

**А.Д. Верхотуров, П.С. Гордиенко, В.А. Достовалов
Л.А. Коневцов, Е.С. Панин**

Высокоэнергетическое локальное воздействие на вольфрамсодержащие материалы и металлы

**Владивосток
2012**

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН
Институт материаловедения Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения РАН

Институт химии Дальневосточного отделения РАН
Дальневосточный федеральный университет

А.Д. Верхотуров, П.С. Гордиенко, В.А. Достовалов,
Л.А. Коневцов, Е.С. Панин, Д.В. Достовалов

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ЛОКАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТАЛЛЫ

(к 100-летию со дня рождения Б.Р. Лазаренко)

Владивосток
Издательский дом Дальневосточного
федерального университета
2012

УДК 621.9.048
ББК К553
В93

Рецензент:
Ю.Н. Кульчин, академик РАН

Верхотуров, А.Д.

B93 Высокоэнергетическое локальное воздействие на вольфрамсодержащие материалы и металлы (к 100-летию со дня рождения Б.Р. Лазаренко) : монография / А.Д. Верхотуров, П.С. Гордиенко, В.А. Достовалов, Л.А. Коневцов, Е.С. Панин, Д.В. Достовалов ; Дальневост. феде-рал.ун-т. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – 472 с.

ISBN 978-5-7444-2589-0

В книге рассмотрены некоторые вопросы истории открытия и развития метода электроискрового легирования материалов, систематизированы и обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований эрозии материала электродов, а также процесса формирования изменённого поверхностного слоя на рабочих поверхностях при электроискровом легировании вольфрамсодержащих твёрдых сплавов. Особое внимание обращено на теплофизические, термомеханические аспекты эрозии электродов, влияние физико-химической природы их материала на формирование легированного слоя на твёрдых сплавах, что ранее практически не рассматривались. Предложена электрофизическая модель эрозии электродов при импульсном энергетическом воздействии на материалы с учетом их теплофизических свойств и скорости распространения фононов. Рассмотрены методы локального энергетического воздействия на материалы и электроплазменные устройства для обработки металлов и сплавов.

Работа может представлять интерес для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами поверхностного упрочнения и легирования металлов и сплавов.

УДК 621.9.048
ББК К553

ISBN 978-5-7444-2589-0

© Верхотуров А.Д., Гордиенко П.С.,
Достовалов В.А., Коневцов Л.А.,
Панин Е.С., составление, 2012
© Издательство Дальневосточного
федерального университета, оформление, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Электроискровое легирование (ЭИЛ) находит всё большее применение в промышленности для повышения срока службы быстроизнашающихся деталей машин и особенно штамповой оснастки, режущего инструмента, ответственных пар трения. Достоинством метода ЭИЛ, предложенного в 1943 г. выдающимися русскими учёными Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко, является возможность легирования металлической поверхности любыми токопроводящими материалами (в ряде случаев нанесения покрытия), а также высокая прочность сцепления легированного слоя (ЛС) с материалом основы, низкая энергоёмкость процесса, простота осуществления технологической операции упрочнения.

В настоящее время метод электроискровой обработки, или, как его называют, электроэррозионной обработки (ЭЭО) нашёл применение в трёх областях преобразования и получения материала:

- электроэррозионная размерная обработка (ЭЭРО);
- электроискровое легирование (ЭИЛ);
- электроэррозионное диспергирование (ЭЭД).

Метод ЭЭО позволяет решать следующие технологические задачи:

1) упрочнять приповерхностные слои широко используемых конструкционных материалов на основе железа, титана, алюминия путём нанесения на их поверхность металлов, твёрдых сплавов, сверхтвёрдых материалов;

2) варьировать в заданном направлении химический и фазовый состав поверхности путём легирования (нанесения слоя) металлами, интерметаллидами, соединениями, графитом с целью повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, износстойкости, изменения электросопротивления, эмиссионно-адсорбционных, теплофизических и других свойств;

3) варьировать в заданном направлении микро-, макрокристаллической, атомной, электронной структурой приповерхностных слоёв материалов (получение аморфных слоёв, подготовка поверхности для других методов обработки – плазменного напыления, диффузационного упрочнения и т.д.);

4) восстанавливать геометрические размеры деталей машин и инструмента с одновременным упрочнением поверхности.

Сравнительно небольшая производительность процесса ЭИЛ компактным электродом ($0,2\text{--}20 \text{ см}^2/\text{мин}$) позволяет в настоящее врем-

мя успешно использовать его при обработке небольших поверхностей (или отдельных участков) деталей машин, инструмента в условиях мелкосерийного, переналаживаемого, гибкого производства. Применение технологии ЭИЛ для упрочнения режущего инструмента, штамповой оснастки и деталей машин обеспечивает повышение срока их службы в 2–5 и более раз. В результате успешного использования метода ЭИЛ в производстве, появляется возможность роста производства совокупного общественного продукта, экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов. На практике было установлено, что в зависимости от произвольно выбранных режимов обработки можно либо получить сравнительно небольшое увеличение долговечности упрочняемой детали, режущего, в том числе твёрдосплавного инструмента, либо не получить вообще или даже вызвать её уменьшение. Для максимального повышения долговечности упрочняемых деталей (в 2 раза и более) необходимо тщательное предварительное исследование по выбору оптимальных режимов обработки, материала легирующего электрода. Несмотря на сравнительную простоту выполнения технологической операции легирования, процесс ЭИЛ чрезвычайно наукоёмкий. Его оптимизация требует использования результатов исследований большого круга проблем, находящихся на стыке наук: теории поля, электроники, термодинамики, гидродинамики, химии, материаловедения, физики разряда, действия концентрированных потоков энергии на материалы, физики быстро-протекающих процессов, процессов взаимодействия материалов в условиях высоких давлений и температур, теории фазовых превращений и т.д.

В опубликованных ранее работах по ЭИЛ в основном рассмотрены вопросы инженерного подхода к выбору технологических режимов обработки, материала легирующего электрода. В данной книге внимание акцентируется на проблеме эрозии электродов, формирования ЛС в процессе ЭИЛвольфрамсодержащих твёрдых сплавов (ВТС). В литературе до сих пор не решён вопрос об относительном влиянии материала легирующего электрода и режимов обработки на эффект упрочнения поверхностного слоя (ПС) токопроводящих материалов, в том числе ВТС. Особенно противоречивые сведения в литературе имеются по влиянию удельного времени легирования на изменение массы катода в процессе обработки. Для характеристики процесса ЭИЛ необходимо знать взаимосвязь изменения эрозии материала анода, состава, структуры приповерхностных слоёв электродов и их физико-

химические и эксплуатационные свойства. Анализ процессов, определяющих формирование ЛС, возможен на базе физико-химической модели процесса ЭИЛ. При этом необходимо учитывать современные знания по эрозии материала электродов, массопереносу в процессе легирования, изменению структуры и состава приповерхностных слоёв электродов при воздействии импульсных тепловых и механических нагрузок. Основная цель настоящей работы – на основе современных данных по эрозии электродов при искровом разряде, массопереносу их вещества, формированию «вторичных структур» на поверхности электродов, химическому, фазовому составу ЛС, его физико-химических и эксплуатационных свойств смоделировать физико-химические и плазменно-дуговые процессы, протекающие при ЭЭО на примере ЭИЛ/ВТС и электроплазменной обработке материалов.

В связи с этим в предлагаемой работе рассмотрены проблемы, решение которых необходимо для оптимизации метода поверхностного упрочнения, т.е. определения оптимальных областей его применения, режимов обработки и материала легирующего электрода в зависимости от требований, предъявляемых к поверхности материала при эксплуатации. В данной работе представлены, в основном результаты собственных исследований, выполненных в Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Институте химии ДВО РАН, Дальневосточном гос. техническом университете. Институте проблем материаловедения НАН Украины, а также результаты исследований, в которых непосредственное участие в свое время принимали член-корр. АН УССР Г.В. Самсонов, академик МССР Б.Р. Лазаренко, их соратники и ученики, стоявшие у истоков метода ЭЭО.

Учитывая сложность предмета исследования, авторы с благодарностью примут критические замечания и пожелания.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

БС	белый слой	$d_{\text{л}}$	диаметр лунки
ВС	вторичная структура	$d_{\text{ч}}$	размер частиц
ВТС	вольфрамсодержащий твердый сплав	d_{k}	размер катодного пятна
ДЗ	диффузионная зона	$E_{\text{a,k}}^Q$	энергия теплового излучения
$E_{\text{имп}}$	энергия импульса	f	частота импульсов
E_y	модуль упругости	G	модуль сдвига
ЗВК	зона взаимной кристаллизации	$h_{\text{л}}$	глубина лунки
ЗТВ	зона термического влияния	H_V	твёрдость материала по Виккерсу
ИМ	инструментальный материал	k_b	постоянная Больцмана
ИПС	измененный поверхностный слой	$L_{\text{пп}}$	скрытая теплота плавления
К	температура (по Кельвину)	$L_{\text{испар}}$	скрытая теплота испарения
$K_{\text{мп}}$	коэффициент массопереноса	L	путь резания
ЛС	легированный слой	j_a	плотность анодного тока
ММ	методология материаловедения	$J_{\text{кр}}$	критическая плотность тока
МРИ	металлорежущий инструмент	$N_{\text{имп}}$	число импульсов
МЭП	межэлектродный промежуток	N_{Q}	мощность тепловых потоков, действующих на анод и катод
ОВ	островковые высоты	$N_{\text{уд}}$	удельная мощность источника тепла
ПС	поверхностный слой	N	мощность теплового потока
ПЭ	продукты эрозии	N_Q	плотность теплового потока
П%	пористость	q	плотность теплового потока
РИ	режущий инструмент	R_a	шероховатость
с	теплоёмкость	S	поверхность
$T_{\text{пл}}$	температура плавления	t	время
$T_{\text{испар}}$	температура испарения	t_p	приведённое время ЭИЛ
T_k	температура кипения	t_s	время начала хрупкого разрушения
T_0	температура холодной поверхности (окружающей среды)	t_o	оптимальное время легирования
$T_{\text{ч}}$	температура частички	$V_{\text{л}}$	объем лунки
$T_{\text{п}}$	температура поверхности	V	скорость
ЭИЛ	электроискровое легирование	λ	коэффициент теплопроводности
ЭЭД	электроэррозионное диспергирование	α	коэффициент термического расширения
ЭЭО	электроэррозионная обработка	γ	эффективность процесса ЭИЛ
ЭЭРО	электроэррозионная размерная обработка	ρ	плотность материала
ЭЭУ	электроэррозионное упрочнение	σ_n	нормальное напряжение
C_x	содержание элемента	ε_0	межэлектродный промежуток
		τ	касательное напряжение
		$\Delta_{\text{а,к}}$	эррозия материала анода, катода

Глава 1. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И РАЗВИТИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОЭРРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Напомним уже прозвучавшее ранее: 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].

1.1. Открытие метода электроэррозионной обработки материалов

Человек всегда стремился к созданию комфортных условий своей жизни, одной из потребностей которой было создание и использование вещей. Для чего необходимо было создание и использование орудий труда.

Первые орудия труда появились примерно 1 и более млн лет назад (рис. 1.1). Первое орудие труда – шельское каменное рубило – было создано около 800 тысяч лет назад. Потребовались сотни тысяч лет, чтобы в результате «проб и ошибок» появились ашельские орудия – овальные, круглые и утолщённые рубила. Прошли ещё тысячелетия, и появились мустьецкие орудия – остроконечник и скребло [2–4]. Появление орудий труда положило начало историческому процессу разрешения противоречий между физиологической ограниченностью человека и всё возрастающей потребностью создания и усовершенствования «второй природы» за счёт преобразования и усовершенствования естественной природы. Появление бронзы, а затем железа повысило возможности человека по созданию «второй природы». С начала бронзового века начинается всё усиливающаяся борьба за «покорение металла». В недрах ремесленного производства возникло производство машин-орудий с использованием режущего инструмента, что определило характер промышленной революции, вызвавшей огромный рост производительности труда.

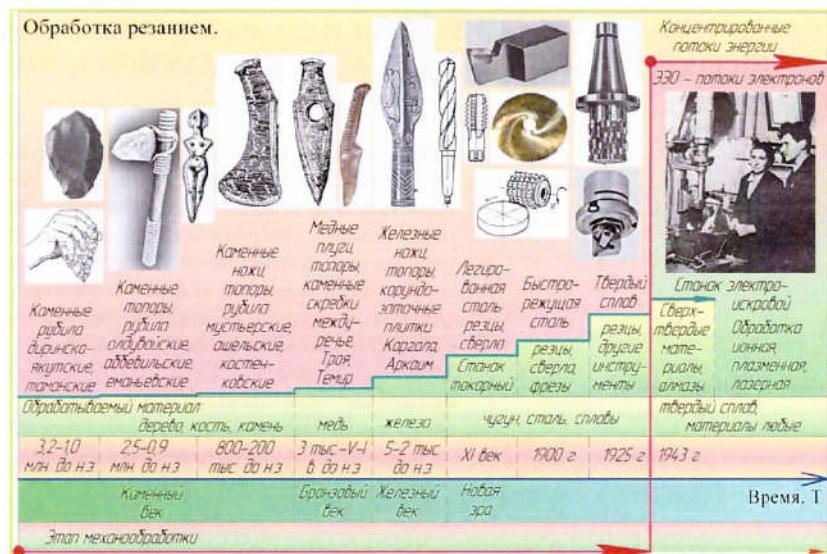


Рис. 1.1. Исторические этапы обработки материалов

Нами предлагается упрощённая схема развития метода обработки материалов резанием с древнейших времён и до наших дней: из двух этапов. Первый этап, механической обработки, начался несколько миллионов лет назад и продолжался до 1943 г., когда формообразование деталей осуществлялось преимущественно путём механического воздействия одного материала (инструментального), как правило, более твёрдого, на другой (конструкционный). При этом по мере совершенствования свойств конструкционного материала, к свойствам инструментального непрерывно предъявлялись всё более высокие требования. Первейшее требование классического века металлообработки – использование в качестве инструмента резца, материал которого должен быть обязательно твёрже обрабатываемого. Каждый раз появление нового сверхтвёрдого материала порождало необходимость создания для его обработки ещё более твёрдого материала, резца. Создание материала режущего инструмента с появлением особенно прочных, вязких материалов становилось всё более проблематичным. Усилия инженеров и учёных, конечно, помогали решить проблему, но это можно было делать не до бесконечности, и предел наступил к

середине XX в., когда проблема обработки материалов обозначалась всё острее и могла стать тормозом на пути научно-технического прогресса.

Однако замкнутый круг в обработке материалов был окончательно разорван к середине XX в. нашими выдающимися соотечественниками Б.Р. и Н.И. Лазаренко, которые гениально использовали в качестве инструмента электрическую искру, т.е. электронный поток вместо резца.

Был создан принципиально новый метод электроэрозионной обработки материала (ЭЭО) – использование в качестве режущего инструмента электронного потока, что ознаменовало собой начало второго этапа обработки материалов – концентрированными потоками энергии.

Это эпохальное событие в области технологии обработки металлов резанием сразу было замечено, но в своей стране не получило должного внимания. В 2010 г. отмечалось 100-летие со дня рождения выдающегося учёного и организатора науки Б.Р. Лазаренко (1910–1979), в связи с которым необходимо отметить и значительную роль его друзей и соратников: Г.В. Самсонова, А.Б. Артамонова, Б.Н. Золотых и многих других.

В 1943 г. в г. Свердловске сотрудникам эвакуированного из Москвы Всесоюзного электротехнического института супругам Борису Романовичу и Наталье Иоасафовне Лазаренко (рис. 1.2) было выдано авторское свидетельство «Способ обработки металлов и других токопроводящих материалов» [5]. Это событие, оставшееся в то время незамеченным, стало началом принципиально новой эпохи в тысячелетней истории технологии обработки материалов.

До открытия Б.Р. и Н.И. Лазаренко получение металлических изделий заданной формы осуществлялось преимущественно с использованием следующих методов: 1) обработка резанием; 2) обработка давлением; 3) заполнение жидким металлом полости формы, соответствующей по конфигурации детали (литейное производство); 4) сварка.

Эти методы обработки в большинстве случаев удовлетворяли условиям производства, использующего в качестве конструкционных и инструментальных материалов железоуглеродистые сплавы. Однако с появлением в начале XX в. быстрорежущих сталей (1900 г.), твёрдых сплавов (1925 г.), а затем сверхтвёрдых материалов на основе карбидов, боридов, нитридов [6, 7] остро возникла проблема их обработки.

Появился разрыв между возможностями металлургии (особенно порошковой), создающей материалы с всё возрастающим уровнем свойств, и их обработкой. Техника требовала нового метода обработки материалов вне зависимости от их твёрдости, прочности и хрупкости.



Рис. 1.2. Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко

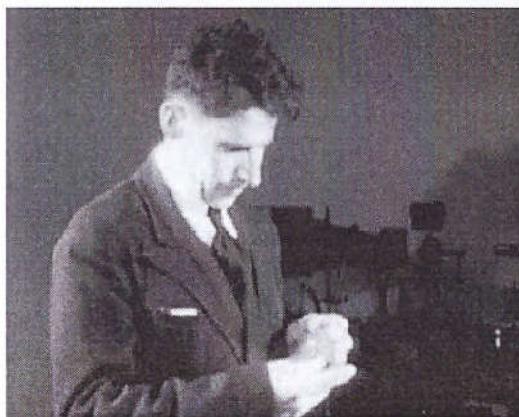
Этот разрыв устранили русские учёные – супруги Лазаренко, которые предложили для обработки материалов использовать в качестве рабочего инструмента концентрированный поток электронов, возникающий при электрическом разряде. После открытия ими электроэрзационного метода обработки стало возможным осуществлять не только формообразование материалов вне зависимости от их твёрдости, прочности и хрупкости (электроэрзационная размерная обработка – ЭЭРО), но и изменять структуру, фазовый, химический состав поверхности материалов (электроискровое легирование – ЭИЛ), а также получать с помощью этого метода порошки заданных размеров (электроэрзационное диспергирование материалов – ЭЭД). Предложенные после ЭЭО лазерный и электронно-лучевой методы ещё более расширили возможности технологии обработки материалов. При использовании этих методов для обработки материалов происходят сходные физико-химические процессы, связанные с воздействием концентрированных потоков энергии на вещество [8–11]. Общим для этих процессов является также использование концентрированных потоков энергии не только для формирования поверхностей, но и для поверхностного упрочнения и легирования и ряда других направлений.

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

Широкому распространению метода как в СССР, так и за рубежом, способствовали талант и целеустремлённость Б.Р. и Н.И. Лазаренко, а также создание ими первого в мире электроискрового станка (рис. 1.3) и небольшая книга, написанная авторами метода в 1944 г. [12].

Однако Б.Р. Лазаренко считал в то время, что в области ЭЭО были сделаны лишь первые шаги – «от многогранного процесса было взято лишь то, что лежало на поверхности».

Для разработки новых технологий, использующих электрические разряды, дальнейшего развития метода ЭЭО необходимо было тщательное изучение его физико-химической сущности, процесса эрозии материала электродов.



а



б

Рис. 1.3. Б.Р. Лазаренко в лаборатории (а); Б.Р. и Н.И. Лазаренко у первого созданного ими электроискрового станка (б)

Тесные рамки небольшой лаборатории – вначале заводской, а затем отраслевой, мешали проводить работы, связанные с решением всей возрастающих проблем по исследованию процесса ЭЭО и его использованию в народном хозяйстве (рис. 1.4).



*Рис. 1.4. Б.Р. Лазаренко в лаборатории
электроискровой обработки материалов МАТИ, 1948 г. Слева направо:
Т.И. Макеева, Д.З. Митяшкин, Б.Р. Лазаренко, Е.И. Белов, Б.Н. Лямин*

В связи с этим одной из основных задач для Б.Р. Лазаренко стал в послевоенный период перевод его лаборатории в систему АН СССР, а также создание научной школы (рис. 1.5).



*Рис. 1.5. Б.Р. Лазаренко и первые сотрудники лаборатории.
Москва, 1947 г.*

Только в 1955 г. его лаборатория становится самостоятельной организацией союзного значения и переводится в систему АН СССР. Очень плодотворным оказался «академический» период работы лаборатории: созданы физико-химические основы процесса ЭЭО, прин-

ципиально новые технологии, установки и приборы для осуществления процесса ЭЭО и ЭИЛ (рис. 1.6). Работы сотрудников лаборатории получили мировую известность.

Однако уже в 1961 г. в соответствии с постановлением правительства ряд институтов технического профиля АН СССР был передан в соответствующие министерства. Лабораторию Б.Р. Лазаренко переводили именно в то министерство, которое он резко критиковал за недостаточное внимание к методу ЭЭО, срыв планов по выпуску оборудования. И это только начало в области технологии электрической обработки (рис. 1.7).



*Рис. 1.6. Б.Р. Лазаренко с сотрудниками ЦНИИЛ,
г. Люблино, 1955 г.*



*Рис. 1.7. Б.Р. Лазаренко и аспиранты Н.Г. Андреев,
А.Д. Верхотуров, В.С. Сычёв*

Глава 3. ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Методы повышения работоспособности режущего инструмента на основе вольфрамсодержащих материалов

Высокая стоимость вольфрамового и кобальтового сырья и сокращение их запасов, появление новых труднообрабатываемых материалов в настоящее время обостряют проблему повышения работоспособности вольфрамсодержащих твёрдых сплавов (ВТС) – основного материала в производстве режущего инструмента (РИ) для обработки металлов и их сплавов, а также в горнодобывающей промышленности. Наибольшее применение ВТС получили в условиях, чрезвычайно неблагоприятных для процесса резания, где, с одной стороны, существует постоянная необходимость повышения производительности и точности обработки, а с другой – условия резания непрерывно ужесточаются. В земной коре «Кларк» вольфрама ограничен, его меньше (по А.П. Виноградову), чем таких стратегически важных элементов, как уран, почти в 2,5 раза, титан – в 3,5 тысячи раз. Цена вольфрама на мировых рынках непрерывно растёт, растут и требования к повышению эксплуатационных свойств ВТС, обусловленные потребностями производства и ростом производительности труда, что усиливает интерес к проблеме защиты и упрочнения рабочих поверхностей РИ из ВТС. Основным недостатком является низкая красностойкость ВТС, ограничивающая рабочую температуру эксплуатации до 740 °C.

В науке и технике в настоящее время известны многочисленные методы упрочнения и легирования поверхностей металлов и их сплавов, каждый из которых имеет как преимущества, так и недостатки для конкретных областей применения, поэтому за рубежом до 80 % твёрдосплавного РИ выпускается с покрытиями, преимущественно TiN, TiAlN, получаемыми в основном газофазным осаждением. В этом направлении представляет интерес предложенный супругами Лазаренко метод электроискрового легирования (ЭИЛ), позволяющий наносить на металлические поверхности любые токопроводящие материалы и

отличающийся наряду с низкой энергоёмкостью, экологической чистотой и безопасностью, простотой технологического процесса и малыми габаритами установок. Наибольшее количество известных исследований по созданию упрочняющих ЭИЛ-покрытий выполнено на стальных, титановых и других сплавах Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко, Г.В. Самсоновым, Б.Н. Золотых, А.Д. Верхотуровым, И.Г. Подчерняевой, А.Е. Гитлевичем, Ф.Х. Бурумкуловым, В.В. Михайловым, К.К. Намитковым, С.П. Фурсовым, И.И. Сафоновым, Л.С. Палатником, А.М. Покровским, Г.П. Ивановым, В.И. Ивановым, С.З. Бакал, Н.П. Коваль, Е.А. Зайцевым, А.Г. Базылько, Г.А. Бовун, Иноуэ Киёси и многими другими учёными (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Слева направо: И.А. Подчерняева, А.Е. Гитлевич, Ф.Х. Бурумкулов, В.В. Михайлов

На сплаве ВК6 впервые положительный эффект по созданию ЭИЛ-покрытий был отмечен в работах И.А. Подчерняевой (Киевский Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ). Однако отсутствуют систематические исследования формирования ЭИЛ-покрытий для повышения работоспособности ВТС. В литературе описываются различные варианты механизмов изнашивания и разрушения ВТС в процессе резания. Известны работы Р. Киффера, Ф. Беневозского, А.М. Шпилёва, В.С. Фадеева, А.В. Конакова, Ю.Г. Кабалдина, других учёных, показавших значительное влияние различных механизмов, в том числе теплового разрушения ВТС в диапазоне рабочих температур РИ из ВТС. Однако до сих пор практически не исследовано изменение структуры, состава и свойств ВТС при нагревании и разрушении за счёт химического износа рабочих поверхностей. Также отсутствуют данные по влиянию ЭИЛ рабочих поверхностей РИ на конечные параметры качества деталей при резании. Научный и

торам низкотемпературной плазмы: тез. докл. Т. 1. – Алма-Ата, 1977. – С. 405–413.

348. Кулаков П. А. Исследование устойчивости движения дуги в бегущем магнитном поле // УП Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Т. 1. – Алма-Ата, 1977. – С. 92–95.

349. Гурьянов В.К., Курбатов Е.П., Новиков О.Я. Исследование стабилизирующего воздействия на электрическую дугу вращающимся магнитным полем // Генераторы низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1969. – С. 285–291.

350. Новиков О.Я. Исследование устойчивости режимов электродуговых установок: Дис. ... д-ра техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1972. – 552 с.

351. Каплянский А.Е., Полотковский Л С, Соколов Н.Ф. и др. Гашение электрической дуги постоянного тока во вращающемся магнитном поле // Электричество. – 1956. – № 12. – С. 29–32.

352. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1965. – 259 с.

353. Браун С. Элементарные процессы в плазме электрического разряда. – М.: Госатомиздат, 1961. – 187 с.

354. Мазель А.Г. Технологические свойства электрической дуги. – М.: Машиностроение, 1969. – 112 с.

355. Окисление металлов / под ред. Ж. Бенара. Т. 1. – М.: Металлургия. – 1968. — 215 с.

356. Таран В.Д., Гаген Ю.Г. К исследованию движения дуги в магнитном поле // Автоматическая сварка. – 1966. – № 10. – С. 3–7.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
Глава 1. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ И РАЗВИТИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	7
1.1. Открытие метода электроэрозионной обработки материалов.....	7
1.2. Развитие метода электроэрозионной обработки.....	16
1.3. Основные обобщения трудов последователей метода электроэрозионной обработки супругов Лазаренко.....	20
1.4. Применение метода электроэрозионной обработки.....	31
Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	38
2.1. Основные закономерности процесса электроэрозионной обработки.....	38
2.1.1. Действие единичных и многократных искровых импульсов.....	39
2.1.2. Общие закономерности и различия физико-химических процессов электроэрозионной размерной обработки и электроискрового легирования.....	48
2.1.3. Модель процесса электроискрового легирования Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.....	50
2.2. Эрозия материала электродов.....	55
2.2.1. Общие положения.....	55
2.2.2. Модель механизма электроэрозионной обработки при импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде.....	62
2.2.3. Теплофизические процессы в приповерхностных слоях электродов.....	63
2.2.4. Гидро- и газодинамические процессы.....	69
2.2.5. Термомеханические процессы в поверхностных слоях электродов.....	70
2.2.6. Продукты электрической эрозии материалов электродов.....	73
2.3. Формирование вторичных структур в поверхностных слоях электродов.....	79
2.3.1. Общие положения.....	79
2.3.2. Массоперенос материала электрода.....	81
2.3.3. Влияние межэлектродной среды на формирование поверхностного слоя электрода.....	85
2.3.4. Влияние термомеханического воздействия искрового разряда на поверхностный слой.....	87
2.4. Физико-химические процессы и механизмы формирования поверхностных слоев при электронискровом легировании.....	88
2.4.1. Формирование приповерхностного слоя электрода (катода) при электроискровом легировании.....	88

2.4.2. Основные схемы образования измененного поверхностного слоя и эффект его упрочнения.....	91
2.4.3. Механизм формирования измененного поверхностного слоя, предложенный Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.....	97
2.4.4. Механизм формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании по И.З. Могилевскому.....	101
2.4.5. Механизм формирования поверхностного слоя по Л.С. Палатнику.....	103
2.4.6. Механизм формирования поверхностного слоя по Н.К. Мицкевичу.....	105
2.4.7. Механизм эрозионно-хрупкого разрушения измененного поверхностного слоя.....	108
2.5. Математическая модель расчета температурного поля для электроискрового легирования.....	112
2.5.1. Нелинейная модель температурного поля.....	112
2.5.2. Численные расчёты.....	121
2.5.3. Зона термического влияния на катоде.....	123
2.6. Обобщенная модель процесса формирования измененного поверхностного слоя.....	128
2.6.1. Формирование поверхности измененного поверхностного слоя.....	129
2.6.2. Формирование зон взаимной кристаллизации, диффузионной и зоны термического влияния.....	136
2.7. «Обобщения» Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко и некоторые комментарии к ним.....	142
Глава 3. ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	152
3.1. Методы повышения работоспособности режущего инструмента на основе вольфрамсодержащих материалов.....	152
3.2. Жаростойкость вольфрамсодержащих материалов.....	161
3.2.1. Исследование жаростойкости вольфрамсодержащих материалов и составляющих их элементов и соединений.....	162
3.2.2. Изменение химического и фазового составов поверхностного слоя вольфрамсодержащих материалов при нагреве.....	168
3.2.3. Исследование жаростойкости вольфрамсодержащих материалов с покрытиями.....	177
3.3. Оборудование, методики и методология при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов.....	183
3.3.1. Выбор материала электродов.....	183
3.3.2. Приборы и оборудование для электроискрового легирования.....	186
3.3.3. Методы и методики исследований.....	188
3.3.4. Методология исследований электроискрового легирования вольфрамсодержащих материалов.....	194
3.3.5. Критерии оценки эффективности процесса электроискрового легирования.....	203

Глава 4. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТАЛЛАМИ.....	213
4.1. Формирование легированного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов алюминием и медью.....	213
4.1.1. Кинетика процесса электроискрового легирования вольфрамсодержащих материалов алюминием.....	213
4.1.2. Изменение микроестьметрии и микромеханических характеристик поверхности вольфрамсодержащих материалов, легированных алюминием, при электроискровом легировании.....	216
4.1.3. Химический, рентгенофазовый составы и структура измененного поверхностного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов алюминием.....	219
4.1.4. Электроискровое легирование вольфрамсодержащих материалов медью.....	224
4.2. Формирование легированного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов металлами IV–VI групп.....	228
4.2.1. Методологические схемы и последовательность исследований.....	229
4.2.2. Исследование кинетики массопереноса.....	232
4.2.3. Изменение фазового и химического составов легированного слоя в зависимости от длительности процесса легирования.....	236
4.3. Исследование продуктов эрозии после электроискрового легирования вольфрамсодержащих материалов металлами.....	244
4.4. Формирование легированного слоя, содержащего композиционную керамику, при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов металлами.....	247
4.5. Критерии эффективности при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов металлами.....	250
4.6. Исследование работоспособности режущего инструмента из вольфрамсодержащих материалов с покрытиями из металлов, нанесенным электроискровым легированием.....	255
4.6.1. Обоснование размерной стойкости как критерия размерного износа.....	256
4.6.2. Испытания размерной стойкости вольфрамсодержащих материалов после электроискрового легирования их металлами.....	258
Глава 5. ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕГИРОВАННОГО СЛОЯ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ И СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРИДОВ И КАРБИДОВ.....	264
5.1. Выбор боридных электродных материалов и методология легирования вольфрамсодержащих материалов боридами.....	264
5.2. Формирование легированного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов боридами.....	267
5.2.1. Исследование кинетики массопереноса.....	267

5.2.2. Химический, рентгенофазовый составы и морфология легированного слоя на вольфрамсодержащем материале.....	269
5.3. Продукты эрозии и эрозионная стойкость боридов при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов.....	271
5.3.1. Исследование гранулометрического состава.....	273
5.3.2. Исследование химического и фазового составов.....	276
5.4. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов сложными боридами с пластической связкой.....	281
5.5. Критерии эффективности при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов боридами.....	285
5.6. Исследование работоспособности режущих инструментов из вольфрамсодержащих материалов после электроискрового легирования боридными материалами.....	289
5.7. Формирование легированного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих материалов карбидами.....	294
5.7.1. Кинетика массопереноса и эффективность электроискрового легирования вольфрамсодержащих материалов карбидами.....	295
5.7.2. Жаростойкость вольфрамсодержащих материалов после электроискрового легирования карбидами.....	299
5.7.3. Работоспособность вольфрамсодержащих материалов после электроискрового легирования карбидами.....	301
Глава 6. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	304
Глава 7. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	332
7.1 Теория организации высокоенергетического локального источника нагрева.....	332
7.1.1. Теория газодинамического управления тепловым слоем дуги.....	334
7.1.2. Решение системы интегральных уравнений.....	339
7.1.3. Численное решение задачи о цилиндрической дуге в «обратной струе».....	341
7.1.4. Решение для участка дуги, находящегося в канале.....	343
7.2. Разработка теории определения расхода газа через канал плазмотрона по перепаду давления.....	346
7.2.1. Постановка задач.....	348
7.2.2. Расчет расхода газа при «холодных» продувках.....	352
7.2.3. Расчет расхода газа при наличии дуги.....	353
7.3. Структура и свойства металлов при высокоенергетическом локальном воздействии.....	355
7.3.1. Исследование изменения микротвердости в области высокоенергетического локального воздействия.....	363
7.3.2. Механизм образования и внутреннее строение пор в зоне воздействия плазменного луча.....	369
7.4. Высокоэнергетическое локальное воздействие при плазменно-механической обработке металлов.....	373
7.5. Высокоэнергетическое локально-дискретное воздействие на структуру и свойства металлов.....	379
7.5.1. Теория организации расщепленной электрической дуги в области электродной привязки.....	380
7.5.2. Газодинамические характеристики электродугового устройства для поверхностной термообработки металлов.....	386
7.5.3. Моделирование механизма формирования струй и турбулентности в электродуговом устройстве для поверхностной термообработки.....	389
7.6. Исследования структуры и механических характеристик металлов при воздействии расщепленной электрической дугой на поверхность.....	398
7.6.1. Исследования структуры и механических характеристик титановых сплавов при воздействии высокоенергетических потоков в электролитах.....	411
7.7. Электромагнитное управление электрическим разрядом в газе.....	417
7.7.1. Виды управляющих магнитных полей и механизм их взаимодействия с плазмой электрического разряда в газе.....	421
7.7.2. Влияние окружающей среды и внешних электромагнитных сил на характер движения электрического разряда в газе.....	425
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	435
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	439

Научное издание

Верхотуров Анатолий Демьянович
Гордиенко Павел Сергеевич
Достовалов Виктор Александрович
Коневцов Леонид Алексеевич
Панин Евгений Савельевич
Достовалов Демьян Викторович

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ЛОКАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВОЛЬФРАМОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТАЛЛЫ

(к 100-летию со дня рождения Б.Р. Лазаренко)

Монография

Редактор В.В. Прищепа
Компьютерная верстка А.Ю. Купцовой
Дизайнер Е.В. Журавлёва

Подписано в печать 17.12.2012. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 27,43. Уч.-изд. л. 25,50.
Тираж 300 экз. Заказ 340.

Издательский дом Дальневосточного федерального университета.
690950, г. Владивосток, ул. Октябрьская, 27.

Отпечатано в типографии Издательского дома
Дальневосточного федерального университета.



Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор (Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск)



Гордиенко Павел Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией (Институт химии ДВО РАН, Владивосток)



Достовалов Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор Инженерной школы (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток)



Коневцов Леонид Алексеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник (Институт материаловедения ХИЦ ДВО РАН, Хабаровск)



Панин Евгений Савельевич – кандидат химических наук, научный сотрудник (Институт химии ДВО РАН, Владивосток)

ISBN 9785744425890

9 785744 425890