ЭИЛ, изучение возможности увеличения предельной толщины и улучшения качества формируемых слоев, совершенствование существующих и разработка новых технологических приемов ЭИЛ и т.д. Намечалось проведение совместных работ с Институтом проблем материаловедения АН УССР и Всесоюзным институтом авиационных материалов. Группа ЭИЛ должна была тесно контактировать с Опытным заводом в сфере опытно-промышленных разработок и испытания нового оборудования. В группу входили научные сотрудники А.Е.Гитлевич, В.В.Михайлов, Н.Я. Парканский, В.Н.Ткаченко, В.М. Ревуцкий и др.

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. Б.Р. Лазаренко предусмотрел проведение НИР в области ЭИЛ при творческом содружестве с рядом ведущих институтов Советского Союза, где можно было обсудить широкий круг вопросов ЭЭО и ЭИЛ, получить консультации по специальным проблемам и провести совместные исследования. В этом плане весьма показательной была диссертационная работа В.В.Михайлова «Исследование особенностей электроискрового легирования титана и его сплавов» [47]. Тесное научное сотрудничество с ИПМ АН УССР сыграло важную роль в обосновании тематики, выборе электродных материалов, в изучении закономерностей их электрической эрозии, массопереноса и формирования покрытий. Работа в основном базировалась на использовании в качестве анодов переходных металлов IV–VI и VIII групп, их карбидов и алюминия. Большую помощь на этом

этапе диссертанту оказал ст. науч. сотрудник ИПМ А.Д. Верхотуров. Результаты нашли отражение в публикациях В.В. Михайлова с Г.В. Самсоновым, А.Д. Верхотуровым, Ю.Г. Ткаченко, А.И. Безыкорновым и другими.

Детальными исследованиями особенностей формирования поверхностных слоев при ЭИЛ титана алюминием с использованием вращающихся электродов-инструментов роторного типа (с проволочными или пластинчатыми анодами) была установлена возможность создания сплошных покрытий толщиной 0,5 мм и более (рис. 4), при этом за счет параметров разряда и времени контактирования анода с катодом возможность варьировать фазовый состав покрытия (рис. 5).

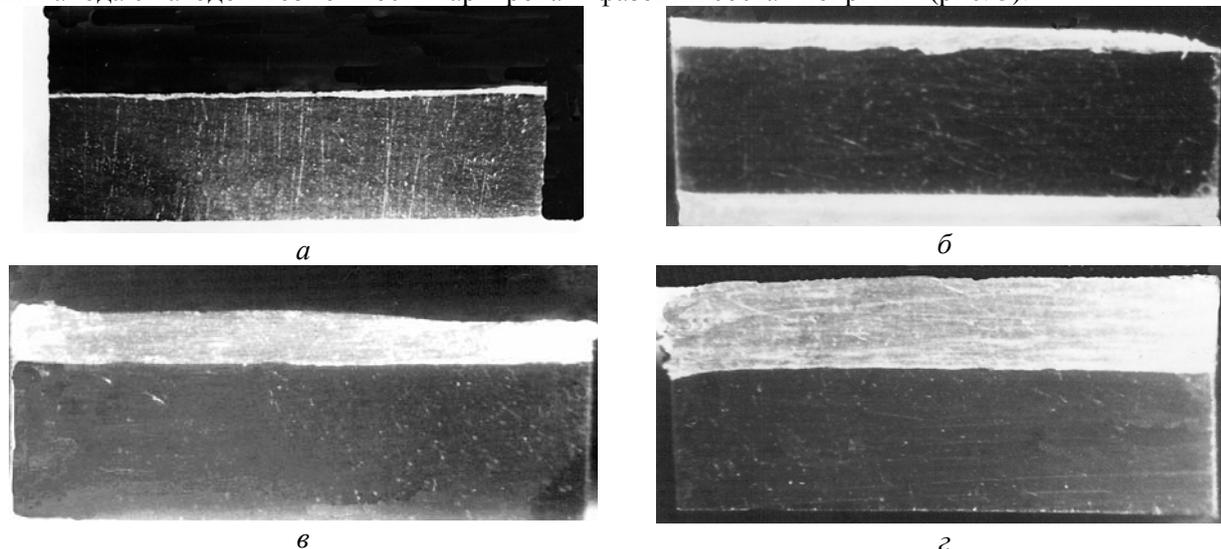


Рис. 4. Зависимость роста толщины слоя алюминия от продолжительности легирования, с: а – 40; б – 120; в – 240; г – 360.

Катод – технический титан ВТ1, вращающийся электрод-инструмент, 6-й режим установки ЭФИ – 10М

Испытания на жаростойкость в диапазоне температур 700–1200°C показали, что покрытия из Al и комбинированные Al +Ni, Al-Cr позволяют защищать титан от газовой коррозии вплоть до 1000°C (например, жаростойкость образцов из сплава титана ВТ6 повышалась в 7–10 раз). Обнаружена также аномально глубокая диффузия (400–800 мкм и более) элементов из сформированных слоев (Cr, Fe, Co, Ni) в основу титана после термодиффузионного отжига в диапазоне температур 850–1200°C.

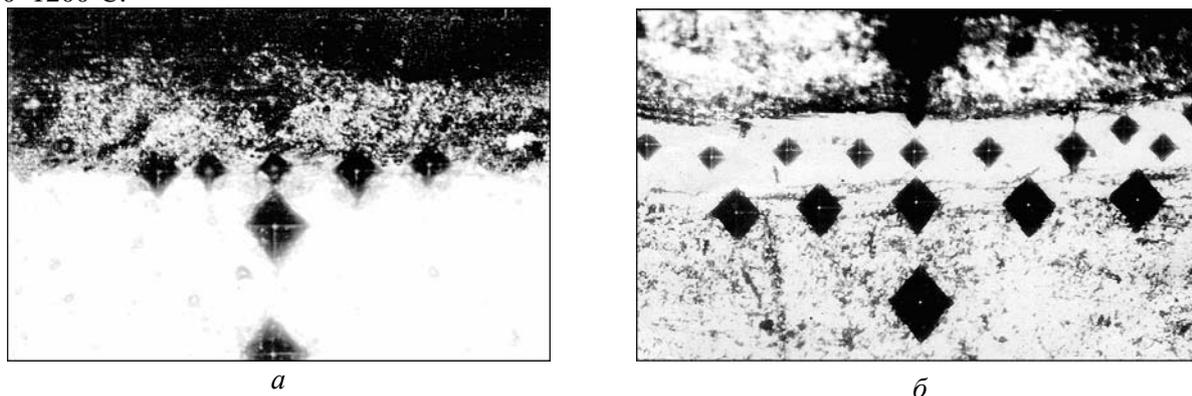


Рис. 5. Микроструктура образцов из технического титана ВТ1, легированных вибрирующим (а) и вращающимся (б) электродами. Энергия разряда – 6 Дж

В дальнейшем с целью более детального изучения этого эффекта установлено, что при обработке ЭИЛ стали и титана с нанесенными на них гальваническими покрытиями из никеля и хрома отжиг в вакууме или химико-термическая обработка (ХТО) в электролитной «плазме» (электролитный нагрев) повышают глубину диффузии в 1,5–2 раза в зонах, где проводилось ЭИЛ [60]. Механизм этого явления связывают с освобождением при отжиге упругой энергии кристаллической решетки, генерированием дислокаций и диффузией примесей по дислокациям. Надо отметить, что в ряде работ явление ускоренной диффузии при отжиге, наблюдаемое при воздействии на металлы ударных волн, пластической деформации, термомеханической обработки и т.п., также объясняется дислокационным механизмом [61].

Практическая ценность этого явления состоит в том, что предварительное воздействие на поверхность металлов импульсных разрядов позволяет в ряде случаев существенно интенсифицировать процессы диффузии при ХТО (при борировании, хромировании и т.п.) (рис. 6) [61]. При варьировании параметров импульсов можно изменять плотность дислокаций в обработанных зонах [62], следовательно, и глубину диффузии при последующем отжиге.

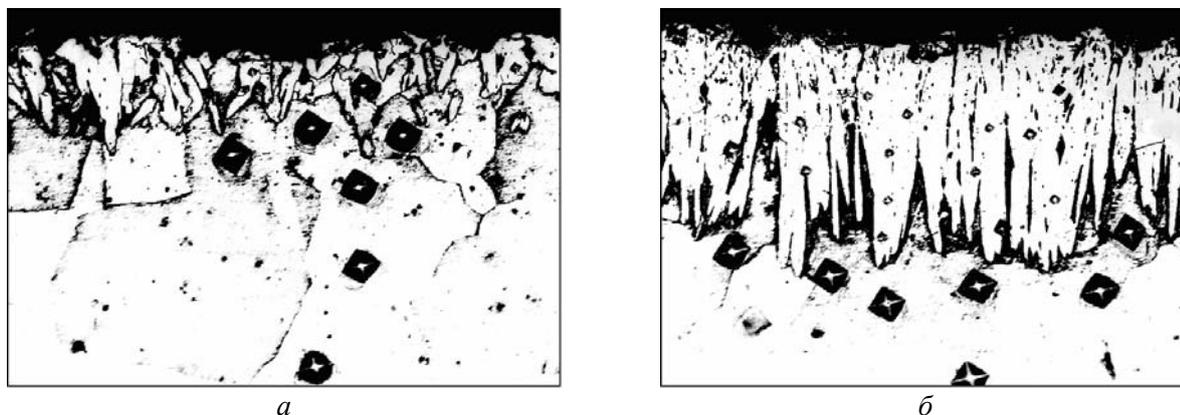


Рис. 6. Микроструктура по сечению образца из Ст. 3, подвергнутого борированию (а) и борированию с предварительным электроискровым легированием (б)

В этом плане эффективным оказался процесс при комбинированной обработке безвольфрамовых твердых сплавов типа КНТ, выполненный под руководством А.Д. Верхотурова [63]. Предварительно осуществив ЭИЛ поверхностей пластин твердых сплавов типа КНТ-16 графитом с последующей химико-термической обработкой в порошковых смесях металлического хрома (или с добавками порошка ПН77Х15С3П5) при температуре 1000-1025°С и времени выдержки 2,5 часа, удалось повысить микротвердость рабочих поверхностей от 1200 до 2000 кгс/мм² на глубину 1,0–1,5 мм. Сочетание высокого уровня микротвердости с высоким сопротивлением окислению при больших температурах позволило увеличить стойкость инструмента из КНТ-16 при точении Ст. 45 более чем в 3,5 раза.

Таким образом, почти одновременно независимые работы выявили возможность использования предварительного электроискрового легирования поверхностей деталей или инструмента для интенсификации диффузионных процессов.

Следовательно, технологические и эксплуатационные 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. Изучение трения и износа на примере ЭИЛ сплава титана ОТ4 переходными металлами (Al, Cr, Co, Ni, Ag) и нихромом Х20Н80 позволило выделить группу покрытий Cr, Co, Ag, показавших (по сравнению со сплавом ОТ4) значительно более низкую (приблизительно 25–30 раз) скорость изнашивания, при этом коэффициент трения в широком диапазоне удельных нагрузок (5–40 кг/см²) не превышает 0,2, а несущая способность сформированных слоев достигает 30–35 кгс/мм², причем в вакууме показатели аналогичны [47].

К важному этапу работ этого направления можно отнести исследование возможности применения ЭИЛ для повышения коррозионной стойкости деталей и конструкций из титана и его сплавов. В одной из первых работ [56] Н.И. Лазаренко подробно рассмотрела возможности метода для повышения коррозионной стойкости стали при использовании в качестве анода широкой гаммы материалов, из которых формировался защитный слой. Хотя долговременной коррозионной защиты создать не удалось, в итоге было отмечено, что электроискровая обработка уменьшает активность поверхностного слоя. Конечно, недостатки данного метода при формировании покрытий (сложности при получении сплошных и равномерных покрытий, их высокая шероховатость, неоднородность структурных и фазовых составляющих, пористость и т.д.) существенно затрудняют создание надежной коррозионной защиты.

При анализе работ по коррозионной защите Борис Романович подчеркивал, что в каждом конкретном случае надо учитывать возможности как самого метода, так и особенности и условия коррозионного поведения сформированных ЭИЛ защитных слоев. С этих позиций была предложена совместная работа с Всесоюзным научно-исследовательским институтом по защите металлов от коррозии (ВНИИНК), связанная с коррозионным и электрохимическим поведением покрытий, получаемых ЭИЛ, разработкой технологии и промышленного оборудования для защиты от электрокоррозии

титановых конструкций, работающих в хлоридно-щелочных средах в условиях воздействия анодных токов утечки.

Титан, отличающийся высокой стойкостью в агрессивных средах и широко применяющийся как конструкционный материал в электрохимическом производстве (в том числе хлора электролизом растворов NaCl, где основными технологическими агентами являются растворы хлористого натрия, хлорная вода и влажный хлор), подвергается местной коррозии при воздействии токов утечки, неизбежных в электрохимическом производстве. Оказалось, что одним из возможных путей защиты титана от коррозионного разрушения является применение сплавов на его основе, способных сохранять стойкость при воздействии анодных токов. Для получения таких сплавов и их внедрения в производство была проведена работа по системе Б.Р. Лазаренко – «идея-эксперимент-практика». Идея в том, что процесс ЭИЛ позволяет достаточно быстро создавать поверхностные слои с очень широкой гаммой фазовых и структурных составляющих, причем за счет параметров разряда, продолжительностью обработки и других факторов можно варьировать состав фаз и их количественное соотношение. Исследованиями фазового состава, электрохимических и коррозионных свойств сформированных покрытий можно оценить оптимальный фазовый состав и условия для создания защитного покрытия. Эта идея связана с данными [47] по ЭИЛ титана алюминием и никелем, где в формируемых слоях обнаружены практически все интерметаллиды и окислы систем Ti-Al и Ti-Ni.

На первом этапе [64] изучалось коррозионное и электрохимическое поведение поверхностных слоев титана, подвергнутых ЭИЛ свинцом, вольфрамом, железом, кобальтом и никелем. Результаты позволили сделать вывод, что наиболее перспективна система Ti-Ni, в которой при ЭИЛ образуются интерметаллические соединения TiNi и Ti₂Ni, TiNi₃, смеси окислов титана и никеля, а также твердых растворов титана в никеле. Кроме того показано, что системы Ti-C-Ni (последовательное нанесение TiC и Ni) и TiCo, созданные ЭИЛ, так же как и TiNi, являются анодными материалами, стойкими в хлоридно-щелочных растворах при высокой и колеблющейся плотностях тока и обеспечивающими защиту титана от электрокоррозии в этих средах [65]. В системе Ti-Ni интерметаллидное соединение Ti₂Ni и его окисленная фаза Ti₄Ni₂O определяют стойкость и электрохимическую активность сформированных покрытий. Детальное изучение влияния условий ЭИЛ титана никелем и отжига на фазовый состав поверхностного слоя выявило оптимальные энергетические и временные параметры режимов обработки, при которых создается максимальное количество интерметаллида Ti₂Ni и фазы Ti₄Ni₂O [66]. Экспериментально установлено, что лучшие характеристики защитных поверхностных слоев достигаются при энергии разрядов $W \geq 4-6$ Дж (это запасенная энергия конденсаторов промышленных ручных установок ЭФИ-46 (Элитрон-22 и ЭФИ-23М)), и скорости обработки поверхности при вибрирующих электродах-инструментах – $2 \div 6$ см²/мин.

Эксперименты, проведенные на ручных установках с относительно невысокой производительностью, впоследствии продолжились на механизированных высокопроизводительных установках. Использовалась механизированная установка с вращающимся электродом-инструментом ЭФИ-68, созданная на Опытном заводе ИПФ. При скорости обработки поверхности титана 20 см²/мин были проведены предыдущие исследования системы Ti-Ni. Конечные результаты оказались аналогичными, полученным на ручных установках (например, ЭФИ-23М при скорости 2–5 см²/мин). На этой основе на ОЗ создали механизированную промышленную установку «Антик», позволяющую наносить покрытия на внутренние и наружные цилиндрические поверхности титановых деталей со скоростью до 20 см²/мин. Технология ЭИЛ и установка были освоены на уфимском ПО «Химпром» на основе авторского свидетельства [67], а затем и на других предприятиях Минхимпрома.

Следует отметить несколько важных факторов, способствующих положительному решению рассмотренной задачи. Во-первых, процесс ЭИЛ титана никелем позволял формировать многофазные поверхностные слои на рабочих деталях, где присутствовали интерметаллидные системы титан-никель, в том числе Ti₂Ni и Ti₄Ni₂O, ответственные за коррозионную защиту титана в хлоридно-щелочных растворах. При этом параметры и условия ЭИЛ (энергия разрядов, время обработки, система электродов-инструментов и т.п.) дают возможность регулировать фазовый состав таким образом, чтобы эти две фазы были преобладающими. Во-вторых, для указанных выше результатов используются достаточно большие энергии ($\geq 4-8$ Дж) и скорости ЭИЛ (≥ 20 см²/мин), что сопровождается большой шероховатостью и несплошностью формируемых покрытий (недостатки ЭИЛ). В данном случае в системе Ti-Ni реализуется не кроющий механизм защиты, а электрохимический [68, 69], поэтому 100% сплошности не требуется. Большая шероховатость создает развитую поверхность, увеличивая допустимую плотность тока на единицу площади, а это положительный эффект.

Подход к формированию коррозионностойких поверхностных слоёв методом ЭИЛ, предло-

женный Борисом Романовичем в совместных работах с ВНИИК, был реализован в дальнейших исследованиях и завершился внедрением в промышленность в начале 80-х годов. Оценки возможностей использования ЭИЛ для коррозионной защиты металлических деталей и конструкций были продолжены в сотрудничестве с Институтом физической химии (ИФХ) АН СССР, в лаборатории коррозии сплавов, руководимой профессором Н.Д. Томашовым, с участием д.х.н. Г.П. Черновой, Л.П. Корниенко, Т.А. Федосеевой, Т.В. Чукаловской, В.В. Бандуркина, Т.Н. Устинской и других.

В ряде работ изучено электрохимическое и электрокоррозионное поведение в растворах 10–40% H_2SO_4 при 20–100°C титана и нержавеющей сталей (X25T, X28H6M2TЛ, X18H10T) при электроискровом легировании палладием и комбинацией хром плюс палладий [69–71]. При оптимальных режимах ЭИЛ нержавеющей хромистых и хромоникелевых сталей, а также титана и его сплавов палладий позволяет значительно повысить их пассивируемость и на несколько порядков коррозионную стойкость, при этом расход палладия не превышает (0,1–1) г/м².

Также изучено анодное поведение поверхностных слоёв в синтетической речной и морской воде системы титан–никель [66], полученных при различных условиях ЭИЛ с последующим отжигом и электролитическим насыщением азотом и углеродом [72–73]. Лучшие результаты выявлены при ЭИЛ и отжиге на воздухе без насыщения покрытия азотом и углеродом. Титан–никелевые поверхностные слои, сформированные методом ЭИЛ, достаточно эффективны по электрохимическим и коррозионным свойствам для анодов в речной и морской воде. В работе [73] предложен экспресс-метод установления ресурса работы неравномерных электроискровых покрытий, который с большой точностью позволяет определять срок их службы в различных условиях коррозии.

Метод ЭИЛ даёт возможность формировать на титане карбидные и нитридные покрытия из компактных электродов-анодов TiC, TiN либо синтезировать их в процессе обработки (для карбидных – с помощью графитового электрода, например, МПГ–6, для нитридных – за счёт азота воздуха или в специальной камере с азотом при ЭИЛ электродом-анодом из титана). В работе [74] исследованы коррозионные и электрохимические свойства сформированных на титане покрытий TiC, TiN, полученные при отмеченных вариантах ЭИЛ. Коррозионные испытания (H_2SO_4 при 80°C) показали, что карбидные и нитридные покрытия, сформированные на титане, повышают коррозионную стойкость на два–три порядка. Карбидные покрытия, созданные путём синтеза, имеют большую коррозионную стойкость и большой ресурс, чем нитридные, нанесённые как из компактных электродов, так и в особенности синтезированные. Эти результаты дают возможность реализовать процесс ЭИЛ для защиты титана от коррозии в кислых неокислительных растворах. Перспективные исследования с использованием ЭИЛ проведены в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова (при участии группы ЭИЛ ИПФ АН МССР). При ЭИЛ титана платиной выявлена многофазность формируемых слоёв, связанная с образованием нескольких интерметаллических соединений системы титан–платина, количественное соотношение которых и состав можно регулировать параметрами процесса. Это позволяет достаточно просто и быстро создавать покрытия на титане с определёнными электрохимическими и каталитическими свойствами. Значительная часть исследований по использованию ЭИЛ для коррозионной защиты показывает, что этот процесс в силу ряда особенностей, рассмотренных ранее, наиболее эффективен, когда реализуется протекторный механизм защиты от коррозии. Кроющий механизм при ЭИЛ достаточно трудно реализовать, хотя для ряда материалов при определённых параметрах и условиях формируются сплошные покрытия, как, например, при ЭИЛ титана алюминием вращающимся многоэлектродным инструментом [47].

Для более полной оценки возможностей ЭИЛ больших плоских поверхностей в плане их коррозионной стойкости ИПФ и Опытный завод разработали и изготовили установку типа «Плоскость-3», оснащённую 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 ($\geq 1m^2$) плоских конструкций автомашин из стали 3 путём формирования покрытий из алюминия или его сплавов. Эту совместную работу провели специалисты автозавода, Ижевского госуниверситета, Физико-технического института Уральского отделения АН СССР [75].

При исследовании отмечалось, что для обработки больших площадей целесообразно использовать многоэлектродный вращающийся инструмент, при этом в качестве анодов из алюминия более эффективны проволочные электроды диаметром 3–4 мм. При изучении коррозионных свойств покрытий из алюминия и сплава алюминий–цинк–магний в камере искусственного климата устанавливался различный механизм коррозии в зависимости от толщины и качества сформированного слоя. При толщине слоя меньше 25–30 мкм и наличии пористости (возможно, и несплошности) защита от коррозии обеспечивается протекторным механизмом. По мере наращивания толщины покрытия до

36–40 мкм и более, ликвидации пористости (неплотности) и увеличении алюмооксидной составляющей слоя, помимо электрохимического, действует и кроющий (экранирующий) механизм защиты от коррозии. Такие покрытия снижают скорость коррозии во влажной атмосфере более чем на два порядка, и их, очевидно, можно использовать для защиты от коррозии в нейтральных электролитах, в морской воде, от подземной и атмосферной коррозии в условиях умеренного, морского и тропического климата. Таким образом, возможности ЭИЛ позволяют реализовать одновременно два механизма коррозионной защиты.

Кроющий механизм защиты от коррозии методом ЭИЛ обоснован в работе А.В. Козыря [76] в Институте материаловедения ДВО РАН. Использовался вибрирующий электрод-инструмент, а коррозионностойкий слой формировался при двухслойном легировании стали 45; наносился хромоникелевый сплав (например, X20P80H), затем чистый хром и никель. Коррозионная стойкость стали 45 в растворе 0,1 H₂SO₄ повышалась на порядок и более.

В работе Т.В. Глабец [77] 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 H₂SO₄. Величина стационарного электрохимического потенциала стали 45, модифицированной всеми переходными металлами, за исключением ванадия, тантала, гафния, сдвигается в катодную область относительно потенциала нелегированной стали, т.е. анодный процесс растворения металла тормозится. В этом случае 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. Исследования базировались на результатах, полученных в работах [64–67, 72, 73]. МРА создавались формированием на титане поверхностных слоев в виде гетерогенных смесей и титан-никелевых интерметаллидов, графита и карбидов при определенном количестве углерода в поверхностном слое. Титан-никелевые интерметаллиды обеспечивают электрохимические и коррозионные свойства МРА, дополнительные фазы – графит и карбиды формируют дисперсную структуру, представляющую собой квазиравновесную систему, поверхностная энергия которой близка к нулю, что обеспечивает более высокую коррозионную стойкость анода и более низкое переходное сопротивление [78]. В настоящее время готовятся испытания таких анодов на реальных объектах. Следует отметить, что возможности ЭИЛ в области коррозионной защиты далеко не полностью выявлены. Проведенные исследования показали большие возможности метода для получения покрытий с эффективными электрохимическими и коррозионными характеристиками. Широкое практическое использование ЭИЛ в этом направлении ждет своих решений.

Наиболее важные и сложные задачи, связанные с изучением физических аспектов ЭИЛ и разработкой новых вариантов процесса, увязывались с расширением сферы использования и технологическими характеристиками процесса – повышением производительности, качества и толщины формируемых слоёв, разработкой новых источников импульсов, созданием механизированного и автоматизированного оборудования.

При известных достоинствах ЭИЛ присущи определённые недостатки: невозможность использовать электроды с высоким удельным сопротивлением, трудности нанесения материалов на определённые виды подложки, невысокая производительность, ограниченность толщины формируемых слоёв и т.п. В то же время в этот период 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 научного сотрудника Н.Я. Парканского [79]. Поисковые эксперименты позволили установить, что оптимальный вариант формирования покрытий из порошковых материалов достигается, когда совместно с низковольтными сильноточными импульсами ($U \sim 50\text{--}400$ В, энергия разряда $W \sim 5\text{--}50$ Дж) при подаче частиц в межэлектродный промежуток (МЭП) под действием сил гравитации на МЭП налагается электрическое поле 0,5–3 кВ/мм. Исследование физических аспектов процесса Н.Я. Парканский провёл на достаточно высоком уровне с помощью скоростной фото- и киносъёмки камерами (это был

наиболее сложный и информационный эксперимент), осциллографированием импульсных разрядов в условиях их инициирования порошком, изучения изменения дисперсности порошкового материала в результате его прохождения через канал разряда, а также анализа следограмм, создаваемых единичными разрядами [80]. Метод позволяет формировать покрытия, используя или только паровую фазу, или систему пар-жидкость; толщина формируемых покрытий может достигать 20–300 мкм и определяется режимами обработки и свойствами используемого материала.

Было показано, что инициирование пробоя МЭП происходит за счёт микроразряда между частицей и катодом. При прохождении частицы порошка через канал искрового разряда наблюдается локальный выброс материала частицы на катод, а количество материала, нанесённого на подложку, зависит как от энергетических параметров процесса, так и от свойств материала частицы и её размера [80]. Наличие большого МЭП (0,3–1,5 мм) приводит к перераспределению энергии разряда между электродами и каналом разряда, что уменьшает эрозию электродов и даёт возможность обрабатывать детали из легкоплавких материалов, например из алюминия и его сплавов. Обработка вкладышей опорных подшипников коленчатого вала из сплава АКЧ никелевым порошком уменьшила их деформацию в 10 раз.

Эта работа явилась пионерской в плане ЭИЛ порошковыми материалами. Было изучено влияние технологических параметров на формирование покрытий из порошковых материалов, физико-химические превращения в сформированных слоях, физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий - остаточные напряжения, усталостная прочность легированных деталей, адгезионные характеристики покрытий, их износостойкость и антифрикционные свойства [48]. Результаты легли в основу опытно-конструкторской разработки института и Опытного завода и изготовления первого опытно-промышленного образца установки типа «Разряд» для формирования покрытий из порошковых материалов [81]. В дальнейшем в течение 6–8 лет установки типа «Разряд» совершенствовались, создавались новые модификации и модели («Разряд-М», «Разряд-2», «Разряд-3»), которые изготавливались ОЗ и поставлялись в различные организации: ВИАМ, НИИАТ (г. Москва), Институт материаловедения ДВО АН СССР (сейчас ИМ Хаб.НЦ ДВО РАН), где и в настоящее время работает «Разряд-3».

На базе первого варианта [79] ЭИЛ порошковыми материалами с наложением на МЭП постоянного электрического поля Н.Я. Парканский и В.М. Ревуцкий при участии А.Е. Гитлевича и В.В. Михайлова создали второй вариант этого процесса с наложением на МЭП импульсного электрического поля [82], что позволило стабилизировать инициирование низковольтного разряда независимо от подачи порошка в МЭП. Этот вариант процесса ЭИЛ использовался в установках «Разряд-1», «Разряд-2», «Разряд-3».

Процесс ЭИЛ на основе порошковых материалов существенно расширил технологические возможности метода (если исходить от базового контактного процесса [57]), 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, например, при использовании смеси порошков, содержащих 50–60% никеля и 40–50% алюминия, при определённой 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 микротвёрдость (600–680 кгс/мм) [83].

Введение в МЭП порошков ряда металлов (меди, никеля, железа, карбида вольфрама и других) и графита при объёмном отношении компонентов металла к графиту (2...1):1, при энергиях разряда 7,7–48 Дж и удельном времени обработки 1,2–1,8 мин/см² в формируемом покрытии происходит синтез алмазной фазы. При таких условиях ЭИЛ её содержание достигало 20–30%, что обеспечило высокую микротвёрдость формируемых слоёв: из меди – до 2800 кгс/мм²; из никеля и железа – до 3000 кгс/мм²; из карбида вольфрама – до 3600 кгс/мм². Таким образом, методом ЭИЛ с использованием порошковых материалов была показана возможность синтеза алмазной фазы в формируемых слоях, позволяющая значительно повышать твёрдость создаваемых покрытий [84].

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 [85].

Технология ЭИЛ порошковыми материалами позволяет целенаправленно управлять структурой формируемого слоя. Варьирование энергетическими режимами процесса, расходом порошка, подаваемого в МЭП, даёт возможность создания как плотного покрытия, так и покрытия, обладающего капиллярно-пористой структурой [86]. 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. Шкилёв).

Использование импульсного высоковольтного (> 15 кВ) поджига даёт возможность располагать систему электродов (анод-катод) относительно детали таким образом, что образуются два МЭП, обеспечивающих одновременно процесс нанесения покрытия и её электроэрозионную шлифовку, при этом деталь не нуждается в токоподводе [87] и отпадает необходимость иметь двухимпульсный генератор, в котором обычно один импульс используется для формирования покрытия, а второй - для электроэрозионного шлифования. Предложенный способ эффективен для ЭИЛ тонкостенных ажурных деталей.

В НИИАТ была передана и запущена одна из установок типа «Разряд-М», на которой были изучены процессы формирования покрытий из различных материалов, в том числе с высоким удельным сопротивлением (Al_2O_3 , ZrO_2), представляющих интерес для авиационной технологии. Порошковый процесс позволил создать на титановых сплавах и спецсталих качественные и износостойкие покрытия [88]. В результате совместной работы ИПФ и НИИАТ был предложен способ электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов, повышающий производительность существующего процесса почти в 5 раз [89], что отражено в совместных публикациях.

Порошковый процесс позволил получать покрытия, толщина которых превышала в 1,5–2 раза слои, создаваемые при контактном варианте, но явления ограничения толщины слоя (ОТС) имели место и в новом процессе. Изучение влияния удельного времени обработки t на величину остаточных напряжений σ и привеса катода Δm , его периодический отжиг с контролем σ и Δm , а также электронно-микроскопические исследования состояния поверхности выявили комплексное влияние на ОТС (помимо уже известных факторов – хрупкого разрушения, фазовых превращений и т.п.) предварительного напряженно-деформированного состояния верхних зон покрытия и импульсных термических напряжений, возникающих при действии разряда [90]. Эта тема получила дальнейшее развитие в работе [91], где экспериментально и теоретически рассмотрена кинетика разрушения покрытий при электроискровом легировании.

В работах А.И. Михайлюка по исследованию ЭИЛ покрытий на железе, титане, меди при их обработке одноимёнными материалами была выявлена субструктура формируемых слоёв. Использовался метод съёмки в скользящем дифрагмированном пучке, разработанный в Московском Институте стали и сплавов. Согласно исследованиям основной вклад в дефектность структуры вносит дисперсность блоков, величина которых зависит от энергии разрядов. При этом степень упрочнения кристаллической решётки для железа и титана может приближаться к критической. Максимальная микротвёрдость отмечается при энергии разряда соответствующей минимальной дисперсности блоков мозаики 17–20 нм - для железа и титана и 130 нм – для меди; эти результаты получены при анализе механизма ограничения толщины слоя [92].

Исследования Н.Я. Парканского по использованию импульсных разрядов для создания новых технологий многие годы успешно продолжаются в Лаборатории электрических разрядов и плазмы Тель-Авивского университета в Израиле, о чём можно судить по его публикациям [93].

Н.Я. Парканский с аспирантом В.М. Ревуцким изучили порошковый процесс ЭИЛ с импульсным поджигом [82], создали макетный образец установки «Разряд-М» и с помощью скоростной съёмки проанализировали поведение частиц порошка в МЭП при импульсном поджиге [80, 94]. Эти работы открыли путь к новой серии установок типа «Разряд». На установке «Разряд-М» исследовано взаимодействие импульсных разрядов с поверхностью катода в отсутствие порошка. Благодаря этим данным появилась дополнительная информация о состоянии поверхности катода при взаимодействии с частицами порошка; были отмечены элементы многоканальности импульсных разрядов на промежутках больше пробивных и появление на катоде эрозионных следов 1-го и 2-го типа [95–96].

Интересный этап исследования группы ЭИЛ был связан с изучением распределения химических элементов в сформированном слое на катоде и установлением механизма диффузии в твёрдой фазе, наблюдаемой при воздействии импульсных разрядов. При ЭИЛ в процессе формирования поверхностного слоя на катоде происходит интенсивное взаимодействие жидких фаз материала электродов, обусловленных конвективным и гидродинамическим перемешиванием, способствующих установлению между ними химической связи и развитию объёмных процессов само- и гетеродиффузии, образованию интерметаллидов и т.п. Помимо явлений в жидкой фазе, из которой формируется слой покрытия, во многих случаях отмечается диффузия элементов анода в основу - катод в твёрдой фазе.

Эти явления определяют фазовые и структурные превращения, влияющие на свойства формируемых слоёв, и одну из важнейших характеристик ЭИЛ – высокую адгезионную связь покрытия с основой (обрабатываемой поверхностью). Количественный состав и распределение элементов, как

правило, определяются микрорентгеноспектральным анализом [97]. Для предварительной оценки распределения элементов (без использования достаточно сложного и дорогостоящего оборудования) была предложена одна из простейших аналитических моделей, позволяющая при определённых условиях ЭИЛ оценить характер распределения материала электродов в сформированном слое [98].

Более достоверные и полные данные по распределению элементов в поверхностных слоях катода можно получить с помощью разработанного в Институте металлофизики (ИМФ) УССР метода радиоактивных изотопов [99, 100]. Совместно были проведены работы по оценке массопереноса как в зоне, сформированной из жидкой фазы, так и в твёрдой фазе материала катода при ЭИЛ различных материалов (железа, титана). Анализ автордиограмм позволил судить о сплошности и равномерности покрытий в зависимости от режимов обработки, выявить эффекты аномальной диффузии в твёрдой фазе ее объёмный механизм. При этом концентрационные зависимости радиоактивного элемента в твёрдой фазе при ЭИЛ подобны таковым, получаемым при различных видах импульсного воздействия на металлы (многократного лазерного воздействия, электрогидроимпульсной обработки, импульсного магнитного поля, многократного ударного нагружения и т.п.) [97]. На этой основе была предпринята попытка разработать модель массопереноса, позволяющую количественно описать экспериментальные концентрационные зависимости как при ЭИЛ, так и при других видах импульсного воздействия на металлы [97, 99]. Решение этой задачи позволило утверждать, что интенсивность массопереноса в твёрдой фазе прямо пропорциональна плотности теплового потока на границе твёрдой фазы катода. Кроме того, на основании данных работы [99] можно предполагать, что одной из причин высокой подвижности атомов в твёрдой фазе является локальная деформация кристаллической решётки. Значительная часть (особенно математическая интерпретация) описанных исследований выполнена В.Ф. Душенко совместно с В.М. Ревуцким.

Так как в тематику группы ЭИЛ входили задачи, связанные с изучением ограничения толщины формируемых слоёв и разработкой новых вариантов процесса, то в итоге исследований можно было ожидать новых технологий, позволяющих существенно увеличить толщину наносимых слоёв (как минимум в 2–3 раза и более) по отношению к максимальной (~0,1–0,15 мм), получаемой по стандартной технологии. Разработанный вариант ЭИЛ с использованием порошка частично решил эту задачу, и толщина покрытий повысилась в 1,5–2,0 раза.

Увеличению толщины формируемого слоя при ЭИЛ посвящено достаточно много работ с различными технологическими подходами к решению задачи. Наиболее простой вариант связан с использованием относительно высоких энергетических параметров ЭИЛ, например: энергии разряда $W > 10–15$ Дж, рабочего тока $I_p > 20–30$ А, длительности импульсного разряда $\tau_u > 300–400$ мкс. При таком варианте можно получить толщину слоя, равную (по наиболее выступающим частям покрытия) 1–2 мм и более, но при значительном снижении качественных характеристик покрытий (равномерности, сплошности, пористости, изменяется структура, фазовый состав, появляются пригары, окислы и т.п.). Было показано, что использование инертных сред, вакуума, периодического отжига, поверхностно–пластической деформации, подогрева электродов, применение поверхностно–активных веществ и т. п. – все это также влияет на увеличение толщины формируемого слоя. В работе И.А. Бакуто и М.К. Мицкевича [101] было установлено, что при нанесении бронзы, алюминия и других относительно легкоплавких материалов на сталь при определённых режимах обработки и видах движения электрод–инструмента (вибрирующий не перемещающийся анод) удаётся локально получить линейную зависимость привеса катода от времени обработки и формируемые слои толщиной несколько миллиметров ($> 2–4$ мм). Аналогичная зависимость получена В.В. Михайловым [47] при исследовании ЭИЛ титана алюминием с помощью роторного вращающегося электрод–инструмента с проволочным алюминиевым анодом.

Наиболее эффективное и приемлемое для практики решение проблемы “толстых” слоёв было разработано группой ЭИЛ в содружестве с Научно–исследовательским институтом завода “Сибэлектротяжмаш” г. Новосибирска [102–103]. Сочетание ряда условий ЭИЛ, которые влияют на широкий спектр эффектов на электродах (агрегатное состояние переносимого материала анода на катод, температурный режим, структуру и т.д.), позволило формировать покрытия толщиной 1–3 мм из различных сталей, сплавов, никеля, меди, алюминия и других материалов по всей обрабатываемой поверхности детали. По этой технологии ЭИЛ осуществляется с помощью роторных вращающихся инструментов при энергетических параметрах разряда, обеспечивающих перенос материала анода в капельно–жидкой фазе, что создаётся определённой плотностью энергии разряда на торце анода, и с заданным временным интервалом между двумя последовательными разрядами. На этой основе в ИПФ и на Опытном заводе были разработаны механизированные установки типа “Элитрон–354” и “Элитрон–ТСП”, а также технологические процессы для ЭИЛ деталей типа тел вращения, которые существенно

расширили возможности ЭИЛ, особенно в ремонтном производстве [104,105]. На рис. 7 показана первая установка для получения толстых (1–3 мм) покрытий, изготовленная в НИИ завода “Сибэлектротяжмаш” при участии сотрудников ИПФ АН МССР.

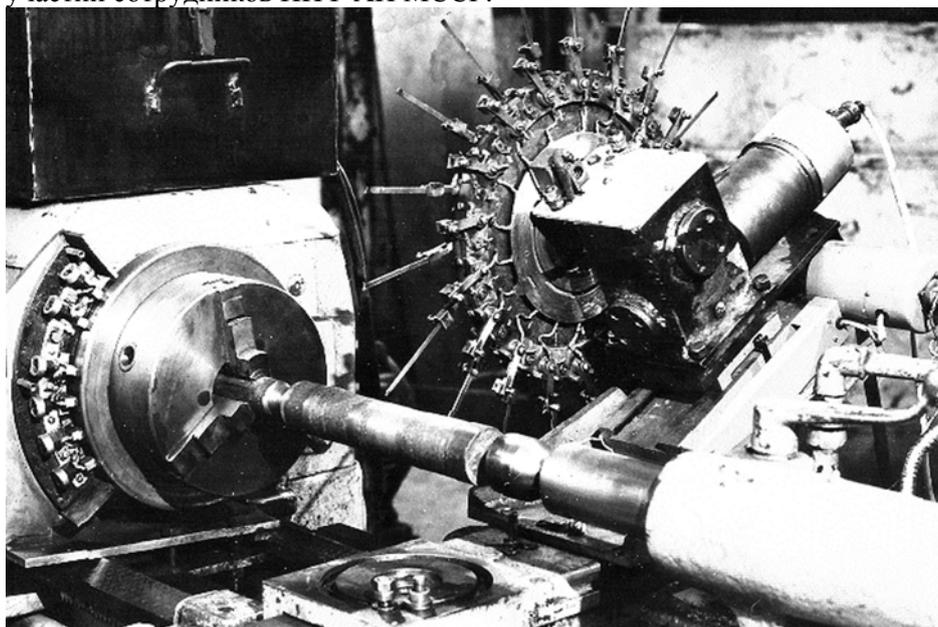


Рис. 7. Механизированная установка для получения толстых покрытий

Разработка и исследование второго варианта формирования покрытий из порошковых материалов с помощью мощного искрового разряда (“МИР”) проведены В.Н. Ткаченко [106]. Анализ физических процессов, сопровождающих “МИР”, показал, что при определённых условиях нагрева и транспортировки порошков для создания покрытий этот вариант может быть альтернативой газопламенному, плазменному, детонационному и другим методам напыления. Покрытия, наносимые наиболее универсальными методами – газопламенным, плазменным напылением, обладают значительной пористостью и недостаточно прочным сцеплением с основой из-за низкой скорости напыляемых частиц. Состав и эксплуатационные свойства покрытий, нанесённых детонационным методом, электрическим взрывом проволочек и фольги, по их качеству существенно выше. Но эти методы не универсальны из-за ограниченной температуры взрывогазовой смеси и технологической сложности у первого и невозможности нанесения материала с большим удельным сопротивлением у второго.

С помощью “МИР” в системе коаксиальных плазменных ускорителей (КПУ) могут быть получены плазменные потоки в широком диапазоне скоростей (от десятков до нескольких тысяч м/с), что в свою очередь позволяет в больших пределах регулировать скорость и температуру напыляемых материалов (до $(1-2) \cdot 10^3$ м/с) и температуры испарения. Такие параметры потоков наносимых материалов обеспечивают формирование покрытий с большой когезионной и адгезионной прочностью, малой пористостью ($< 1-2\%$), высокой плотностью и равномерностью.

Высокие скорости и температуры потоков плазма-порошок обеспечивают прочное сцепление наносимых покрытий с основой. Так, при формировании слоёв из Cu, Ni, WC+ 6% Co на стали 45 прочность сцепления покрытий в 2–2,5 раза выше, чем при газопламенном и плазменном напылении. Покрытия из карбида, титана, хрома, сформированные с помощью “МИР”, повышают износостойкость деталей по сравнению с борированной и закалённой сталью ХВГ почти в 10 раз. Системы “МИР” позволяют также создавать эффективные жаро- и коррозионностойкие покрытия из алюминия и его сплавов, соединений алюминия с никелем и т.п.

Следует отметить, что рассматриваемый метод, как один из наиболее универсальных, даёт возможность моделировать практически все методы формирования покрытий, получаемых из порошковых материалов, - от газопламенных до взрывных, причём не требует транспортирующих газов, так как ускорение и перемещение материалов осуществляются за счёт электродинамических и газодинамических сил, а их нагрев импульсной плазмой обеспечивает широкий диапазон температур частиц - от плавления до кипения. Импульсные плазменные потоки с частицами порошка позволяют формировать покрытия практически из любых металлических и керамических материалов, если они могут быть получены из порошков определённой дисперсности ($\sim 10-100$ мкм). Несмотря на широкие возможности “МИР” для создания технологических процессов нанесения покрытий и обработки поверхностей высокоскоростными плазменными потоками, только в восьмидесятые и девяностые годы появились разработки и исследования в этой области [107–108], хотя еще в 1972 г. Б.Р. Лазаренко в ста-

тье “Плазмоиды – мощный технологический фактор” [109] отметил перспективность подобных технологий.

В соответствии с задачами, возложенными Б.Р.Лазаренко на группу ЭИЛ, практически все ее сотрудники многие годы систематически участвовали в опытно-конструкторских разработках, в наладке и испытаниях новых установок для ЭИЛ, создаваемых как по планам новой техники ИПФ и договорам, так и по плановым разработкам Опытного завода. ОКР, изготовление и испытание серии установок «Разряд» («Разряд 1», «Разряд М», «Разряд 2, 3»), «Плоскость 3», «Плоскость 4», «Серебро», «Серебро 3», «Программа», «Антик» и другие были выполнены по техническим заданиям ИПФ, составленным совместно с сотрудниками ОЗ. Установки «Элитрон-354», «Элитрон-ТСП», «Элитрон-50 и 52» испытывались и доводились до стабильного рабочего состояния при участии специалистов группы ЭИЛ. Многоконтурная установка ЭФИ-87 (следующая модель «Элитрон-180»), разработанная на первом этапе ОЗ, в дальнейшем была модернизирована с помощью сотрудников ИПФ (В.М. Ревуцким и другими) [104]. Некоторые установки ОЗ для серийного производства создавались на базе совместных авторских свидетельств ОЗ и ИПФ, например «Элитрон-52» [105] и т.д. Значительный вклад в совместные разработки с ИПФ внёс руководитель технологического сектора ОЗ В.И. Иванов.

Немногим более чем за 10 лет через группу ЭИЛ (выполнение ОКР, разработок, испытаний и внедрений в производство) прошло свыше 20 типов ручных и механизированных установок, большая часть которых была поставлена заказчикам и запущена в работу. Ряд установок (в основном ручных) выпускался относительно большими партиями (50–100 шт.). Значительная часть результатов НИР группы ЭИЛ совместно с Опытным заводом была реализована в опытных и опытно-промышленных образцах установок и технологиях различных вариантов ЭИЛ, которые в большинстве случаев нашли своих потребителей.

Проблемные направления исследований группы ЭИЛ связаны прежде всего с научным руководством Бориса Романовича, с учетом того, что ещё в ЦНИИ-Электром он возглавлял Отдел новых процессов. Это и отразилось на основных направлениях исследований созданной им группы. Помимо изучения ряда важных для контактного процесса физико-технологических проблем, Борис Романович считал, что разработка новых вариантов ЭИЛ (по существу новых процессов) поможет значительно повысить эффективность и расширить возможности исходного метода, созданного им ещё в 1943 г.

После кончины Бориса Романовича практически все его ученики, уже будучи руководителями аспирантов или научных сотрудников - соискателей учёных степеней, продолжали исследования как в области физико-технологических проблем контактного процесса (диссертационная работа А.И. Михайлюка [92], соруководитель А.Е. Гитлевич), так и новых вариантов ЭИЛ (диссертационные работы А.П. Абрамчука [110], П.В. Перетятку [111] – руководитель В.В. Михайлов, П.А. Топала [112] – руководитель А.Е. Гитлевич).

Тесное творческое содружество с ведущими НИИ СССР в области материаловедения, электрофизики и электрофизических методов обработки, которые рекомендовал Борис Романович, сочеталось (по его же инициативе) с совместными работами лабораторий внутри ИПФ. Многочисленные работы были выполнены с Лабораторией физических методов исследования твёрдого тела (при участии Ю.А. Симонова, Г.И. Димитровой, М.М. Маркус, Г.Ф.Володиной, М.Д. Мазус и других), Лабораторией электрохимической обработки металлов (при участии С.П. Сидельниковой, Л.Н. Андреевой, Ж.И.Бобановой), Лабораторией электрических методов управления тепловыми процессами (при участии М.К. Бологи, Л.М. Молдавского, В.Д. Шкилёва), Лабораторией электрической флотации (при участии К.А. Киселёва). От физической части ИПФ (Отдел статфизики) активное и многолетнее участие в НИР группы ЭИЛ принимал к.ф.-м. н. В.Ф. Душенко. Высокий уровень математической подготовки, широкий кругозор физика-теоретика позволили ему участвовать в теоретических исследованиях и интерпретации большой гаммы физических процессов, протекающих при различных вариантах ЭИЛ. Совместно с сотрудниками группы он опубликовал более десяти научных статей, например [98–100].

В статье, посвящённой столетию со дня рождения Б.Р. Лазаренко (в разделе “Развитие метода ЭЭО в Кишинёве”), рассмотрены научные исследования сотрудников и аспирантов ИПФ, руководителем которых в области ЭЭО и ЭИЛ был непосредственно Б.Р. Лазаренко, а также работы группы ЭИЛ, созданной и руководимой им же. Б.Р. Лазаренко был научным руководителем диссертационной работы М.Я. Любчика “Разработка и исследование полупроводниковых генераторов для питания электроэрозийных установок”.

В ИПФ были выполнены несколько диссертационных работ в области ЭИЛ без прямого участия Б.Р. Лазаренко. Так, научным руководителем работы И.И. Сафронова [45], выполненной в ИПФ

и представленной к защите в ИПМ АН УССР, был член-корреспондент АН МССР Ю.Н. Петров, заведующий Отделом электрохимической обработки металлов. Под руководством заведующего Лабораторией импульсно-газовой электроники С.П. Фурсова были выполнены исследовательские работы по разработке и созданию оборудования для высокочастотного вибрационного ЭИЛ (А.М. Парамонов) [113].

Решение Бориса Романовича в конце 60-х гг. об интенсивном развитии процесса ЭИЛ в ИПФ АН МССР, а также подготовка и выпуск Опытным заводом первых партий промышленных образцов установок для ЭИЛ вызвали интерес и дали толчок к проведению работ, связанных с процессом ЭИЛ в Кишиневском сельскохозяйственном Институте (КСХИ). Можно с большой долей уверенности утверждать, что этому способствовало научное содружество и коллегиальные отношения Бориса Романовича с зав. Отделом электрохимической обработки материалов академиком Ю.Н. Петровым, одновременно заведовавшим кафедрой эксплуатации и ремонта сельхозмашин. Кафедра сопротивления материалов КСХИ (зав. проф. Л.И. Дехтярь) на тот период обладала современной методикой и оборудованием для изучения физико-механических характеристик конструкционных материалов, деталей машин и аппаратов, которые позволяют достаточно надежно определять модуль упругости в неоднородных материалах, остаточные напряжения, усталостную прочность, выносливость валов (в том числе с покрытиями) и т.д. Эти методики и оборудование при непосредственном участии сотрудников кафедры (Л.И. Дехтярь, Д.А. Игнатков и другие) были широко использованы для оценки физико-механических свойств различных деталей, подвергнутых ЭИЛ [114], что давало возможность корректировать процесс с целью получения оптимальных физико-механических характеристик, а также выбирать методы дополнительной поверхностной обработки. Большой объем работ сотрудники кафедры провели совместно с коллегами ОЗ, разработали достаточно важную для практики комплексную технологию (ЭИЛ + выглаживание) восстановления изношенных поверхностей поворотных кулаков автомашин [115], что позволило определить ряд особенностей порошкового ЭИЛ [116]. Упомянутое сотрудничество ИПФ, ОЗ и КСХИ поддерживалось Б.Р. Лазаренко, чтобы доводить разработки института и Опытного завода до стадии надежного промышленного применения.

Развитие метода ЭЭО в Москве

В 40–60-х гг. – период научной деятельности Б.Р.Лазаренко – Москва стала самым крупным и авторитетным центром в области исследований физической природы ЭЭО и ЭИЛ, изучения и разработки принципиально новых технологических процессов для практического применения этих методов и создания оборудования для различных отраслей промышленности. Высокий уровень состояния и развития ЭЭО и ЭИЛ объясняется прежде всего тем, что Москва была столицей СССР, где располагалась значительная часть академических и ведомственных НИИ (в том числе военно-промышленного комплекса), Ведущие ВУЗы, опытно-конструкторские бюро основных министерств технического профиля, а также ряд крупных гражданских и оборонных предприятий.

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 Союзе 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 позволяла выйти на новый технологический уровень производства и была экономически эффективна.

Что касается процесса ЭИЛ, то наиболее широкие и детальные НИР проводились в ЦНИЛ-Электроме в отделе Н.И. Лазаренко при творческом участии Б.Р.Лазаренко как директора лаборатории и соавтора метода. Н.И. Лазаренко предложила физическую модель процесса, осуществила цикл исследований, связанных с массопереносом материала анода на катод и с механизмом образования покрытий, а также с влиянием на эти процессы энергетических параметров разряда, межэлектродной среды, особенностей работы электродной механической системы и т.д.

На базе этих исследований разработаны основные технологии формирования различных видов покрытий, обеспечивающих повышение износо-, жаро- и коррозионно-стойкости значительной номенклатуры деталей и инструмента, применяемых в машино- и приборостроении [55–57]. Был отмечен и продемонстрирован большой спектр возможностей ЭИЛ, например его использование в да-

лекой от техники области – прикладном декоративном искусстве [27–30] и хотя Борис Романович не являлся соавтором основных публикаций Натальи Иоасафовны по ЭИЛ, но его тесное участие и поддержка оставались на высоком уровне, как и на начальном пути их творческой деятельности (в 1943 г.)

Публикации Б.Р. и Н.И. Лазаренко в сороковые и в начале пятидесятых годов в области ЭИЛ вызвали большой интерес у специалистов, занимающихся упрочняющими технологиями, восстановлением и ремонтом деталей машин, механизмов и инструмента. Несмотря на некоторые недостатки ЭИЛ, широкие технологические возможности процесса, простота и надежность оборудования, относительно невысокая стоимость и малогабаритность – все это способствовало очень быстрому внедрению ЭИЛ в практику. Стимулом к использованию процесса в промышленности также служил и дефицит запчастей к машинам и механизмам и небольшой ресурс работы деталей (особенно тяжелонагруженных), что было характерно для промышленного производства СССР.

Уже в начале 50-х годов многие московские научно-производственные организации, ОКБ ряда ведомств и отдельные предприятия начали заниматься разработкой технологий и специализированного оборудования для освоения ЭИЛ в своих отраслях производства.

Процесс ЭИЛ интенсивно использовался в Центральном научно-исследовательском институте тяжелого машиностроения (ЦНИИТМАШ, Г.П. Иванов) [117]. Применение более мощных установок, чем созданные в ЦНИЛ-Электром, позволили 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 провел А.В. Поляченко [118] по упрочнению и восстановлению деталей и инструмента методом ЭИЛ применительно к предприятиям сельхозтехники. Несколько позже в системе Министерства сельского хозяйства большой объем работ по технологии и модернизации оборудования для ЭИЛ осуществила организация «Ремдеталь» под руководством д.т.н. 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 в Московский 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 другие) 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°C при использовании в качестве анодов ряда тугоплавких металлов их карбидов и некоторых боридов, а также алюминия [119]. Созданы технологии процесса ЭИЛ длительно-ресурсных 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 организуется в Научно-исследовательском институте авиационной технологии (НИИАТ), где 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»). На основе изучаемых процессов ЭИЛ деталей из конструкционных материалов, используемых в авиационных агрегатах и космических изделиях, 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 являются причиной разрушения сформированного поверхностного слоя де-

тали.

Экспериментально была получена температурная зависимость разрушения электродного материала (хрома) в зоне действия искрового разряда и установлено, что в интервале температур хрупко-вязкого перехода степень его разрушения скачкообразно уменьшается. Разрушение при действии искрового разряда сопровождается акустической эмиссией. Обнаружена корреляция между площадью поверхности раскрывшихся трещин и параметрами акустической эмиссии. Подогрев поверхности, подвергаемой ЭИЛ, до температуры хладноломкости материала электрода-анода, а также обработка в инертной среде уменьшают количество дефектов в сформированном поверхностном слое.

При ЭИЛ сталей, как правило, сформированный слой представляет собой метастабильную систему из материалов подложки и легирующего электрода с большими колебаниями по составу и содержит дисперсные выделения карбидов, нитридов, оксидов. Объективным критерием качества процесса прецизионного ЭИЛ может являться концентрация легирующего элемента в поверхности. Количественная оценка переноса и концентрации легирующего элемента при неразрушающем контроле нанесенных слоев может осуществляться рентгенофлуоресцентным анализом, основанным на возбуждении и регистрации характеристического излучения анализируемого элемента.

С помощью анализа физических особенностей процесса ЭИЛ были разработаны конструкции плавающих, самоустанавливающихся электродов-инструментов, обеспечивающие интенсификацию электроэрозионных процессов в условиях автоматической регулировки межэлектродного промежутка. В результате анализа влияния геометрических и кинематических параметров (скорость и шаг обработки, размер и форма электродов) на производительность и качество процесса созданы технологические схемы, позволившие осуществить устойчивый режим обработки деталей различного типа. 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 в области физических и технологических исследований, разработки новых вариантов процесса, электродных материалов и оборудования для ЭИЛ, о чем свидетельствуют совместные публикации и изобретения.

Широкий спектр проблем в области ЭИЛ, которые сообща решали эти организации, их совместные исследования и разработки привели фактически к образованию неофициального Всесоюзного центра по научным, технологическим и внедренческим направлениям в области ЭИЛ, обеспечившего решение целого ряда научно-технических задач в различных отраслях машино- и приборостроения.

Однако допущенное отставание в исследовании и практическом использовании метода ЭИЛ (по сравнению с передовыми мировыми державами) требует усиленной работы в этом направлении.

Фундаментальные и прикладные исследования по ЭЭО проводились в научных центрах Днепропетровска, Харькова, Днепродзержинска, Ленинграда, Новосибирска, Нижнего Новгорода и других городов Союза. В конце века страна осталась без научного центра, занимающегося проблемами и перспективным развитием метода ЭЭО и его практическим использованием. Наметилось значительное отставание СССР в использовании электроискровых технологий. В работе [1] отражены причины, которые привели к отставанию России от ведущих мировых держав в области ЭЭО (в том числе в компьютеризации технологических процессов). Указывается, что главная причина отставания от зарубежных фирм – “отрицательное и пренебрежительное отношение чиновников всех рангов к становлению в стране отечественной отрасли перспективного направления”.

Авторы выражают благодарность Л.А. Коневцову (ИМ ХабНЦ ДВО РАН), а также сотрудникам НИИАТ и ВИАМ, кандидатам технических наук В.А. Снежкову, В.И. Ливурдову и Ф.В. Белякову за предоставленные материалы и участие в обсуждении проблем ЭИЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов: почему СССР потерял лидерство в электроискровых технологиях. *Металлообработка*. 2007, (4), 52–56.
2. Голованов Л.В. Соперники резца. М.: *Машиностроение*. 1973. 144 с.
3. Зворыкин А.А., Осьмова Н.И., Чернышев В.И., Шухардин С.В. *История техники*. М.: Изд-во социально-экономической литературы. 1962. 772 с.

4. Верхотуров А.Д., Шпилёв А.М. *Начала материаловедения*. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ. 2007. 438 с.
5. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Способ обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов*. А.с. 70010 СССР/Б.И. 1971, (7), с.205.
6. Самсонов В.Г., Винницкий И.М. *Тугоплавкие соединения*. М.: Металлургия. 1976. 560 с.
7. Францевич И.Н., Гнесин Г.Г., Курдюмов А.В. *Сверхтвёрдые материалы*. Киев: Наук. Думка. 1980. 296 с.
8. Анисимов С.И., Имас Я.Л., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. *Действие излучения большой мощности на металлы*. М.: Наука. 1970. 272 с.
9. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. *Лазерная и электроннолучевая обработка*. Справочник. М.: Машиностроение. 1985. 496 с.
10. Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии: *Сб. науч. Трудов. ред. А.А. Углова*. М.: Наука. 1989. 268 с.
11. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. *Эрозия тугоплавких материалов при воздействии концентрированных потоков энергии*. Препринт, Владивосток: Изд-во ДВО РАН. 1987. 64 с.
12. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электрическая эрозия металлов*. (1), М.: Госэнергоиздат, 1944. 60 с.
13. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Физика искрового способа обработки металлов*. М.: РИОЦБТИ, 1946. 76 с.
14. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Изыскание новых применений электричества. *Электронная обработка материалов*. 1977, (5), 5–19.
15. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровой способ обработки металлов. Станки и инструмент*. 1946, (12).
16. Лазаренко Б.Р. Электрический способ обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов. *Электронная обработка материалов*. 1967, (5), 3–19.
17. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электрическая эрозия металлов*. М.: Госэнергоиздат. 1946, (2), 32 с.
18. Беленький Б.А. *И повторить себя в учениках*. Кишинёв: «Штиинца». 1988, 254 с.
19. Золотых Б.Н. Об открытии и развитии электроэрозионной обработки материалов. К 60-летию открытия способа. *Электронная обработка материалов*. 2003, (3), 4–8.
20. Левинсон Е.М. Развитие технологии электроискровой обработки в массовом производстве. *Электроискровая обработка металлов*. М.: Изд-во АН СССР. 1960, (2), 233–247 (Труды ЦНИЛ-Электром АН СССР).
21. Ставицкий Б.И. Некоторые виды оборудования для прецизионной электроискровой обработки металлов. *Электронная обработка материалов*. 1966, (1), 11–22.
22. Ставицкий Б.И. Современный уровень и перспективы развития электроискровой прецизионной обработки материалов. *Электронная обработка материалов*. 1967, (5), 20–35.
23. Ставицкий Б.И. Электроискровая обработка материалов. Способ Лазаренко на рубеже столетий. *Электронная обработка материалов*. 2000, (5), 25–40.
24. *Проблемы электрической обработки материалов*. ред. Б.Р. Лазаренко. М.: Изд-во АН СССР, 1962, 5–90.
25. Сенецкий Ладислав. Воспоминания словацких машиностроителей к 60-летию электроэрозионных технологий. *Электронная обработка материалов*. 2003, (2), 86–94.
26. Ли Цзин Чун, Чен Цзэн Цин, Ху Чун Цзинь, Ю Цзя Шань. Путь искры электроэрозионной обработки материала в Китае будет более ярким! *Электронная обработка материалов*. 2003, (2), 95–96.
27. *Электроискровая обработка металлов*. ред. Б.Р. Лазаренко. М.: Изд-во АН СССР, 1957. (1).257 с.
28. *Электроискровая обработка металлов*. ред. Б.Р. Лазаренко. М.: Изд-во АН СССР. 1960. (2). 364с.
29. *Проблемы электрической обработки материалов*. ред. Б.Р. Лазаренко. М.: Изд-во АН СССР. 1960. 248 с.
30. *Физические основы электроискровой обработки материалов*. ред. Б.А. Красюк. М.: Наука. 1966. 60 с.
31. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Библиограф. указатель литературы за 1943–1973 г.г. ред. Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Кишинёв: “Штиинца”. 1974. 88 с.
32. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Библиограф. указатель литературы за 1974–1979 г.г. ред. Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Кишинёв: “Штиница”. 1981. 62 с.
33. Самсонов Г.В., Муха И.М., Крушинский А.Н. О выборе материала электродов для электроискровой обработки. *Электронная обработка материалов*. 1966, (1), 28–32.

34. Самсонов Г.В., Муха И.М. Закономерности, определяющие износ катода при искровой обработке металлов. *Электронная обработка материалов*. 1967, (1), 17–24.
35. Самсонов Г.В., Муха И.М. Анализ данных по износу материала обрабатываемых электродов. *Электронная обработка материалов*. 1967, (3), 3–13.
36. Артамонов А.Я., Бовкун Г.А., Казаченко М.В., Лемешко А.М. Повышение износостойкости легких сплавов. *Порошковая металлургия*. 1968, (8), 91–94.
37. Бовкун Г.А. *Исследование сопротивления абразивному изнашиванию тугоплавких соединений*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1969. 26 с.
38. Лемешко А.М. *Исследование эрозии электродов при электроискровой обработке тугоплавких металлов и их соединений с углеродом, бором и азотом*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1971. 24 с.
39. Верхотуров А.Д. *Исследование закономерностей процесса электроискрового легирования поверхностей тугоплавкими металлами и соединениями*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев. Институт проблем материаловедения. 1971. 34 с.
40. Сафронов И.И., Струк Л.И., Морозов В.А. Исследование влияния некоторых тугоплавких соединений переходных металлов на ударную вязкость образцов, легированных электроискровым способом. *Электронная обработка материалов*. 1966, (4), 80–83.
41. Сафронов И. И., Середа Н.Н., Морозов В.А. Влияние электроискровых легирующих параметров на твердость и сопротивление износу металлических поверхностей. *Порошковая металлургия*. 1967, (5), 371–375.
42. Верхотуров А.Д., Зайцев Е.А. Закономерности формирования упрочнённого слоя при электроискровом легировании на механизированной установке ЭФИ-66. *Электронная обработка материалов*. 1975, (4), 16–21.
43. Верхотуров А.Д., Сычев В.С., Михайлов В.В. Закономерности эрозии карбидов и боридов при электроискровом легировании и их связь с электронным строением. *Конфигурационная локализация электронов в твёрдом теле*. Киев: Наукова думка. 1975. с. 206–210.
44. Самсонов Г.В., Сычев В.С., Верхотуров А.Д., Михайлов В.В. Закономерности эрозии карбидов и боридов при электроискровом легировании. *Электронная обработка материалов*. 1974, (2), 24–27.
45. Сафронов И.И. *Исследование возможности применения карбидных и боридных соединений титана, ниобия, циркония и хрома в качестве электродов для электроискрового легирования*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1967. 30 с.
46. Гитлевич А.Е. *Исследование особенностей электроэрозии некоторых полупроводников и полуметаллов*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1969. 16 с.
47. Михайлов В.В. *Исследование особенностей электроискрового легирования титана и его сплавов*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1977. 19с.
48. Парканский Н.Я. *Исследование процесса электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов в электрическом поле*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1979. 19с.
49. Мицкевич М.К. Исследование явления электрической эрозии в Белоруссии. К 60-летию электроэрозионного способа обработки. *Электронная обработка материалов*. 2003, (2), 86–50.
50. Мицкевич М.К., Бушик А.И., Бакуто И.А., Шилов В.А., Девойно И.Г. *Электроэрозионная обработка металлов*. Минск: Наука и техника, 1988, 216 с.
51. Верхотуров А.Д., Аблесимов Н.Е., Пячин С.А. Развитие метода электроискрового легирования в институте материаловедения ДВО РАН. *Электронная обработка материалов*. 2000, (6), 41–49.
52. Болога М.К. Исследования и инновации в Институте прикладной физики. Эволюция и достижения. *Электронная обработка материалов*. 2006, (3), 4–91.
53. Трофимов В.И., Мильман Ю.В. О механизме пластической деформации кристаллов с ковалентными связями. *Вопросы физики металлов и металловедение*. Киев: Изд-во АН УССР, 1963, (17), 19–25.
54. Захаров А.Г., Сеченов Д.А., Беспятов В.В., Котов В.Н. Гетерирование дефектов в кремнии при электроискровой обработке. *Электронная обработка материалов*. 1989, (1), 9–11.
55. Лазаренко Н.И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде. Сб. *Электроискровая обработка металлов*. М.: Изд-во АН СССР. 1957. 70–94.
56. Лазаренко Н.И. *Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами*. Сб. *Электроискровая обработка металлов*. М.: Изд-во АН СССР. 1960. (2) 26–66.

57. Лазаренко Н.И. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. М.: Машиностроение. 1976. 47 с.
58. Бакал С.З. *Исследования процесса электроискрового легирования в вакууме*. Автореф. дис. к.т.н. Киев: Институт проблем материаловедения. 1974. 23 с.
59. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р., Бакал С.З. *Способ нанесения металлических покрытий*. Авт. св. № 329807 (не публикуется) заявлено 30.10.1969.
60. Михайлов В.В., Дурадзи В.Н., Гитлевич А.Е., Андреева Л.Н. Воздействие искрового разряда и электромётной плазмы на поверхностный слой металла. *Электронная обработка материалов*. 1981, (5), 26–28.
61. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Факторович А.А. Об эффекте увеличения глубины диффузии через поверхность, подвергнутую электроискровому легированию. *Электронная обработка материалов*. 1991, (4), 28–30.
62. Михайлюк А.И. Житару Р.П. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении. *Электронная обработка материалов*. 2008, (5), 49–56.
63. Верхотуров А.Д. Балов В.П., Гузанов Д.С., Потепова Н.М. Совмещённое поверхностное легирование безвольфрамовых твёрдых сплавов электроискровым и термодиффузионным методом. *Электронная обработка материалов*. 1991, (6), 12–14.
64. Рискин И.В., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Тимонин В.А. Коррозионное и электрохимическое поведение титана с покрытиями, полученными методом электроискрового легирования, в растворах NaCl, насыщенных хлором. *Электронная обработка материалов*. 1978, (6), 25–28.
65. Рискин И.В., Тимонин В.А., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В. Анодное поведение титана с покрытиями, полученными электроискровым легированием в хлоридно-щелочных растворах. *Защита металлов*. 1982, (3), 410–413.
66. Морарь Н.Н., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Рискин И.В. Влияние условий электроискрового легирования титана никелем и отжига на фазовый состав поверхностного слоя. *Электронная обработка материалов*. 1983, (5), 23–26.
67. Рискин И.В., Тимонин В.А., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Кадралиев М.И., Губайдуллин З.Х. *Способ изготовления анода*. Авт. св. № 783365 СССР / Б.И. 1980, № 44.
68. Чернова Г.П., Томашов Н.Д., Федосеева Т.А., Корниенко Л.П., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Решетников С.М., Вдовин С.Ф. Повышение пассивируемости и коррозионной стойкости нержавеющей стали X18N10T методом электроискрового легирования поверхности. *Защита металлов*. 1984, **20**(6), 872–875.
69. Томашов Н.Д., Чернова Г.П., Федосеева Т.А., Решетников С.М., Федосеева Т.А., Вдовин С.Ф., Корниенко Л.П. Повышение пассивируемости и кислотостойкости титана и нержавеющей стали путём электроискрового легирования их поверхности палладием. *Защита металлов*. 1979, **15**(6), 651–655.
70. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. *Пассивность и защита металлов от коррозии*. М.: Наука. 1965. 208 с.
71. Чернова Г.П., Корниенко Л.П., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Плавник Г.М., Хрусталёва Г.Н., Томашов Н.Д. Влияние условий электроискрового легирования поверхности титана палладием на состав образующих фаз и коррозионную стойкость титана. *Защита металлов*. 1978, **24**(1), 53–59.
72. Томашов Н.Д., Устинская Т.Н., Плавник Г.М., Кожевников А.И., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Дурадзи В. Н. Анодное поведение поверхностных слоёв, сформированных при электроискровом легировании титана никелем. *Защита металлов*. 1985, **21**(3), 367–371.
73. Устинская Т.Н., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Абрамчук А.П. Метод определения ресурса работы малорастворимых анодов с электроискровыми титан–никелевыми покрытиями. *Электронная обработка материалов*. 1985, (6), 20–24.
74. Бандуркин В.В., Гитлевич А.Е., Чукаловская Т.В. Электрохимическое и коррозионное поведение карбидных и нитридных покрытий на титане, полученных методом электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*. 1992, (1), 51–54.
75. Вдовин С.В., Махнёв Е.С., Минеева Н.Л., Тарасов В.В., Андреев А.П. Защита от атмосферной коррозии методом электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*. 1988, (6), 15–17.
76. Козырь А. В. *Исследования коррозионностойкости и жаростойкости стали 45, легированной хромоникелевыми сплавами электроискровым методом*. Автореф. дис. к.т.н. Комсомольск–на–Амуре: Амурский гос. технич. ун-т. 2005. 19 с.

77. Глабец Т.В. *Влияние природы легирующих элементов на жаростойкость и коррозионные свойства электроискровых покрытий*. Автореф. дисс. к.т.н. Комсомольск–на-Амуре: Амурский гос. техн. ун-т. 2005. 21 с.
78. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е. Бобанова Ж.И., Сидельникова С.П. *Способ изготовления анода*. Патент № 1705 (13F1) C25B 11/10. Республика Молдова. 1999.
79. Лазаренко Б.Р., Гитлевич А.Е., Фурсов С.П., Парканский Н.Я. *Способ электроискрового нанесения покрытий*. А.С. № 509381 СССР/Б.И. 1976. № 13.
80. Лазаренко Б.Р., Парканский Н.Я., Гитлевич А.Е., Ревуцкий В.М. Особенности взаимодействия частиц порошка с разрядом при электроискровом легировании. *Электронная обработка материалов*. 1979, (1), 29–31.
81. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М., Речанник И.С., Покровский А.М., Говберг М.Г. Оборудование для электроискрового легирования металлических поверхностей порошковыми материалами. *Электронная обработка материалов*. 1983, (6), 78–81.
82. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М., Михайлов В.В. *Способ электроискрового нанесения покрытий*. А.С. 837716. СССР /Б.И. 1981, № 22.
83. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я. *Способ нанесения интерметаллидных покрытий*. А.С. 932717 СССР /Б.И.-не публикуется, заявлено 11.07.1980.
84. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я. *Способ формирования покрытий*. А.С. 1121853 СССР /Б.И.-не публикуется/ заявлено 10.05.1983.
85. Парканский Н.Я., Киселёв К.А., Гитлевич А.Е. А. С. 178092 СССР (не публикуется) заявлено 27.07.1981.
86. Гитлевич А.Е., Молдавский Л.М., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М., Шкилёв В.Д. *Способ изготовления тепловой трубы*. А.С. 981814 СССР /Б.И. 1982, № 46 с.
87. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я. *Способ электроискровой обработки токопроводящих поверхностей*. А.С. 965699 СССР / Б.И. 1982.38.
88. Ливурдов В.И., Парканский Н.Я., Гитлевич А.Е., Снежков В.А., Ревуцкий В.М. Структура и эксплуатационные свойства деталей с покрытиями, полученными электроискровым легированием порошковыми материалами. *Электронная обработка материалов*. 1980, (5), 33–35.
89. Парканский Н.Я., Мазур В.А., Гитлевич А.Е., Ливурдов В.И., Снежков В.А., Худяков В.М. *Способ электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов*. А.С. 1089872 СССР /не подлежит опубликованию/ заявлено 4.08.1982.
90. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я., Игнатьков Д.А. Об ограничении толщины слоёв, формируемых в процессе электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*. 1981, (3), 25–30.
91. Парканский Н.Я., Кац М.С., Гольдинер М.Г., Гитлевич А.Е. Кинетика разрушения покрытий при электроискровом легировании. *Электронная обработка материалов*. 1982, (3), 20–23.
92. Михайлюк А.И. *Влияние электроискрового легирования металлических поверхностей на их износостойкость*. Автореф. дис. канд. тех. наук. М.: Институт приборостроения. 1990. 16 с.
93. Parkansky N., Voxman R. I., Alterkop B., Zontag I., Lereah Y. and Barky Z.. Single-pulse ark production of carbon nano tubes in ambient air. *I. Phys. D. :Appl. Phys.* 2004, (37), 2715–2719.
94. Гитлевич А.Е. Топала П.А., В.М.Ревуцкий, Шистик Л.Н. Взаимодействие частиц порошка с каналом импульсного разряда в условиях электроискрового нанесения покрытий. *Электронная обработка материалов*. 1988, (6), 20–25.
95. Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Взаимодействие импульсных разрядов с частицами порошковых материалов. *Всесоюз. конф. «Импульсные методы обработки материалов»*. Минск, 1978. с.24.
96. Гитлевич А.Е., Ревуцкий В.М. Особенности явлений на электродах при низковольтном разряде на промежутках больше пробойных. Там же. Минск, 1978, с. 24.
97. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я. Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985, с.196.
98. Ревуцкий В.М., Душенко В.Ф., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В. О распределении элементов в поверхностных слоях при электроискровом легировании. *Электронная обработка материалов*. 1980, (5), 41–43.
99. Ревуцкий В.М., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Мазанко А.Ф., Фальченко В.М., Душенко В.Ф. Исследование распределения элементов в электроискровых поверхностях с помощью радиоактивных изотопов. *Электронная обработка материалов*. 1981, (6), 29–35.
100. Душенко В.Ф., Гитлевич А.Е., Ревуцкий В.М., Михайлов В.В. О возможном механизме диффузии при электроискровом легировании и других видах импульсного воздействия на металлы. *Электронная обработка материалов*. 1980, (3), 36–39.

101. И.А.Бакуто, И.Г.Некрашевич, М.К.Мицкевич. *Способ электроискрового нанесения покрытий*. А.С. 474418 СССР/Б.И. 1975, №23.
102. Гитлевич А.Е., Золотов А.А., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Потехин К.Ф., Ревуцкий В.М., Чжен Н.А. *Способ нанесения покрытий электрическими разрядами*. А.С. 10866231 – не подлежит публикации. Заявлено 25.03.1983.
103. Чжен Н.А., Золотов А.А., Потехин К.Ф., Максимов Н.Г. Исследование влияния некоторых факторов на интенсификацию механизированного электроискрового легирования металлических поверхностей. *Электронная обработка материалов*. 1982, (4), 26–28.
104. Гитлевич А.Е., Ревуцкий В.М., Коваль Н.П., Хайт М.Л., Корниенко А.И. Возможности повышения производительности процесса электроискрового легирования. *Электронная обработка материалов*. 1984, (5), 28–31.
105. Гитлевич А.Е., Коваль Н.П. *Способ электроискрового легирования*. А.С. 1042265 СССР/Б.И., 1983, №7.
106. Ткаченко В.Н. *Исследование процесса получения покрытий из порошковых материалов с помощью искрового разряда*. Автореф. дис. канд.техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения, 1977, 24 с.
107. Гасин Д.А., Урюков Б.А. Движение и нагрев частиц в коаксиальном ускорителе. *Известия Сибирского отд. АН СССР, сер.техн.наук*, 1985, (16), 92–99.
108. Лукина Г.Н. *Технология нанесения аморфизированных покрытий импульсно-плазменным методом*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Львов: Физико-механический институт им. Г.В.Карпенко. 1991, 18 с.
109. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Плазмоиды – мощный технологический фактор. *Электронная обработка материалов*. 1972, (5), 3–8.
110. Абрамчук А.П. *Разработка и оптимизация процесса поверхностного упрочнения алюминия и его сплавов методом электроискрового легирования компактными и порошковыми материалами*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения. 1988, 19 с.
111. Перетятку П.В. *Интенсификация процесса электроискрового легирования при воздействии внешних источников энергии*. Автореф. дис. докт. тех. наук. Кишинев: Институт прикладной физики. 2008, 21 с.
- 112.Топала П.А. *Бесконтактное электроискровое легирование металлических поверхностей при использовании порошковых материалов*. Автореф. дис. канд. тех. наук. Кишинев, Институт прикладной физики. 1988. 20 с.
- 113.Парамонов А.М. *Технология и оборудование для высокочастотного вибрационного электроискрового упрочнения деталей и инструмента*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Киевский политехнический институт. 1986. 16 с.
114. Дехтярь Л.И., Игнатков Д.А., Андрейчук В.К. *Выносливость валов с покрытиями*. Кишинев: Штиинца, 1983, 174 с.
115. Игнатков Д.А., Коваль Н.П., Ханин А.Я., Иванов В.И. и др. Повышение выносливости поворотных кулаков автомобилей, восстановленных электроискровым способом. *Электронная обработка материалов*. 1980, (5), 75–78.
116. Игнатков Д.А., Парканский Н.Я., Дехтярь Л.И. Характеристики упругости, остаточные напряжения и усталостная прочность при электроискровом легировании порошковыми материалами. *Повышение прочности деталей сельскохозяйственной техники*. Кишинев: изд. КСХИ, 1978, с. 27–74.
117. Иванов Г.П. *Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин*. Изд. 2-е, Машгиз, 1961, 300 с.
118. Поляченко А.В. *Исследование электроискрового упрочнения как опыт повышения износостойкости деталей тракторов при ремонте*. Дис. канд.техн.наук, Москва, ВИМ, 1953. 23 с.
119. Чатынян Л.А., Лазаренко Н.И. Повышение износостойкости поверхностей трения, работающих при высоких температурах, электроискровым легированием. *Электронная обработка материалов*. 1966, (2), 33–38.

Поступила 19.07.10