

УДК 621.9.048.4

А.Д.ВЕРХОТУРОВ, П.С.ГОРДИЕНКО, Л.А.КОНЕВЦОВ, Е.С.ПАНИН

Некоторые комментарии к обобщениям механизма электроискрового воздействия на материалы (К 100-летию Б.Р.Лазаренко)

В свете последних достижений материаловедения, физики и химии дополнены некоторые обобщения Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко, предложивших принципиально новый метод обработки материалов.

Ключевые слова: обобщения, эрозия, электроискровое легирование, формирование легированного слоя, свойства легированного слоя.

Some comments to generalization of the mechanism of electrospark impact on materials (on the occasion of the 100 anniversary of B.R.Lazarenko). A.D.VERKHOTUROV (Institute of Water and Environmental Problems FEB RAS, Khabarovsk), L.A.KONEVTSOV (Institute of Materials, FEB RAS, Khabarovsk), P.S.GORDIENKO, E.S.PANIN (Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok).

Some generalizations of B.R. and N.I. Lazarenko, who offered a fundamentally new method of material processing which was very important in development of modern technologies, have been supplemented in the light of recent achievements of physics, chemistry, and technologies.

Key words: generalizations, erosion, electrospark alloying, formation of alloyed layer, properties of alloyed layer.

Научно мыслить значить обобщать.
Аристотель*

Поучительной особенностью научного творчества этих замечательных исследователей была периодическая, по мере накопления, систематизация экспериментальных и теоретических данных. Следует отметить, что этому способствовала увлеченность Б.Р.Лазаренко методами научной работы М.Фарадея. «Потрепанный, пожелтевший от времени томик... был в полном смысле его настольной книгой. Он часто цитировал великого ученого и находил параллель в современных изысканиях с мыслями Фарадея...» [2, с. 181]. В одной из первых опубликованных работ молодых тогда исследователей – супругов Лазаренко увидели свет несколько обобщений; спустя три десятилетия их было уже 37 [15, 19]. Опубликованные незадолго до смерти Бориса Романовича обобщения касались не только электроэрозионной обработки (ЭЭО), но и важнейших вопросов, имеющих отношение к прохождению электрического тока через электролит, воздействию на живые организмы. Можно с уверенностью сказать, что это итог большой теоретической

ВЕРХОТУРОВ Анатолий Демьянович – доктор технических наук, главный научный сотрудник (Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск), ГОРДИЕНКО Павел Сергеевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией, ПАНИН Евгений Савельевич – кандидат химических наук (Институт химии ДВО РАН, Владивосток), КОНЕВЦОВ Леонид Алексеевич – научный сотрудник (Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Хабаровск). E-mail: Pavel.gordienko@mail.ru

* Лосев А.Ф., Тахо-Годи А.А. Платон. Аристотель. М.: Мол. гвардия, 1993.



Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко – выдающиеся ученые, авторы метода электроэрозионной обработки, лауреаты Сталинской премии

и экспериментальной работы Б.Р. и Н.И. Лазаренко, которая может служить примером для многих ученых, особенно молодых.

До сих пор обобщения в литературе не обсуждались (за исключением работы [6]), хотя, несомненно, представляют значительный научный и практический интерес. Основной задачей настоящей работы явились обсуждение и анализ некоторых обобщений Б.Р. и Н.И. Лазаренко, относящихся к методу электроискрового легирования (ЭИЛ) [15].

Обобщения, относящиеся к ЭЭО (1–31), можно условно подразделить на две основные группы: 1–9, рассматривающие общие вопросы эрозии материалов электродов при электрических разрядах (искровых и дуговых), и 10–31, описывающие частные закономерности эрозии материалов электродов, характерные только для искровых электрических разрядов. (К сожалению, в них не нашли отражения вопросы формирования поверхностных слоев электродов в процессе ЭИЛ.)

Б.Р. и Н.И. Лазаренко прежде всего обращали внимание на понятие электрической эрозии (обобщения 1, 3, 10), которая, по их мнению, является основой метода ЭЭО [15, 16, 20] (рис. 1). Так считают многие исследователи [1, 11, 28], но, на наш взгляд, это положение не в полной мере отражает суть данного метода. Например, для ЭИЛ важны также исследования физико-химических процессов формирования легированного слоя (ЛС) при искровых разрядах (рис. 2).

Таким образом, в результате действия искрового разряда происходят не только эрозия материала электродов, но и изменения структуры, химического и фазового состава приповерхностного слоя. Даже при электроэрозионной размерной обработке (ЭЭРО) используется эффект изменения в заданном направлении физико-химических и эксплуатационных поверхностей после обработки [9, 27].

В связи с этим обобщения 1, 20, 22 можно уточнить и дополнить.

Дополнение 1. «Электроэрозионная обработка токопроводящих материалов основана на использовании процессов эрозии материалов при прохождении электрического тока, а также изменении структуры, состава и свойств приповерхностных слоев электродов после воздействия на них электрических разрядов».

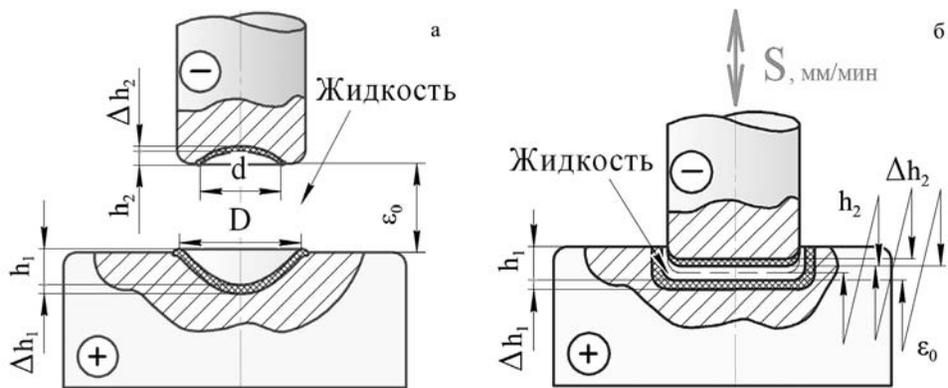


Рис. 1. Общая схема процесса ЭЭО: единственный разряд (а) и многократное воздействие искровых разрядов (б); ε_0 – межэлектродный промежуток; h , Δh , d , D – геометрические параметры эрозии (анода и катода, индексы 1 и 2, соответственно); S – движение подачи электрода

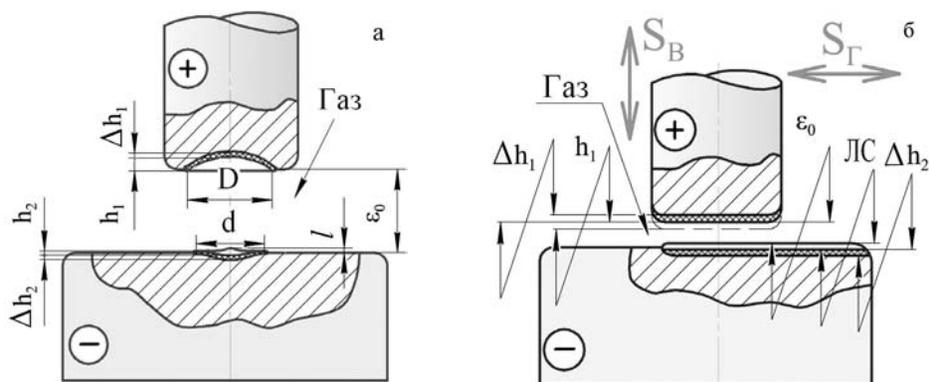


Рис. 2. Общая схема процесса ЭИЛ в газовой среде: единственный разряд (а) и многократное воздействие искровых разрядов (б); ε_0 – межэлектродный промежуток; h , Δh , d , D – геометрические параметры эрозии анода и катода (1, 2, соответственно); S – движение подачи; ЛС – легированный слой

Для анализа процесса ЭИЛ особый интерес представляют следующие положения: «Материал электрода, выброшенный действием электрического разряда, в большинстве случаев отлагается на поверхности другого электрода» (обобщение 2). При этом «искровая форма электрического разряда в подавляющем большинстве случаев сопровождается преобладающей убылью анода» (обобщение 7). Таким образом, можно сделать вывод: при ЭИЛ наблюдаются преимущественно эрозия материала анода и перенос продуктов эрозии на катод, что выражается в повышении массы катода (рис. 3).

Следует признать, что обобщения 2, 7 в большинстве случаев подтверждаются экспериментальными данными при ЭИЛ железа и сталей [11, 27, 28], хотя некоторые авторы отмечают важнейшую особенность метода ЭИЛ: уменьшение массы катода при длительной обработке [14, 17, 18, 21].

Однако ряд экспериментальных данных позволяет дополнить указанные обобщения:

1. Экспериментальные данные Н.И.Лазаренко показывают, что при воздействии искровых импульсов на электроды (анод–катод) С–Ме, Si–Fe, Al–Fe уменьшается масса катода [14, 18]. Можно предположить, что в этом случае происходит уменьшение массы как анода, так и катода, что характерно для ЭЭРО [14, 18]. Следует отметить, что уменьшение массы катодов из переходных металлов (Ti, Zr, V, Nb, Mo, W, Fe) при ЭИЛ графитом отмечалось также в работе [23].

2. При воздействии искровых разрядов на рабочую поверхность катода, равную поверхности анода ($S_k = S_a$), при ЭИЛ без поперечной подачи электродов ($u_n = 0$) легирование «заторможенным» электродом [1] (обработка поверхности катода из стали У8 анодом из твердого сплава Т15К6) приводит к образованию лунки, размеры которой непрерывно растут при увеличении числа импульсов [17]. В указанной работе сообщается, что если электрические импульсы многократно действуют на одну точку поверхности электродов, то «на катоде образуется не слой перенесенного металла, как это следовало ожидать, а сильно увеличенная в размерах лунка» [17, с. 50]. Однако в работе [1] утверждается, что при ЭИЛ легкоплавкими металлами происходит непрерывное увеличение толщины ЛС, хотя масса катода также уменьшается за счет разрушения периферии лунки.

3. В ряде случаев воздействие на поверхность электродов единичных искровых импульсов приводит к образованию лунок на аноде и катоде и, соответственно, уменьшению их масс.

Так, отмечено, что при воздействии единичных разрядов на электроды из монокристаллов ряда металлов (Ag, Al, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn, W) на аноде и катоде образуются лунки с различными очертаниями: на аноде – со следами оплавления и пластическим деформированием оплавленной части, на катоде – резко очерченные, как бы вследствие механического разрушения, поверхности [23]. Показано также, что при действии единичных искровых разрядов с использованием реальных режимов ЭИЛ на катоде из Al, Cu образуется пять характерных типов лунок, что свидетельствует об интенсивной эрозии материала электродов [10]. Интерес представляют также экспериментальные данные, полученные в процессе ЭИЛ электродами из легкоплавких металлов, твердых сплавов при обработке в режиме единичных импульсов и режиме непрерывной подачи [12]. Обработка осуществлялась с одинаковым числом импульсов ($n = 1000$), при воздействии в режиме единичных импульсов после каждого из них электрод охлаждался до температуры окружающей среды T_0 . В этом случае $S_k > S_a$, где S_k, S_a – площадь рабочей поверхности катода и анода, соответственно; частота следования импульсов при непрерывной обработке 50 Гц.

Показано, что, несмотря на одинаковое число искровых импульсов, воздействующих на поверхность электродов с одинаковой энергией, характер изменения массы последних различен [12]. Так, при ЭИЛ в режиме единичных импульсов всегда отмечалось уменьшение массы анода и катода ($-M_a / -M_k$), а в случае непрерывной подачи импульсов – уменьшение массы анода и повышение – катода ($-M_a / +M_k$). В первом случае на поверхности электродов наблюдались отдельно расположенные лунки, во втором – слой различной толщины (в зависимости от материала электродов и режимов обработки) с измененными структурой и составом.

4. Отмечены некоторые особенности поведения тугоплавких металлов и сплавов при ЭИЛ обработке металлов и сплавов при определенных режимах и условиях (например, в вакууме, аргоне) [4, 7].

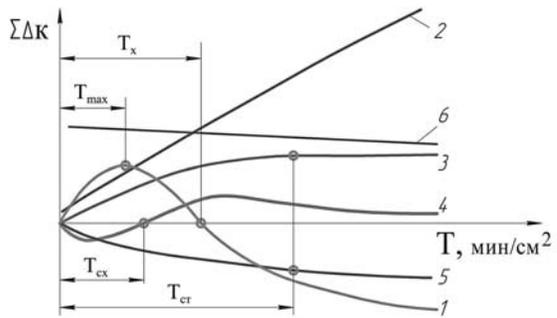


Рис. 3. Типы кинетических зависимостей электропереноса материала с анода на катод: 1 – кривая электропереноса, по Б.Р.Лазаренко; 2 – кривая непрерывного повышения массы катода; 3 – стабилизационная кривая (стабилизация процесса после времени $T_{ст}$); 4 – кривая со схватыванием электродов до $T = T_{сх}$; 5 – отрицательный прирост $\Sigma\Delta k$ во всем диапазоне времени; 6 – уменьшение $\Sigma\Delta k$ с положительными значениями. T – удельное время легирования, T_x – время хрупкого разрушения, T_{max} – наибольшего увеличения массы катода, $T_{сх}$ – «схватывания» электродов (залипания), $T_{ст}$ – начала стабилизации процесса

5. Указанные особенности проявляются также при длительном ЭИЛ ($t > t_x$, где t_x – порог хрупкого разрушения ЛС [24]), когда в большинстве случаев наблюдается уменьшение массы анода и катода [5, 7, 18, 24].

Такое несоответствие приведенных экспериментальных данных обобщениям 2, 7 связано с тем, что в газовой среде происходят чрезвычайно сложные процессы при воздействии искрового разряда на электроды, особенно при их контакте:

1) образование «вторичных структур» (ВС) в приповерхностных слоях электродов (рис. 4) за счет взаимодействия с межэлектродной средой, импульсных термомеханических нагрузок от искрового разряда и переноса материала с противоположного электрода [8, 13];

2) излучение «вторичного» тепла, приводящего к изменению процесса эрозии и условий формирования ЛС [3], что отмечалось в сходных технологических процессах [22];

3) «схватывание» электродов при «контактном» ЭИЛ, приводящее к снижению эрозии материала, а в некоторых случаях – превалирующему переносу материала катода на анод ($+M_a / -M_k$);

4) хрупкое разрушение приповерхностных слоев электродов (особенно из тугоплавких соединений), которое может стать превалирующим [27].

Механизмы воздействия потоков энергии при различных видах электрофизических методов обработки являются частным случаем механизмов при ЭИЛ. Можно отметить влияние следующих факторов при длительном ЭИЛ ($t > t_n$):

$$t_n = S_{a,k} / S_{a,k}^d f,$$

где $S_{a,k}$ – площадь поверхности анода и катода, соответственно; $S_{a,k}^d$ – площадь лунки на поверхности анода и катода, соответственно; f – частота следования импульсов; t_n – время действия на поверхность электрода единичного импульса, который не перекрывается вторичным.

Кроме того, исследования коэффициента переноса ($K_n = |\Delta_k| / |\Delta_a|$) металлов и соединений, изменения массы электродов в процессе ЭИЛ [24], а также макро- и микроструктуры поверхности электродов после единичных электрических разрядов [1, 26] показывают, что только часть эродированного материала отлагается на поверхностях обоих электродов с образованием ВС. При этом выбрасываемый из лунки материал частью отлагается на поверхности катода преимущественно в жидкой и паровой фазах, частью переносится на противоположный электрод, а также удаляется за пределы их поверхностей.

Таким образом, можно дополнить обобщение 2.

Дополнение 2. При воздействии электрических импульсов на электрод происходит эрозия последнего, часть эродированного материала переносится на противоположный

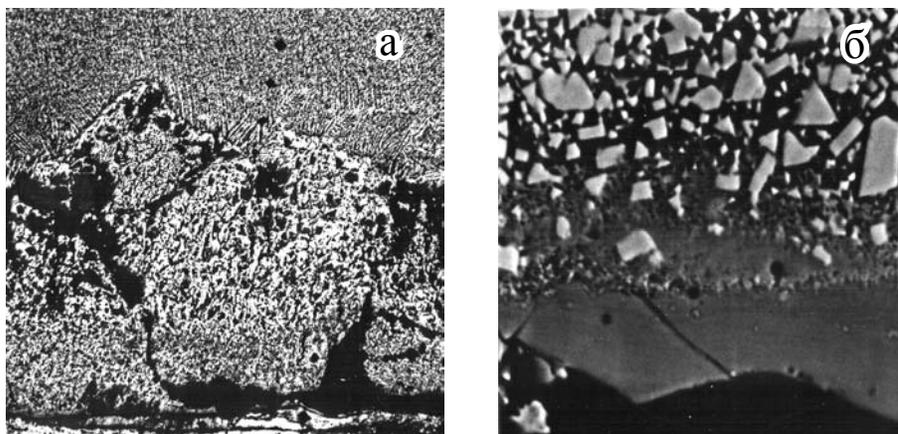


Рис. 4. Образование ВС при ЭИЛ стали 45 на аноде: а – Zr, x 450; б – BK20, x 300

электрод, на поверхности которого образуется слой с измененным составом и структурой (измененный поверхностный слой – ИПС) (рис. 4). Это обобщение справедливо не только для ЭИЛ, но и для ЭЭРО, что подтверждается экспериментами [11]. Однако для ЭИЛ характерна особенность: при этом методе обработки металла возможно увеличение массы одного из электродов. Отсюда следует новое дополнение.

Дополнение 3. В зависимости от физико-химической природы материала электродов, режимов и условий обработки за определенное время легирования ($t > t_u$, где t_u – время протекания одного импульса) возможны три основных случая изменения массы электродов:

- а) уменьшение массы катода и анода ($-M_k / -M_a$);
- б) увеличение массы катода и уменьшение – анода ($+M_k / -M_a$);
- в) уменьшение массы катода и увеличение – анода ($-M_k / +M_a$).

Обобщения 2, 3 позволяют заключить, что для повышения эффективности процесса ЭИЛ важно прежде всего учитывать наличие преобладающей эрозии в жидкой фазе одного из электродов (обычно анода), перенос эродированного материала на поверхность противоположного электрода и формирование измененного поверхностного слоя с заданными свойствами при $K_n \rightarrow 1$. На основании этих выводов, а также последних экспериментальных и теоретических данных [7, 21, 24] можно сформулировать дополнение, отражающее критерий эффективности формирования ЛС.

Дополнение 4. Характер формирования макро- и микроструктур поверхности электродов, изменение массы последних в значительной мере зависят от количества электрических импульсов, приходящихся на единицу рабочей площади электродов (удельное время легирования, t_u).

При этом возможны три характерных случая:

а) воздействие на заданную поверхность электродов единичных импульсов, когда действие определенного электрического импульса не накладывается на действие предыдущих импульсов при $t < t_n$, при этом

$$T_{a,k}^o = T_o; \Phi_{a,k} = \Phi_{a,k}^p,$$

где $T_{a,k}^o$ – температура анода и катода; $\Phi_{a,k}$ – значения физико-химических свойств материала основы анода и катода; $\Phi_{a,k}^p$ – значения физико-химических свойств материала рабочих поверхностей анода и катода; T_o – температура окружающей среды у поверхности электродов;

б) однократное воздействие электрических разрядов по всей поверхности электродов при $t = t_n$ и $S_{a,k} \gg S_d$; где $S_{a,k}$ – площадь воздействия единичными импульсами на аноде и катоде, соответственно; S_d – площадь единичной лунки; $T_{a,k}^o \neq T_o$; $\Phi_{a,k}^o \neq \Phi_{a,k}^p$; $t = t_n$;

в) многократное воздействие электрических разрядов по всей поверхности электродов, при этом $t > t_n$; $T_{a,k} \neq T$; $\Phi_{a,k} \neq \Phi_{a,k}^p$.

В случае «б» образуется минимальный по толщине слой вторичной структуры одновременно на аноде и катоде при $S_a = S_k$; при $S_a < S_k$ слой вторичной структуры образуется прежде всего на аноде, при $S_a > S_k$ – на катоде.

В случае «в» завершается образование вторичной структуры, и в дальнейшем ЭИЛ осуществляется с помощью качественно новых материалов новыми по структуре и составу материалами. Эволюция структуры и состава вторичной структуры при ЭИЛ определяет реальные процессы эрозии, формирования ЛС и его свойств. Таким образом, на основе анализа обобщений Б.Р. и Н.И. Лазаренко, а также последних данных можно сделать несколько дополнений.

Дополнение 5. При многоимпульсной обработке $t > t_n$ температура электродов повышается («вторичное тепло»), что приводит к изменению условий эрозии материалов и формированию ИПС.

Дополнение 6. При многоимпульсной обработке в приповерхностных слоях электродов образуются вторичные структуры вследствие импульсного воздействия на эти слои

высоких температур и давлений, переноса материала с противоположного электрода, взаимодействия материала электродов с межэлектродной средой, что приводит к изменению условий процесса эрозии, формирования ЛС и его свойств.

Дополнение 7. В процессе ЭИЛ, как правило, периодически образуются и разрушаются вторичные структуры, что приводит к неаддитивности эрозии при формировании ЛС.

Дополнение 8. Незакрепленные продукты эрозии в приповерхностных слоях электродов, размеры которых зависят от материала электродов и режимов обработки (вплоть до наночастиц), после утилизации могут быть использованы для создания новых материалов.

Дополнение 9. Эффективность формирования ЛС зависит от количества материала, перенесенного с анода на катод (за принятую единицу времени обработки или до t_x), коэффициента переноса K_n , порога хрупкого разрушения t_x , отнесенных к затраченной энергии:

$$\mathcal{E}_{\text{ЛС}} = K_n \cdot t_x / E.$$

Другая группа обобщений Б.Р. и Н.И. Лазаренко (13–17) относится к кинетике процессов эрозии, влиянию физико-химической природы материала электродов на их эрозию. В соответствии с обобщением (13) весовое количество материала, выбрасываемого из электродов в результате действия искрового электрического импульса, при прочих равных условиях строго пропорционально энергии импульса. «При этом количество материала анода, выбрасываемого искровыми электрическими импульсами в единицу времени, определяется следующим соотношением» (обобщение 17):

$$\gamma = k \cdot E \cdot \nu,$$

где γ – интенсивность эрозии; E – энергия единичного импульса; ν – частота импульсов; k – коэффициент пропорциональности.

Сопоставление обобщений 14, 15 и 17 («При прочих равных условиях искровые электрические импульсы с одинаковой энергией выбрасывают из электродов различные весовые количества материала в зависимости от химического состава материала электродов» [14]) позволяет сделать вывод об аддитивности эрозии и существовании ряда материалов, которые должны располагаться в определенной последовательности по эрозионной стойкости. При этом Н.И.Лазаренко утверждает, что обобщения 14, 15 очень напоминают классические законы М.Фарадея [14]. Однако сами авторы обобщений считали, что правила аддитивности строго соблюдаются только для анода [21]. Можно согласиться с Б.Р. и Н.И. Лазаренко относительно аддитивности эрозии материала анода для процесса ЭЭРО, при котором влияние «вторичного тепла» и ВС не столь существенно, как при ЭИЛ. Исследования кинетики эрозии материала анода при ЭИЛ [24] показали, что аддитивность эрозии его материала не наблюдается, так как в процессе ЭИЛ происходит образование ВС, изменяется температура электродов, что приводит к изменению величины эрозии в разной степени для различных материалов.

Таким образом, аддитивность эрозии материала электродов, а также построение ряда материалов по эрозионной стойкости возможны только при обработке, исключая образование ВС и нагрев электродов. В связи с этим можно сформулировать следующее дополнение.

Дополнение 10. Аддитивность эрозии материала электродов, а также существование определенного ряда материалов по характеру изменения их эрозионной стойкости возможны только при ЭИЛ единичными импульсами, так как в этом случае исключаются образование вторичных структур и влияние вторичного тепла в режиме, обеспечивающем эрозию материала электродов преимущественно в однофазном состоянии.

...В заключение следует отметить, что хотя после открытия, сделанного Б.Р. и Н.И. Лазаренко в области использования концентрированных потоков энергии, появились и другие методы – лазерный, электроннолучевой и т.д., наши замечательные ученые были и остаются в этом первыми. История науки свидетельствует о том, что в начале развития

электроискровых технологий «практически все... мировые лидеры только тем и занимались, что изучали советские достижения и пытались их копировать в своих установках» [25, с. 53]. Опубликовав обобщения, Б.Р. и Н.И. Лазаренко не только подвели итог своей блестящей научной работы, но и показали дальнейшие пути использования энергии электричества во благо человека, в том числе путем воздействия не только на материалы, но и на живые организмы. Их труд – образец настоящей, классической науки, методологического и системного подходов к изучению явлений природы.

В связи с распадом СССР центр по исследованию ЭИЛ переместился из Кишинева на Дальний Восток – в Хабаровск, в созданный в 1991 г. Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН. Работа здесь осуществлялась в следующих направлениях: исследование физической сущности процесса ЭИЛ, физико-химических свойств легированного слоя, создание нового оборудования и электродных материалов. По данной тематике подготовлены и защищены две докторские и более десяти кандидатских диссертаций. Руководил исследованиями д.т.н., профессор А.Д.Верхотуров – один из учеников и последователей Б.Р. и Н.И. Лазаренко.

В настоящее время в ИМ ХНЦ проводятся работы по электроэрозионной обработке металлов и электроэрозионному диспергированию твердых сплавов. В этой области Институт материаловедения тесно сотрудничает с Тихоокеанским, Амурским и Комсомольским-на-Амуре государственными университетами, а также Институтом химии ДВО РАН (лаборатория защитных покрытий и морской коррозии под руководством д.т.н. П.С.Гордиенко, где занимаются исследованием состава, структуры и свойств электроискровых покрытий, развивают физические представления о процессах в электроискровой обработке материалов). Разрабатываемый здесь с 1983 г. метод микродугового оксидирования (МДО) металлов и сплавов в электролитах, по своей сути являющийся разновидностью метода, предложенного Б.Р. и Н.И. Лазаренко, позволяет формировать сложные по составу покрытия с химическими элементами из электролита.

Фундаментальные и прикладные исследования в области ЭЭО, конечно, ведутся не только научными организациями, находящимися на Дальнем Востоке. Интересные и важные для развития отечественных искровых технологий разработки осуществляются также учеными Днепропетровска, Харькова, Днепродзержинска, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Нижнего Новгорода. К сожалению, в настоящее время работы в этом направлении сдерживаются из-за отсутствия финансирования и кадрового обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакуто Н.А., Мицкевич М.К. О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки // *Электронная обработка материалов*. 1977. № 3. С. 17-19.
2. Бельский Б.А. И повторить себя в учениках. Кишинев: Штиинца, 1988. 256 с.
3. Варенко Е.С. «Вторичное» тепло и причины нарушения аддитивности съёмки металла при электрохимическом абразивном шлифовании // *Электронная обработка материалов*. 1987. № 1. С. 39-42.
4. Верхотуров А.Д., Бакал С.З. Влияние низкого давления воздушной межэлектродной среды на формирование упроченного слоя при электроискровом легировании // *Электронная обработка материалов*. 1980. № 3. С. 34-36.
5. Верхотуров А.Д., Исаева Л.Л., Тимофеева И.И., Цыбань В.А. Возможности поверхностной карбидизации тугоплавких металлов при электроискровом легировании // *Порошк. металлургия*. 1981. № 6. С. 42-47.
6. Верхотуров А.Д. Некоторые вопросы теории и практики метода электроискрового легирования металлических поверхностей // *Физика и химия обработки материалов*. 1993. № 3. С. 60-68.
7. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев: Техника, 1982. 181 с.
8. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Куриленко Л.Н. Формирование вторичной структуры на аноде в процессе электроискрового легирования // *Электронная обработка материалов*. 1987. № 1. С. 26-32.
9. Волченкова Р.А. Об эрозионном ряде элементов // *Электронная обработка материалов*. 1976. № 2. С. 45-49.

10. Жура В.И., Юхненко В.В., Назарец В.С. и др. Некоторые особенности механизма электрической эрозии металлов при единичных разрядах в воздушной среде // Электронная обработка материалов. 1977. № 2. С. 18-20.
11. Золотых Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. М.: ГИТТЛ, 1953. 108 с.
12. Игнатенко Э.П., Верхотуров А.Д., Маркман М.З. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании легкоплавкими металлами // Электронная обработка материалов. 1979. № 3. С. 26-29.
13. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Ближайшие перспективы электрической обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1975. № 1. С. 5-9.
14. Лазаренко Н.И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде // Электроискровая обработка металлов. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 70-94.
15. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Изыскание новых применений электричества // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 5-19.
16. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Неиспользованные возможности электрической энергии // Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 5-13.
17. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1965. № 1. С. 49-53.
18. Лазаренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами // Электроискровая обработка металлов. Вып. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 36-66.
19. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика искрового способа обработки металлов. М.: РИО ЦБТИ, 1946. 76 с.
20. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. Вып. 1/2. М.: Госэнергоиздат, 1944. 60 с.
21. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С. 12-16.
22. Мицкевич М.К., Бакуто И.А. Электроискровой способ нанесения локальных толстослойных покрытий // Электронная обработка материалов. 1977. № 4. С. 28-31.
23. Палатник Л.С., Левченко А.А. О характере электрической эрозии на монокристаллах // Кристаллография. 1958. № 5. С. 612-616.
24. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычёв В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наук. думка, 1976. 220 с.
25. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов: почему СССР потерял лидерство в электроискровых технологиях // Металлообработка. 2007. № 4. С. 52-56.
26. Ставицкий Б.И. К вопросам об электрической эрозии токопроводящих материалов при искровых разрядах малой энергии и длительности // Электронная обработка материалов. 1969. № 2. С. 11-14.
27. Фотеев Н.К. Физико-химические основы процессов электроэрозионной обработки рабочих поверхностей технологической оснастки // Электронная обработка материалов. 1980. № 5. С. 9-17.
28. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Ч. 1 / под ред. А.Л.Лившица, А.М.Роша. М.: НИИМАШ, 1980. 224 с.