

Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокompозитов, полученных электроискровым легированием

Д. М. Кройтору^a, С. А. Силкин^{b,d}, Н. Н. Казак^a, С. Х. Ивашку^a, * В. И. Петренко^a,
Г. И. Поштару^c, В. И. Юрченко^d, Е. В. Юрченко^d

^aИнститут прикладной физики, г. Кишинев, MD-2028, Молдова,

^{e-mail:} v.petrenko@phys.asm.md

^bКостромской госуниверситет, г. Кострома, 156005, Россия

^cТехнический университет Молдовы, г. Кишинев, MD-2004, Молдова

^dПриднестровский госуниверситет им. Т. Г. Шевченко, Тирасполь, Молдова

Поступила 13.10.2020

После доработки 09.11.2020

Принята к публикации 10.11.2020

Наноструктурированные композиционные поверхностные слои металлических изделий позволяют улучшить эксплуатационные характеристики изделия. В условиях электроискрового легирования (ЭИЛ) происходит как перенос материала на обрабатываемую поверхность, так и изменение ее характеристик под воздействием электрического разряда. Исследована возможность модифицирования поверхности при ЭИЛ с использованием электродов, содержащих карбидные фазы, а также с использованием графитовых электродов с целью образования подобных фаз. Основной целью в данном случае являлось упрочнение поверхности и повышение ее стойкости при истирании. Использовали электроды из сплавов Т15К6 и ВК8, стали 45, вольфрама и графита. Показано, что определяющее влияние на износостойкость оказывает наличие карбидов в поверхностных слоях, в частности, и при использовании электрода из стали 45. При увеличении концентрации карбидов в подложке возрастает износостойкость слоев. Показана возможность получения карбидосодержащих поверхностных слоев непосредственно в процессе ЭИЛ при использовании в качестве электродов вольфрама и графита с последовательным нанесением ряда чередующихся слоев.

Ключевые слова: электроискровое легирование, микротвердость, износостойкость, карбидосодержащие слои

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.5281/zenodo.4299860

ВВЕДЕНИЕ

С момента создания способа электроискровой модификации металлических поверхностей прошло уже более 60 лет [1, 2], однако до сих пор отсутствует устоявшаяся терминология, которая в максимальной степени соответствовала бы особенностям этого способа обработки поверхности. В наибольшей степени, видимо, он соответствует термину «электроискровое легирование» (electrospark alloying) [2], но используется также “electrodischarge treatment” (электроразрядная обработка) или “electrospark deposition” и др. Причина, очевидно, состоит в том, что в данном случае имеют место разные технологии, в основе которых лежит один и тот же физический процесс. В частности, наращивание измененного слоя на поверхность детали может быть необходимым для восстановления рабочей поверхности, а упрочнение поверхности или повышение ее

коррозионной стойкости может не требовать повышения его толщины. Более того, при решении определенных технологических задач необходимо как раз избегать повышения толщины упрочненного или коррозионно-стойкого слоя.

Очевидно, что в самом общем случае в условиях электроискрового легирования (ЭИЛ, наиболее часто используемый термин) имеет место именно модификация металлической поверхности, которая может осуществляться как с наращиванием слоя, так и без. В условиях использования ЭИЛ неоднократно было показано, что получающийся поверхностный слой (упрочненный, коррозионностойкий или обладающий какими-либо иными свойствами) представляет собой композит, в состав которого помимо материала обрабатываемого электрода входит и материал подложки. Следовательно, не только природа обрабатываемого электрода, но и материал подложки должны оказывать сущест-

венное влияние на свойства получаемых поверхностных слоев.

В настоящее время уже кажется очевидным, что наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов [3, 4]. С использованием понятия о нанокристаллических материалах [5], для которых объем отдельных элементов (зерен) меньше объема границ раздела между ними, возможны методы управления свойствами поверхностных слоев, основанными на их наноструктурировании [3, 4]. Реализация этого процесса осуществляется применением соответствующих технологий: магнетронного напыления, ионно-плазменной обработки, вакуумно-дуговых покрытий, ультразвуковой обработки, а также различных видов комбинированной обработки [3].

К числу таких методов относится и ЭИЛ. Действительно, как показано в [6–8], в условиях ЭИЛ различными обрабатываемыми электродами возможно образование наноструктурированных поверхностных слоев. При использовании электрода, представляющего собой смесь тугоплавкой матрицы и легкоплавкого компонента, происходит образование ансамбля нанонитей легкоплавкого компонента, следствием чего является существенное повышение износостойкости покрытия [6, 7]. Возможности наноструктурирования поверхностных слоев продемонстрированы в ряде работ [9–11], в которых описаны технологии ЭИЛ с использованием обрабатываемых электродов, полученных СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез) методом, с включением в него ультрадисперсных тугоплавких оксидов, карбидов, а также ультрадисперсного алмаза. При этом в покрытиях увеличиваются твердость, износостойкость, жаростойкость, возможно снижение коэффициента трения в сравнении с поверхностными слоями, не содержащими нанодисперсных компонентов. Видимо, не только в этих случаях имеет место наноструктурирование, но поверхностные слои, образующиеся при ЭИЛ, как правило, являются наноструктурными (см., например, [6–8, 12]).

При ЭИЛ, применяемом с целью упрочнения поверхности, используются в основном обрабатываемые электроды, содержащие карбиды вольфрама, а также других элементов (Ti, Cr, Mo, Zr, Ta) [13]. Однако, учитывая условия ЭИЛ, образование карбидных фаз в покрытиях возможно не только вследствие использования обрабатываемых электродов, их содержащих, но и вследствие собственно процесса, если в

качестве обрабатываемого использовать графитовый электрод. Так, например, при ЭИЛ графитом сплавов железа формируется упрочненный слой, содержащий вязкий аустенит и твердый карбид. Высокая скорость охлаждения при образовании поверхностного упрочненного слоя приводит к формированию фазового состава с образованием метастабильных фаз, в том числе и карбидов [14–16]. ЭИЛ графитовым электродом не сопровождается увеличением размеров детали, что позволяет сравнивать его с разновидностью химико-термической обработки – цементацией [14]. Глубина цементации тем больше, чем больше содержание углерода в стали [16]. Для повышения износо- и коррозионной стойкости деталей применялась последовательная обработка ЭИЛ обрабатываемым электродом определенного типа с последующей обработкой графитовым электродом [16, 17].

Цель настоящего исследования – оценка возможностей модифицирования поверхности при ЭИЛ с использованием обрабатываемых электродов, содержащих карбидные фазы, а также образования подобных фаз с использованием графитовых электродов. Поскольку основной целью модифицирования в данном случае является упрочнение поверхности, оценку возможности управления предполагалось осуществлять на основе определения износостойкости полученных слоев при различных условиях трения. При этом предполагалось исследование получаемых модифицированных слоев не только в виде покрытий конечной толщины, но и упрочнение модифицированной поверхности без изменения размера.

Сложность количественной оценки износостойкости получаемых поверхностных слоев состоит в том, что: а) получаемые поверхности имеют очень высокую шероховатость, б) они существенно неоднородны как по составу, так и по свойствам. Поэтому основной метод оценки трибологических свойств таких покрытий – оценка износостойкости модифицированной поверхности в сравнении с износостойкостью подложки (см. обзор [18]). Однако обобщение результатов исследований, проведенное в [18], показывает, что далеко не всегда на основе уже проведенных экспериментов можно сделать однозначные выводы, поскольку многие важнейшие параметры, от которых зависит износостойкость, такие, например, как природа материала контртела, влияние уровня шероховатости, схема механических испытаний, были существенно различными. Это не позволяло осуществлять корректный анализ получаемых

результатов и делать достаточно широкие обобщения.

Подобный метод сравнительных испытаний будет использован и в настоящей работе, но на его основе будет сделана попытка оценки:

- влияния материала подложки (сталей с различным содержанием карбидов) на износостойкость модифицированного слоя;
- возможности получения карбидных фаз в процессе обработки с целью повышения износостойкости;
- особенностей влияния микротвердости и шероховатости поверхности на скорость износа.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Обработку поверхности образцов сталей с различным содержанием углерода (Ст20, Ст35 и Ст45) проводили на установках ALIER-31 (Scinti, Молдова) и ЭФИ-10а (Молдова) при энергиях разряда 0,3 и 1 Дж. При этом использовали обрабатывающие электроды из сплавов Т15К6 и ВК8, содержащих карбиды вольфрама и титана, а также из Ст45 и вольфрама. Получали образцы с покрытиями из Т15К6 и ВК8 двух типов: без последующей и с последующей обработкой графитовым электродом для модификации поверхности. Последний вид обработки осуществляли разными методами, о чем будет сказано в соответствующих разделах статьи. При получении покрытий время обработки составляло 1, 3 и 5 мин/см². При модификации поверхности предварительно наносили покрытие при времени обработки 2 мин/см² с последующей обработкой графитом в течение 1 мин/см².

Определение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Учитывая, что результаты определения микротвердости могут сильно варьировать из-за неоднородности поверхности, рассчитывали среднее значение и стандартное отклонение. Измерения микротвердости при нагрузке 50 г проводили также на срезе покрытия с существенно большей точностью и меньшей величиной стандартного отклонения.

Испытания на износ проводили в двух вариантах. В первом из них использовали условия трения «шарик на плоскости». В качестве контртела был применен корундовый шар диаметром 6,35 мм (микротвердость ~ 2500 HV). Линейная скорость трения составила 0,4 м/с, путь трения – 240 м при нагрузке 10 Н. Радиус дорожки трения составил 8,4 мм. Измерения массового износа осуществляли с использованием весов Vibra 225DRCE с точностью 0,01 мг. Величину износостойкости I рассчитывали на основе потери массы образца в

форме $\Delta/H \times m$, где Δ – изменение массы образца (нг), а m – длина пути трения в метрах.

Схема другого типа предусматривала определение массового износа плоского образца, совершающего возвратно-поступательные движения с частотой 180 двойных ходов в минуту (3 Гц) и длиной хода 40 мм с установленным сверху контртелом из термообработанной стали Ст45 с нагрузкой 20 Н. Микротвердость контртела составляла 500 HV. Размерный контакт в паре трения 10×2 мм. Величину износа определяли измерением потери массы как контртела, так и образцов и количественно оценивали в нг/Нм. При этом, поскольку измерения носили сравнительный характер, определяли износостойкость как контртела ($I_{кт}$), так и композита (I_k). В некоторых случаях величина износа была отрицательной величиной, поскольку происходил перенос массы контртела на исследуемый образец. Определяли также износостойкость исследуемых поверхностей в зависимости от длины пути трения (800, 1600 и 2400 м). Это осуществляли периодическими измерениями потери (увеличения) массы образца после каждого из этапов из 10 тысяч циклов, который соответствовал длине пути 800 м. Соотношение $I_{кт}/I_k$ позволяло судить о влиянии материала обрабатываемого электрода, энергии разряда, микротвердости и шероховатости поверхности на износостойкость модифицированной поверхности.

Измерения шероховатости поверхности (по критериям R_z и R_a) проводили, используя профилограф-профилометр Surtronic 25 (Taylor Hobson, Великобритания), как до трибологических тестов, так и после.

Элементный состав композитов после модифицирования поверхности и износных испытаний определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (Xenometrix, Израиль). Содержание тяжелых элементов в поверхностном слое представлены в процентах по массе. Легкие элементы (углерод, кислород, азот) в использованном варианте метода не определялись. Толщина исследованного поверхностного слоя составляла 3–5 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние материала подложки на состав и износостойкость поверхностных слоев

Рентгенофлуоресциционный анализ поверхности T_0 наглядно показывает, что в результате электроискровой модификации поверхности действительно получается композит, в состав которого входит материал не только обрабатываемого электрода, но и подложки (рис. 1).

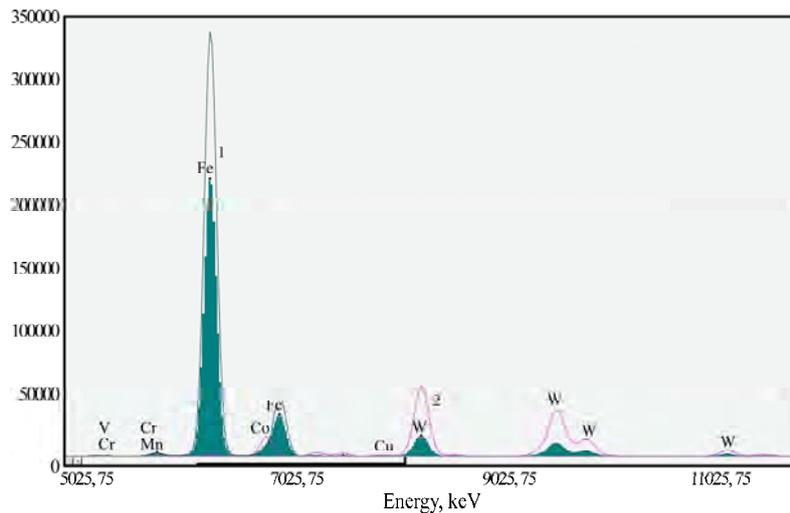


Рис. 1. Рентгенофлуоресционный спектр поверхностного слоя подложки из стали Ст45 (1), обрабатывающего электрода ВК8 (2) и композита, полученного после ЭИЛ при 0,3 Дж (закрашено).

Таблица 1. Состав композита, полученного электродом из твердого сплава Т15К6 при различных режимах обработки

№ п/п	Энергия разряда, Дж	Концентрация элементов в композите (% , масс)			
		Fe	W	Ti	Co
1	0,3	69,1	22,2	3,8	4,9
2	1,0	62,2	26,6	4,7	5,3

Это также подтверждается результатами количественного анализа компонентов поверхностного слоя, приведенными в табл. 1. Видно, что до двух третей (по массе) поверхностный слой состоит из материала подложки. Увеличение энергии разряда приводит к росту концентраций компонентов, содержащихся в обрабатывающем электроде, и снижению концентрации материала подложки (табл. 1).

Увеличение концентрации карбидной фазы в подложке должно сказываться на характеристиках поверхностного слоя и, прежде всего, износостойкости, которая должна расти с увеличением концентрации карбидов. Представленные в табл. 2 значения I были получены: а) на подложках стали с разным содержанием углерода (Ст20, Ст35, Ст40), б) при обработке различными обрабатывающими электродами (Т15К6, ВК8, NiCr, W, Cr) как без обработки графитовым электродом, так и с его использованием; с) при различных энергиях разряда. Видно, что, несмотря на существенный разброс полученных значений I (стандартное отклонение I в некоторых случаях достигало 50% от среднего (табл. 2)), износостойкость композитов тем выше, чем выше содержание карбидов в подложке. Одновременно из результатов, приведенных в табл. 2, видно, что износостойкость упрочненного поверхностного слоя в среднем на порядок выше износостойкости подложки. Результаты, приведенные в табл. 2, получены по схеме трения «шарик на плоскости» с

контртелом из корунда. Более подробно эти результаты будут описаны в отдельном сообщении.

Влияние материала обрабатывающего электрода, энергии разряда, элементного состава поверхности, шероховатости и микротвердости на износостойкость

В связи с макроскопической неоднородностью поверхностного слоя после ЭИЛ его микротвердость обычно определяется на срезе покрытия. Однако при механических испытаниях «работает» поверхностный слой. И, видимо, именно по этой причине, как отмечалось в [18], степень увеличения микротвердости после ЭИЛ не всегда соответствовала увеличению износостойкости. Износостойкость увеличивалась в существенно меньшей степени, чем росла микротвердость. Обычно поверхностный слой, отвечающий за износостойкость, как правило, имеет меньшую микротвердость, чем измеренный на срезе покрытия, что подтверждается полученными данными (рис. 2). Микротвердость на срезе покрытия может достигать значений HV 3500, увеличиваясь с ростом энергии разряда, в то время как измеренная по поверхности имеет существенно больший разброс значений, уменьшаясь почти на порядок величины. Одновременно видно, что после упрочнения с использованием электродов, содержащих карбиды вольфрама – Т15К6 и ВК8, дополнительная обработка графитовым

Таблица 2. Влияние материала подложки на износостойкость композитов, полученных ЭИЛ различными электродами

№ п/п	Материал подложки	Износостойкость подложки, нг/Нм	Износостойкость ЭИЛ композита, нг/Нм
1	Сталь 20	3,6±0,08	0,27±0,11
2	Сталь 35	2,88±0,83	0,21±0,09
3	Сталь 45	1,45±0,38	0,16±0,08

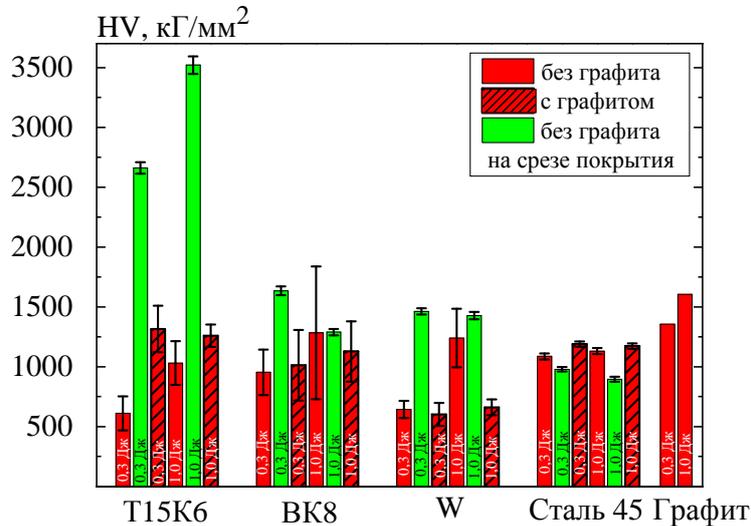


Рис. 2. Микротвердость поверхностных слоев образцов после ЭИЛ различными электродами.

электродом, как правило, приводит к росту измененных значений микротвердости (рис. 2). Иная картина наблюдалась в экспериментах с использованием в качестве обрабатывающего электрода W.

Применение вольфрамового электрода в сочетании с графитовым преследовало цель определить возможность образования упрочняющей карбидной фазы в процессе обработки. При его использовании HV увеличивается с ростом энергии разряда существенно выше при ее измерении на срезе, но в целом снижается после обработки графитовым электродом (рис. 2).

При переносе материала электрода к образцу под действием разряда может происходить перенос карбидов в каплях материала электрода или же их образование при высоких температурах в разрядном канале. Сталь Ст45 содержит заметное количество углерода и может подвергаться термообработке с формированием различных структур в зависимости от условий ЭИЛ. Высокие поверхностные температуры при разряде с последующим резким охлаждением могут приводить к закалке и быть причиной дополнительного упрочнения. Исходная микротвердость HV ~ 220 поверхности образца увеличивается после ЭИЛ в несколько раз. Вследствие малой толщины модифицированного слоя при измерении на срезе его микротвердость уменьшалась (рис. 2). Дополнительная обработка графитом повышает микротвердость, но незначительно, примерно до 10%.

Шероховатость полученных поверхностей ($R_z \sim 20$ мкм) относительно мало менялась в зависимости от природы обрабатывающего электрода, дополнительного графитизирования поверхности и энергии разряда, однако существенно снижалась в условиях обработки Ст45 и последующей обработки графитовым электродом (рис. 3).

Результаты износных испытаний на машине с возвратно-поступательным движением образца при контртеле из закаленной стали 45 и длине пути трения 800 м приведены на рис. 4. Во всех случаях износостойкость увеличивалась после графитизирования поверхности искровыми разрядами, а при обработке электродом из BK8 и последующей обработке графитовым электродом происходила не потеря массы, а, наоборот, ее увеличение вследствие переноса материала контртела на поверхность, подвергнутую ЭИЛ (рис. 4). Видно, что при использовании электродов, в состав которых входят карбиды, повышение износостойкости (снижение I) в большей степени имеет место при относительно низких энергиях разряда. При более высоких энергиях износ поверхности возрастает, что может быть обусловлено, в частности, более высокой шероховатостью. Также наблюдается необычная зависимость от микротвердости, в особенности если использовать данные измерений на срезе покрытия. Микротвердость композита, полученного при обработке твердым сплавом T15K6, достигает HV ~ 3500, а износ

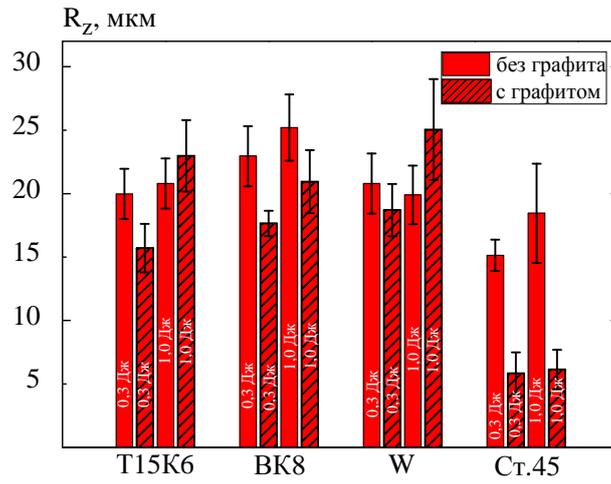


Рис. 3. Шероховатость поверхности после ЭИЛ различными электродами.

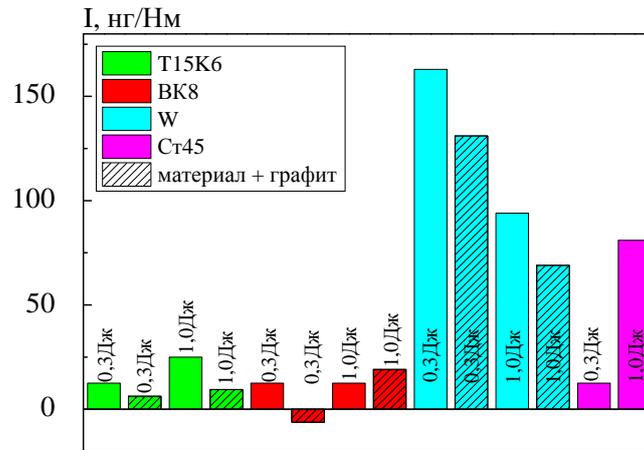
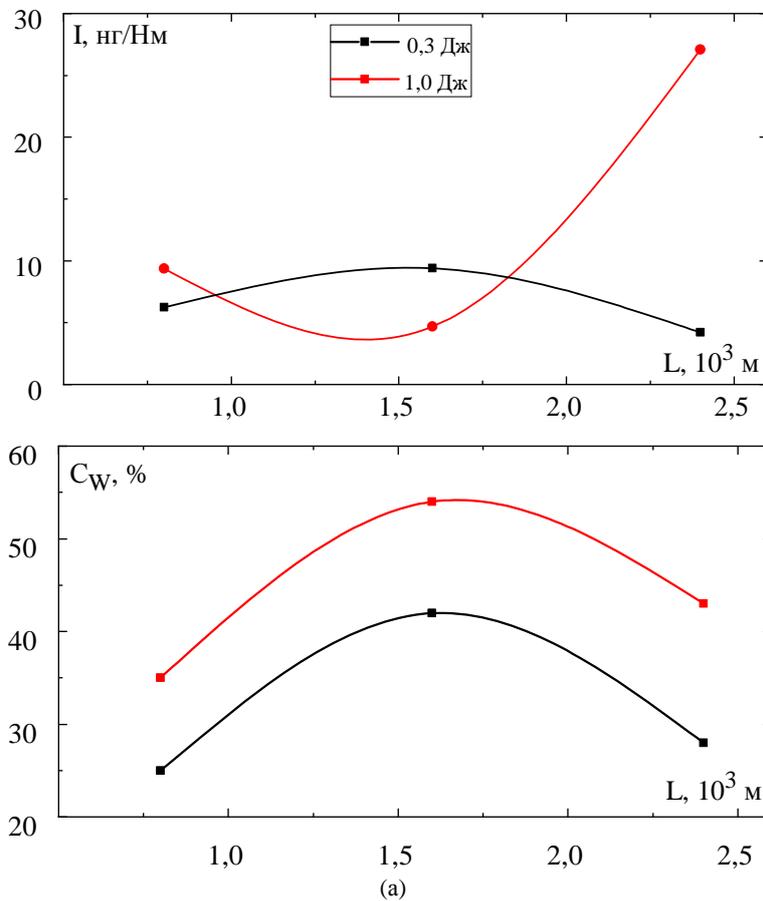
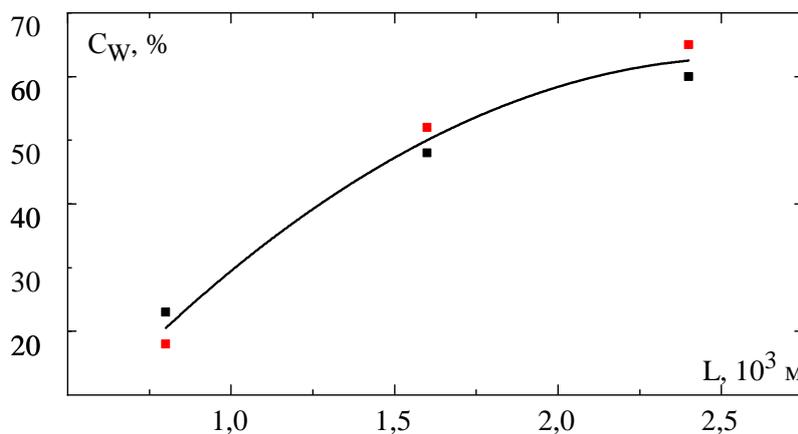
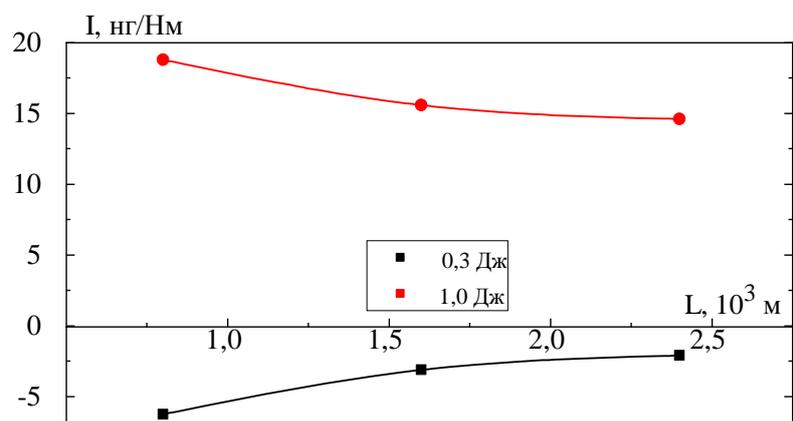
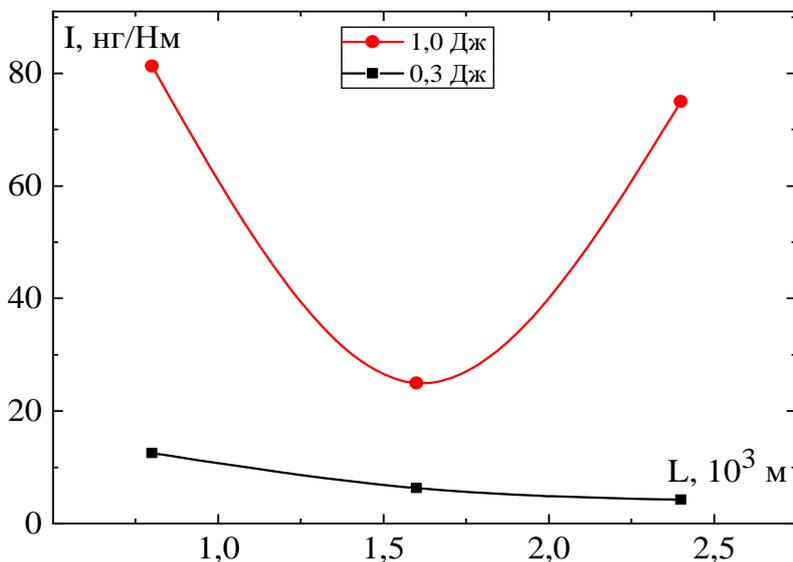


Рис. 4. Износостойкость поверхностных слоев в зависимости от материала обрабатываемых электродов и энергии разряда.





(б)



(в)

Рис. 5. Влияние длины пути трения на износ образцов, обработанных электродами Т15К6+С (а), ВК8+С (б) и Ст45 (в), и изменение содержания W в поверхностном слое в процессе испытаний.

таких покрытий выше, чем поверхностей, обработанных сплавом ВК8, с меньшей микротвердостью.

Объяснить полученные результаты можно, если принять, что в условиях механических испытаний с используемым контртелом износу подвергается не модифицированная поверхность

после ЭИЛ, но своеобразный композит, состоящий из материала контртела, переносимого на образец из материала собственно поверхностного слоя.

На рис. 5 представлены зависимости массового износа от пути трения и концентрации вольфрама в покрытии как «маркера» изменения

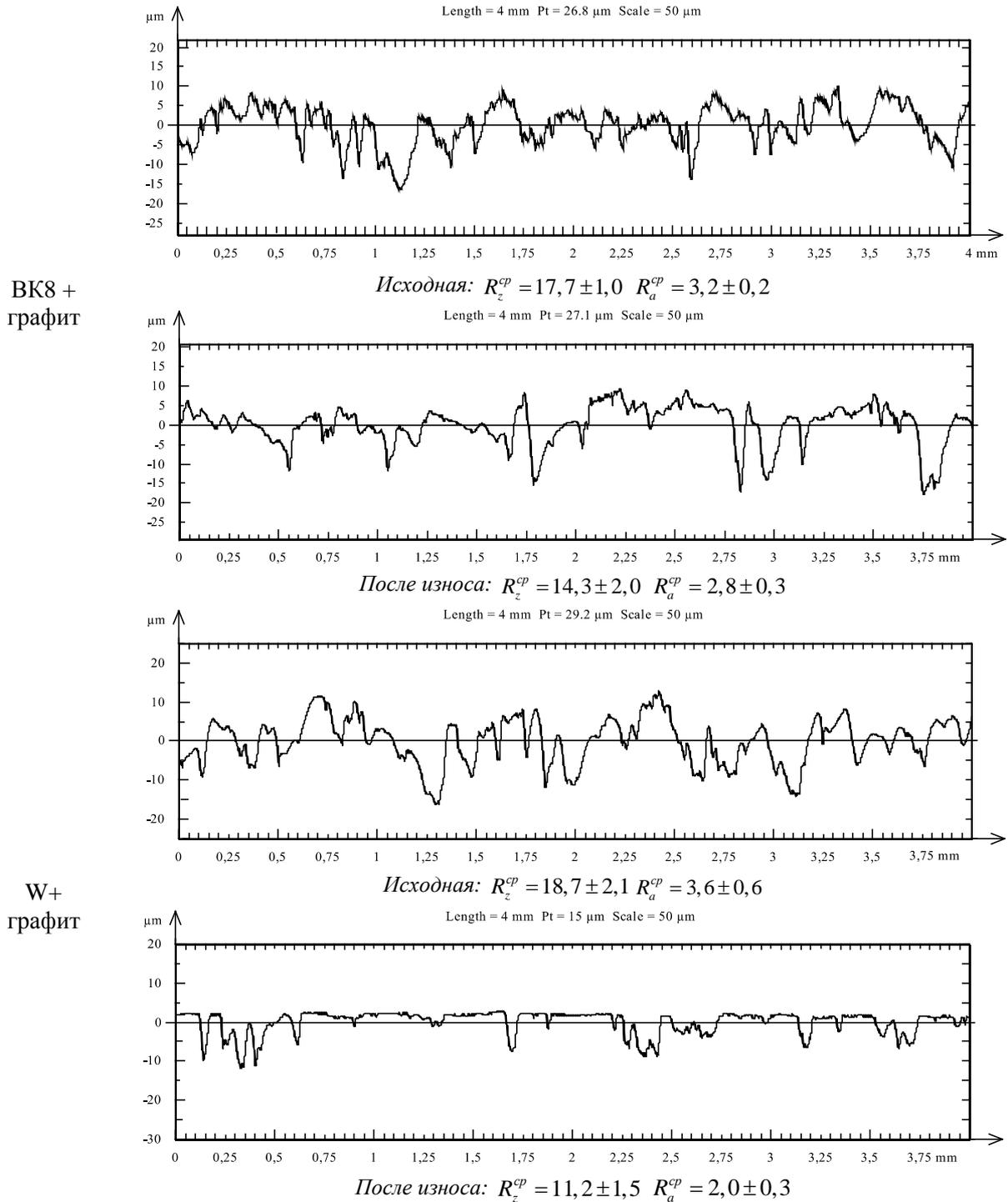


Рис. 6. Профилограммы поверхности образцов до и после испытаний на износ.

состава поверхности в процессе испытаний. Об этом свидетельствуют, в частности, результаты измерения концентрации вольфрама в поверхностном слое при различной длине пути (рис. 5б). При достаточно длительном времени испытаний концентрация вольфрама (то есть наличие карбидов) в поверхностном слое начинает падать с одновременным накоплением концентрации железа, переносимого из контртела, при большем износе контртела.

Возможность образования карбидов в процессе обработки и их влияния на износостойкость можно объяснить на основе резуль-

татов, полученных на образцах, обработанных вольфрамовым электродом (рис. 4). Видно, что износостойкость возрастает: а) при увеличении энергии разряда, б) при последующей обработке графитовым электродом. Это именно те условия, при которых концентрация карбидов в поверхностном слое должна увеличиваться. Однако во всех случаях износостойкость полученных слоев существенно меньше, достигнутой при обработке электродами, содержащими карбидные фазы. Тем не менее результаты, приведенные на рис. 4, однозначно указывают на возможность карбидообразования при ЭИЛ,

поиск оптимальных условий которого требует дальнейших исследований.

Профилограммы, приведенные на рис. 6, показывают, каким образом в отличие от поверхностей, обработанных сплавом ВК8, обеспечивается высокий массовый износ поверхности после обработки вольфрамовым электродом.

При использовании в качестве обрабатывающего электрода стали Ст45 при относительно низких энергиях разряда возможно достижение высокой износостойкости, которая снижается при переходе к обработке с более высокой энергией (рис. 4). Очевидно, что и в этом случае более высокие энергии разряда увеличивают перенос материала контртела в поверхность, следствием чего является увеличение износа.

Влияние материала электрода при различных энергиях разряда на соотношение износов контртела и образца $I_{ктл}/I_k$ показано на рис. 7. Это соотношение максимально после обработки сплавом ВК8, в особенности при низкой энергии разряда. Видно также, что в этих условиях $I_{ктл}/I_k$ увеличивается с ростом пути трения и разница достигает почти двух порядков величины (рис. 7а). При использовании в качестве контртела корунда соотношение $I_{ктл}/I_k$ составляет около порядка величины (табл. 2), а микротвердость закаленной стали существенно выше микротвердости подложки. Столь высокие значения отношения $I_{ктл}/I_k$ требуют объяснения. Можно предположить, что причина наблюдаемого эффекта обусловлена взаимным влиянием износа обработанной поверхности и контртела, при котором материал контртела переносится на поверхность. Возможно, подобный синергетический эффект износа контртела является не только следствием хороших трибологических характеристик обработанной поверхности (износ контртела из закаленной стали на порядок и более величины превышает износ обработанной поверхности), но и высокой шероховатости обработанной поверхности. Однако износ контртела существенно меньше износа поверхности при использовании вольфрамового электрода (в том числе и с последующей обработкой графитом) с шероховатостью, близкой к наблюдаемой для карбидо-содержащих электродов (см. рис. 3, 6 и 7в). Очевидно, что упрочнение поверхности в условиях ЭИЛ достигается, прежде всего, вследствие карбидообразования в поверхностном слое, а большой износ контртела происходит вследствие его более низкой твердости относительно твердости карбидов – 500 и 1000–3000 HV соответственно.

Модификация поверхности без нанесения дополнительного слоя

В экспериментах, описанных выше, следствием обработки было получение слоя конечной толщины, поскольку были использованы электроды, содержащие карбиды, а время использования графитового электрода не превышало одной трети общего времени обработки. В описываемых ниже экспериментах модификация поверхности осуществлялась либо графитовым электродом, либо попеременно электродом из W или T15K6 и графитовым электродом. Общее количество этапов обработки – 5–7 при энергии разряда (0,05–2 Дж). Результаты механических испытаний также приведены в табл. 3. Как видно, минимальный износ характерен для систем T15K6+C и ВК8+C.

Следует обратить внимание на результаты испытаний системы W+C (табл. 3, опыты 1, 4 и 7). В одном из них достигается низкий износ (высокая износостойкость) (табл. 3, опыт 1), в двух других износ поверхности возрастал в несколько раз. Причин столь значимых различий было несколько. Первая (и, видимо, основная) состояла в том, что в случае опыта 1 (табл. 3) осуществлялась последовательная обработка различными электродами (W-графит-W-графит и т.д.). Проплавление ранее нанесенного слоя, состоящего из смеси железа и вольфрама, при переносе углерода с обрабатывающего электрода должно приводить к образованию карбидов. В двух других опытах это условие не выполнялось. Кроме того, эксперимент осуществлялся с максимальным временем обработки графитом на последней стадии (~ треть от общего времени обработки, составившего 6,6 мин/см²). Таким образом, время обработки на последней стадии составило 2 мин/см², что было вдвое выше, чем в соответствующих экспериментах, описанных в предыдущем разделе. И наконец, возможная третья причина состояла в том, что в этом случае использована подложка из стали Ст45, которая вследствие достаточно высокого содержания углерода способна подвергаться термообработке и при электроискровом разряде подкаливаться в результате проплавления и последующего быстрого охлаждения.

Вероятно, именно последовательная обработка различными электродами, ранее примененная для повышения толщины слоя [19, 20] и предложенная в [3, 4] как эффективный метод управления свойствами поверхности с целью ее упрочнения, и в данном случае обеспечивала повышение износостойкости без исполь-

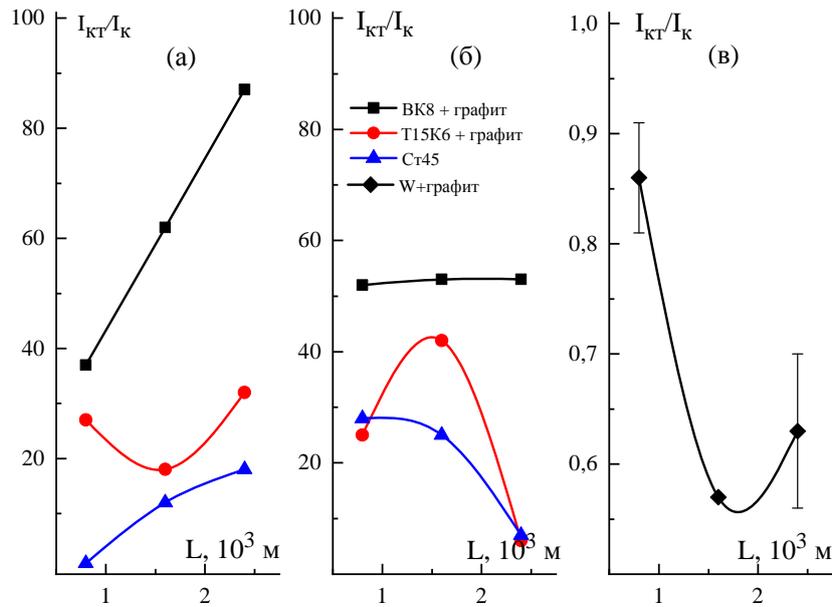


Рис. 7. Зависимость соотношения скоростей износа контртела и модифицированной поверхности от длины пути трения. ЭИЛ при энергии разряда 0,3 Дж (а), (в) и 1 Дж (б).

Таблица 3. Физико-механические и трибологические свойства графитизированных нанокompозитов

№ п/п	Материал подложки	Обрабатывающий электрод(ы)	Микротвердость, HV (кГ/мм ²)	Шероховатость композитов, R _z (мкм)		Износостойкость композитов I, нг/Нм
				после их нанесения	после испытания на износ	
1	Сталь 45	W+C	490±60	20,1±2,4	20,7±0,64	20,4±2,2
2	Сталь 35	Графит	1040±100	19,6±3,55	23,7±3,9	40,7±4,5
3	Сталь 35	T15K6+C	1500±400	14,6±3,63	18,8±5,3	11,0±6,6
4	Сталь 20	W+C	950±190	23,4±3,84	21,2±3,5	129,7±2,3
5	Сталь 45	BK8+C	1140±100	19,9±3,13	18,2±2,51	18,8±8,8
6	Сталь 20	NiCr+C	377±17	22,5±2,03	22,1±2,44	42,2±11,0
7	Сталь 35	W+C	552±140	11,2±1,26	9,67±1,73	107,8±11,0

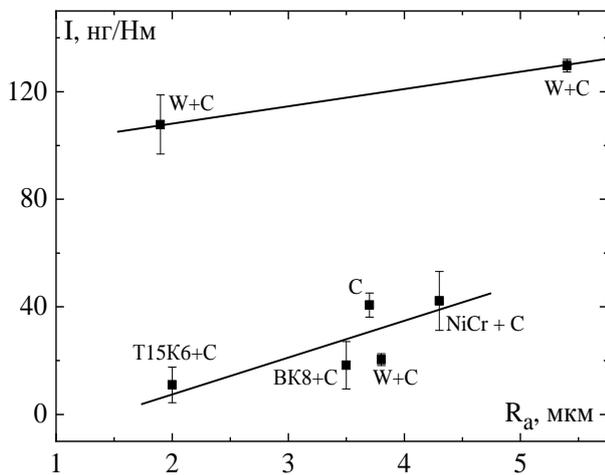


Рис. 8. Влияние шероховатости поверхности после ЭИЛ различными электродами на скорость износа.

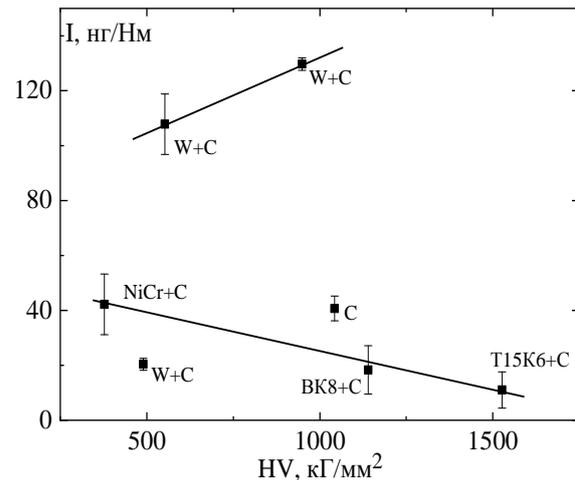


Рис. 9. Влияние микротвердости на износостойкость поверхностных слоев после ЭИЛ.

зования обрабатывающих электродов на основе твердых сплавов, содержащих WC.

Анализ влияния шероховатости показывает, что повышение шероховатости приводит, конечно, к усилению износа, однако этот фактор не столь важен, поскольку максимальный износ наблюдается при наименьшей шероховатости

(табл. 3, рис. 8). Видимо, основной причиной повышения износостойкости является изменение содержания карбидов после обработки.

Аналогичный вывод может быть сделан и с учетом зависимости износа поверхности от микротвердости поверхностного слоя. Он снижается, но в существенно меньшей

степени, чем следовало бы при увеличении микротвердости (рис. 9), что и отмечалось ранее в [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при упрочнении методом ЭИЛ образующийся поверхностный слой представляет собой композит, состоящий из материала обрабатывающего электрода и подложки. Доля материала обрабатывающего электрода увеличивается с повышением энергии разряда.

Показано влияние микротвердости и шероховатости обработанной поверхности на величину износостойкости поверхностного слоя. Причем определяющую роль играет наличие в слое поверхностного композита карбидов, в том числе и при использовании в качестве обрабатывающего электрода стали Ст45. При увеличении концентрации карбидов в подложке возрастает износостойкость полученных поверхностей.

Высокие значения микротвердости получаемых слоев, достигающие HV 3500 (на срезе измененного слоя), приводят к тому, что при использовании в качестве контртела термообработанной стали с HV 500 его материал в процессе трения переносится на образец и возникает эффект взаимного влияния трущихся поверхностей. В этом случае отношение массового износа контртела и модифицированного слоя может достигать почти двух порядков величины.

При использовании вольфрама и графита в качестве обрабатывающих электродов при последовательном нанесении слоев в процессе упрочнения методом ЭИЛ возможно получение карбидосодержащих поверхностных слоев, что позволяет управлять их износостойкостью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Настоящая работа выполнялась в рамках финансирования проекта ANCD (Молдова) 19.80013.50.07.06 A/BL “Manufacturing of new micro- and nanostructuring materials by physicochemical methods and the elaboration on their base”, частичного финансирования европейским проектом H2020 “Smartelectrodes” (№ 778537), бюджетного финансирования Костромского государственного университета (РФ) и Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко, Н.И., *Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей*, М.: Изд. АН СССР, 1958. 177 с.
2. Лазаренко, Н.И., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*, М.: Машиностроение, 1976. 46 с.
3. Панин, В.Е., Сергеев, В.П., Панин, А.В., Почивалов Ю.Н., Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурированных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов, *Физика металлов и металловедение*, 2007, т. 104, № 6, с. 650.
4. Панин, В.Е., Сергеев, В.П., Панин, А.В., *Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий*, Томск: Изд. ТПИ, 2010. 254 с.
5. Gleiter, H., Nanostructured materials: basic concepts, *Acta Mater.*, 2000, vol. 48, p. 1.
6. Yurchenko, V.I., Yurchenko, E.V., Fomichev, V.M. et al., Obtaining of nanowires in conditions of electrodischarge treatment with Al-Sn alloy, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2009, vol. 45, no. 4, p. 259.
7. Dikusar, A.I., *Obtaining nanowires under conditions of electrodischarge treatment. In: Nanowires: Implementations and Application*, Ed. Abbas Hashim, Croatia, 2011, pp. 357–374.
8. Nicolenco, S.V., Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials, based on Tungsten carbide, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 4, p. 217.
9. Левашов, Е.А., Кудряшов, А.Е., Потапов, Н.Г., Новые СВС-материалы для электроискрового легирования с использованием ультрадисперсных порошков, *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия*, 2000, № 6, с. 67.
10. Левашов, Е.А., Мишина, Е.С., Сематуллин, Б.Р., и др. Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплава TiC – 40%ХН70Ю, полученного методом СВС, *Физика металлов и металловедение*, 2003, т. 95, № 6, с. 58.
11. Кудряшов, А.Е., Замулаева, Е.Н., Левашов, Е.А., и др., Применение технологии электроискрового легирования СВС-электродных материалов для повышения стойкости валков стана горячей прокатки, ч. 2 Структура и свойства сформированных покрытий, *ЭОМ.*, 2019, т. 55, № 2, с. 10.
12. Topala, P, Ojegov, A., Ursachi, V., *Nanostructures obtained using electric discharges at atmospheric pressure In: Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Nanoscience and Technology*, Ed. I. Tighineanu, Springer Int. Publishing, Switzerland, 2016, pp. 43–83.
13. Верхотуров, А.Д., Иванов, В.И., Коневцов, Л.А., О влиянии физико-химических свойств тугоплавких соединений и твердых сплавов на их эрозию при электроискровом легировании, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 6, с. 8.
14. Гитлевич, А.Е., Михайлов, В.В., Парканский, Н.Я., Ревуцкий, В.М.,

Электроискровое легирование металлических поверхностей, Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.

15. Михайлюк, А.И., Гитлевич, А.Е., Иванов, А.И. и др., Превращения в поверхностных слоях сплавов железа при электроискровом легировании графитом, *ЭОМ.*, 1986, № 4, с. 23.
16. Тарельник, В.Б., Паустовский, А.В., Ткаченко, Ю.Г. и др., Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение, *ЭОМ.*, 2017, т. 53, № 4, с. 1.
17. Михайлюк, А.И., Ревенко, В.Г., Натаров, Н.Н., Повышение износо- и коррозионной стойкости меди методом электроискрового легирования, *Физ. и хим. обр. матер.*, 1993, № 1, с. 101.
18. Rukanskis, M., Control of metal surface mechanical and tribological characteristics using cost effective electrospark deposition, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 5, p. 607.
19. Юрченко, В.И., Юрченко, Е.В., Дикусар, А.И., Применение барьерных слоев при получении наноструктурированных электроискровых покрытий повышенной толщины на алюминиевых сплавах, *ЭОМ.*, 2018, т. 54, № 4, с. 9.
20. Юрченко, В.И., Юрченко, Е.В., Дикусар, А.И., Толстослойные наноструктурированные электро-

искровые покрытия алюминия и его сплавов, *ЭОМ.*, 2019, т. 55, № 5, р. 1.

Summary

Nanostructured composite surface layers of metal articles improve application requirements. Under the conditions of electrospark alloying (ESA), both the material transfer to the treated surface and the change in its characteristics under the influence of an electric discharge occur. A possibility of surface modification during ESA with the use of electrodes containing carbide phases, as well as with the use of graphite electrodes in order to form such phases, has been investigated. The main purpose of that was to strengthen the surface and to increase its friction resistance. Electrodes from T15K6 and VK8 alloys, as well as from steel 45, tungsten, and graphite were used. It is shown that the presence of carbides in the surface layers has a decisive influence on the wear resistance, in particular, when a steel 45 electrode is used. With an increase of the carbides concentration in the substrate, the wear resistance of the obtained layers also increases. It is shown the ESA treatment with tungsten and graphite electrodes with sequential deposition of a number of alternating layers allows the obtaining of carbide-containing surface layers directly in alloying process.

Keywords: electrospark alloying, microhardness, wear resistance, carbide-containing layers