

Влияние состава стали на свойства композитной поверхности, получаемой электроискровым легированием

Ю. В. Беньковский^a, Д. М. Кроитору^b, В. И. Петренко^{b**},
П. Н. Стойчев^c, Е. В. Юрченко^a, А. И. Дикусар^{a,b*}

^aПриднестровский госуниверситет им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь, Молдова

^bИнститут прикладной физики, г. Кишинев, MD–2028, Молдова

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

* e-mail: aidikusar@gmail.com

** e-mail: vladimir.petrenko@ifa.md

Поступила в редакцию 11.06.2021

После доработки 15.07.2021

Принята к публикации 19.07.2021

На основе исследования элементного состава поверхностных композитов, получаемых электроискровым легированием сталей 45, 65Г и Ст3 твердыми сплавами Т15К6, ВК8, а также сталями 45 и Ст3 (вариант «сталь по стали»), показано, что образующиеся поверхностные слои на ~70% состоят из материала стальной подложки, модифицированной электроразрядной обработкой. Исследовано влияние состава стали на коэффициенты переноса материала обрабатываемого электрода (ОЭ) на подложку, на шероховатость, микротвердость и износостойкость получаемых поверхностей. Показано, что износостойкость композитов определяется в основном природой обрабатываемой поверхности и в существенно меньшей степени материалом ОЭ, шероховатостью и микротвердостью поверхности.

Ключевые слова: электроискровая обработка, сталь, твердый сплав, композитные материалы, поверхность, износостойкость

УДК 621.9.048.4

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.01>

ВВЕДЕНИЕ

Большей частью электроискровое легирование (ЭИЛ) рассматривается как способ нанесения на изделие покрытия, обладающего теми или иными преимущественными характеристиками. Покрытие может быть с большей или меньшей степенью сплошности, но в то же самое время оно обязательно сцеплено с подложкой в результате проплавления зоны электроискрового разряда.

В [1] было показано, что так называемые покрытия, получаемые электроискровым легированием, в действительности таковыми не являются, поскольку представляют собой поверхностную систему, значительную часть которой (до 70%) составляет материал обрабатываемой подложки (стали). То, что поверхностные слои, получаемые ЭИЛ, обязательно содержат материал подложки, модифицированный в процессе электроразрядной обработки, было известно всегда, но, к сожалению, далеко не всегда это служило предметом детального исследования. О широких возможностях ЭИЛ в качестве процесса модификации металлических поверхностей имеется обширная литература (см., например, [2–5]). Кроме того, как показано

в ряде работ, выполненных в последнее время, в процессе ЭИЛ происходит наноструктурирование поверхности [6–15], что достигается либо естественным путем [6–8, 12, 15], либо введением в обрабатывающий электрод (ОЭ) ультрадисперсных материалов [9–11, 13].

Наноструктурирование поверхностных слоев – эффективный метод упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов [16, 17]. С использованием понятия о нанокристаллических материалах [18] (когда объем отдельных элементов – зерен меньше объема границ раздела между ними) развиваются методы управления свойствами поверхностных слоев, основанными на наноструктурировании [16, 17]. Одним из таких методов является ЭИЛ.

Под композиционными материалами обычно подразумевают материалы, включающие два или более компонентов, обладающих различными свойствами, но придающих совокупной системе новые свойства. Обычно такие фазовые составляющие в отдельности сохраняют свои свойства. При ЭИЛ как материал электрода-инструмента, так и материал подложки в результате термических и динамических воздействий претерпевают некоторые изменения, образуя новую

Таблица 1. Элементный состав сталей, обрабатывающих электродов (ОЭ) и полученных поверхностных композитов (% масс)

Материал (композит)	E , Дж	Fe	C	Si	Mn	W	Ti	Co	V
45		97	0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8				
65Г		98	0,62–0,7	0,17–0,37	0,8–1,2	0,17	–	–	–
T15K6						79 (карбид)	15(карбид)	6	
T15K6 + сталь 45	0,3	69,1			–	22,2	3,8	4,9	–
T15K6 + 65Г	0,07	71±7			0,8±0,1	19,4±5,8	2,6±1,0	5,5±0,2	0,3±0,1
	0,39	71,6±0,6			0,86	22,3±1,6	3,1±0,3	1,5	0,39±0,03
	1,58	73,8±0,3			0,96±0,01	18,7±0,7	3,1	3,0±0,5	0,36±0,01

систему, которая включает как элементы исходных материалов, так и новую промежуточную структуру. С некоторой долей условности, при отсутствии другого термина, такую систему также можно назвать композитом или композитным поверхностным слоем.

Совершенно очевидно, что управление свойствами таких композитов требует детального исследования влияния материала подложки (обрабатываемого металла) на свойства получаемых поверхностей, чему и посвящена настоящая работа.

В качестве материала, подвергаемого ЭИЛ, используются в основном стали различной природы. И в настоящем исследовании влияние подложки выявляли на примере модификации поверхности ряда сталей. Однако очевидно, что подход подобного рода открывает широкие возможности расширения ЭИЛ в том случае, если подобное влияние окажется значимым. ЭИЛ уже сейчас оказывается эффективным методом обработки алюминиевых [6, 7, 19], титановых [14, 20] сплавов, а также других материалов [5]. Кроме того, учитывая, что особенности количественных оценок такого влияния и разработки способов получения композитов подобного рода достаточно широки, исследования в этом направлении следует оценить как обоснованные, более того, открывающие достаточно широкие возможности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭИЛ поверхности стальных образцов осуществляли с использованием установки ALIER-31 (Scinti, Moldova) при фиксированных энергиях разряда от 0,07 до 1,58 Дж в течение 4 мин, что соответствовало скорости обработки 0,8 мин/см². В качестве обрабатываемых сталей применяли сталь Ст3 (ГОСТ 380–2005), стали 45 и 65Г (ГОСТ 1050-88). Составы сталей приведены в табл. 1. В качестве материалов ОЭ использованы как твердые сплавы T15K6 и BK8, так и стали 45 и Ст3.

В последнем случае реализовали вариант ЭИЛ «сталь по стали», то есть при обработке стали 45 использовали обрабатывающий электрод из материала этой же стали, а при обработке стали Ст3 – из Ст3 и фактически осуществляли изменение шероховатости. Поскольку в процессе ЭИЛ происходила модификация поверхности как с включением материала электрода, так и стали, получаемые поверхностные слои также (с известной долей условности) можно рассматривать как композиты, что частично и будет показано ниже.

Элементный состав получаемых композитов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (Xenometrik, Израиль). В табл. 1 приведено содержание тяжелых элементов в % по массе. Легкие элементы (углерод, кислород, азот) в использованном варианте метода не определяли. Анализ поверхностных слоев осуществлялся на глубину до 3–5 мкм. Результаты измерений сильно варьировали при низких энергиях разряда, чего не наблюдалось при более высоких (табл. 1).

Одним из показателей процесса обработки, который определяет многие свойства поверхности, является коэффициент переноса. Его рассчитывали на основе измерений потери массы ОЭ и привеса обрабатываемой стали:

$$K = \Delta m_a / \Delta m_k,$$

где Δm_a и Δm_k – изменение массы ОЭ и обработанной поверхности соответственно. Величину K определяли при различных энергиях разряда в зависимости от природы ОЭ и обрабатываемой поверхности.

Влияние энергии разряда, природы ОЭ и материала подложки (стали) оценивали также измерением шероховатости поверхности по R_z (мкм) с использованием профилографа-профилометра Surtronic (Taylor Hobson, Великобритания). В качестве интервальных приведены стандартные отклонения.

Определение микротвердости HV (кГ/мм²) проводили с использованием прибора ПМТ-3 при нагрузке 50 г. Результаты измерения сильно варьировали в особенности при низких энергиях

разряда. В связи с этим в некоторых случаях ниже приведены только максимальное и минимальное измеренные значения. В остальных даны средние значения и стандартные отклонения, полученные по результатам не менее 10 измерений.

Схема износных испытаний предусматривала определение массового износа плоского образца, совершающего возвратно-поступательные движения с частотой 180 двойных ходов в минуту (3 Гц) при длине хода 40 мм в условиях сухого трения с установленным сверху контртелом из термообработанной стали 45 при нагрузке 20 Н. Микротвердость контртела была равной 500 HV. Размерный контакт в паре трения составил 10×2 мм. Величину износа определяли измерением потери массы и количественно оценивали в виде отношения потери массы образца к произведению нагрузки и длины пути трения (нг/Нм). Длина пути трения во всех тестах равнялась 800 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав композитов, полученных ЭИЛ

Стали, которые были использованы в качестве подложки (именно они подвергались электроискровому воздействию) были по своему химическому составу достаточно близкими, в частности, содержали углерод и Si (табл. 1). Однако используемый в работе вариант метода рентгенофлуоресцентного анализа не может определять углерод и кремний, поэтому в составах образцов, приведенных в табл. 1, не содержатся эти элементы, хотя их содержание не вызывает сомнений, и, следовательно, этот факт должен отражаться на свойствах материала.

Результаты табл. 1 позволяют сделать несколько выводов. 1. Независимо от энергии разряда получаемые композиты на ~ 70% по составу представляют собой обрабатываемую сталь. 2. При низких энергиях разряда имеет место существенная неоднородность элементного состава поверхностного слоя (разброс значений при $E = 0,07$ Дж достигает $\sim \pm 10\%$ номинальной величины, то есть разница концентрации может достигать 20%). 3. Если карбиды (вольфрама и титана), входящие в состав обрабатывающего электрода (ОВ), на 20–25% переносятся в состав композита, то % содержания Co, входящего в его состав, может достигать величины, близкой к 90%. 4. Содержание Mn в композите практически соответствует составу обрабатываемой стали.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что не только свойства материала обрабатывающего электрода (в частности, карбиды

вольфрама и титана), но и в значительной степени материал подложки (обрабатываемой стали) должны определять свойства получаемых поверхностей.

Коэффициенты переноса

Вывод об определяющем влиянии материала подложки подтверждается, прежде всего, в эффекте массопереноса материала анода на обрабатываемую поверхность сталей. Результаты, представленные на рис. 1, показывают, что значения K в сильной степени определяются: а) энергией разряда, б) материалом обрабатываемой стали. Минимальные значения коэффициентов переноса достигаются при обработке стали 45. Только при энергии разряда 1,58 Дж приблизительно 80% материала анода переносится на сталь. При меньших энергиях коэффициент переноса существенно ниже. Максимальные значения достигаются при использовании в качестве подложки Ст3, и при энергии разряда 0,39 Дж K практически равно 1 (то есть 100% твердого сплава переносится на сталь). Однако при увеличении энергии разряда коэффициент массопереноса падает, поскольку скорость потери массы растет, а по увеличению массы обрабатываемой стали достигнут предел.

Влияние природы ОЭ сказывается, конечно, но в меньшей степени. При ЭИЛ стали 65Г различными ОЭ характер зависимости K от энергии разряда сохраняется, но конкретные значения скорости массопереноса при обработке твердым сплавом ВК8 несколько меньше, чем Т15К6. Кажется очевидным, что наблюдаемые различия обусловлены теплофизическими характеристиками материалов (как обрабатывающих, так и обрабатываемых), но несомненно также, что они должны сказываться на свойствах получаемых поверхностей.

Шероховатость поверхности

Наименьший коэффициент переноса материала ОЭ наблюдается при обработке стали 45 (рис. 1). Совершенно очевидно, что и шероховатость поверхности в этом случае минимальна (рис. 2, 3). В настоящем исследовании в качестве ОЭ использовались не только твердые сплавы, но и стали (проводили обработку «сталь по стали»). Конечно, шероховатость поверхности в этом случае была меньше (при обработке стали 65Г был использован электрод из стали Ст3), но общая закономерность, в соответствии с которой шероховатость возрастала при переходе от стали 45 к Ст3 и 65Г, наблюдалась и применительно к этой разновидности процесса ЭИЛ. В полном соответствии с общей тенденцией формирования

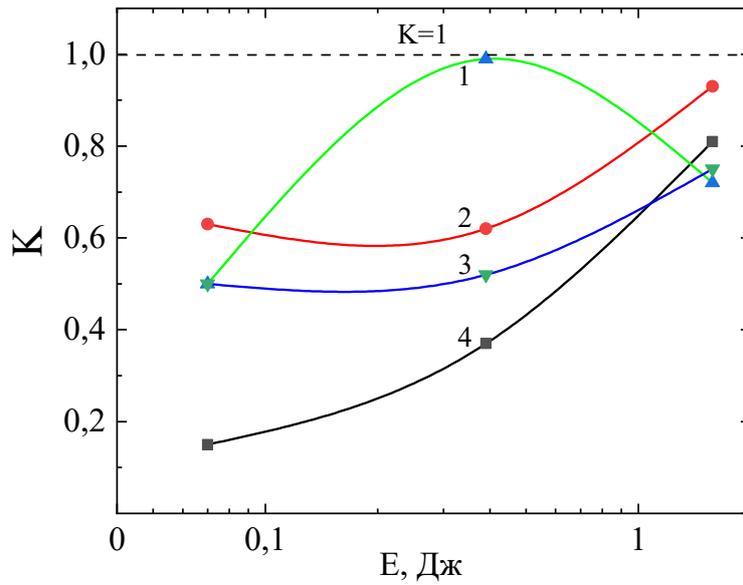


Рис. 1. Влияние энергии разряда на коэффициент переноса при ЭИЛ обрабатываемым электродом из Т15К6 (1, 2, 4) и ВК8 (3) сталей Ст3 (1), 65Г (2, 3) и 45 (4).

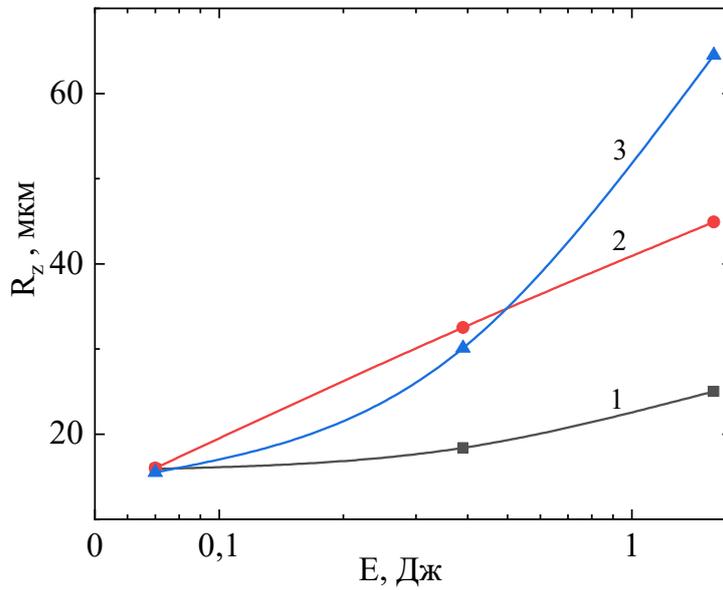


Рис. 2. Влияние энергии разряда на шероховатость поверхности при обработке ОЭ из ВК8 сталей 45 (1), 65Г (2) и Ст3 (3).

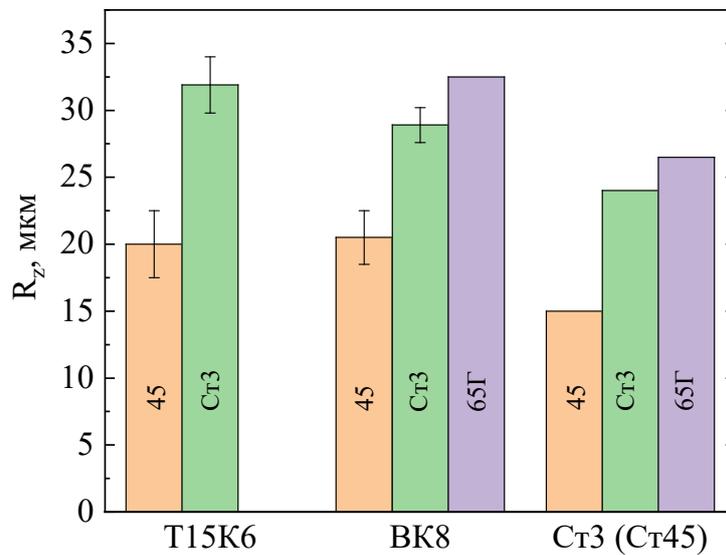


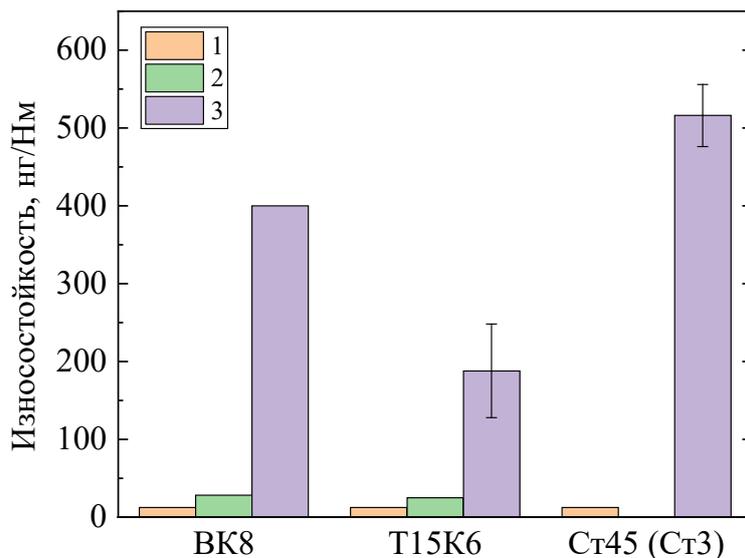
Рис. 3. Влияние природы ОЭ на шероховатость поверхности различных сталей после обработки при $E = 0,3-0,39$ Дж.

Таблица 2. Влияние энергии разряда на микротвердость композитов на стали 65Г после обработки ОЭ из Т15К6

E , Дж	HV (кГ/мм ²)
0,07	1441–2609
0,39	1750±80
1,58	1380±15

Таблица 3. Влияние материала подложки и ОЭ ($E = 0,3–0,39$ Дж) на микротвердость поверхности (кГ/мм²)

	Т15К6	ВК8	Ст3 (сталь 45)
45	650±100	950±120	1100±50
65Г	1750±80	–	–
Ст3	2300±900	1380±470	613±210

**Рис. 4.** Износостойкость композитов, полученных при обработке образцов из сталей 45 (1), 65Г (2) и Ст3 (3) и $E = 0,3–0,39$ Дж.

состава и свойств поверхности ее шероховатость увеличивалась при росте энергии разряда, однако степень увеличения определялась материалом подложки (рис. 2). Теплофизические характеристики как ОЭ, так и обрабатываемой стали – основа наблюдаемых особенностей, но тот факт, что при ЭИЛ получается не покрытие в классическом смысле, а композит, на 70% состоящий из материала подложки, является причиной определяющего влияния обрабатываемого материала.

Микротвердость

Микротвердость получаемых поверхностей зависит от энергии разряда (уменьшаясь с увеличением последней) (табл. 2). Следует обратить внимание на то, что при низкой энергии разряда (0,07 Дж) отмечается большой разброс значений микротвердости, что обусловлено неравномерностью состава (табл. 1) в сочетании с низкими значениями коэффициентов переноса (рис. 1). В то же время высокие значения коэффициентов переноса K определяют повышение микротвердости при использовании в качестве ОЭ твердых сплавов Т15К6 и ВК8 (табл. 3).

Необходимо также отметить, что при использовании в качестве подложки стали Ст3 наблюдается особо сильная неоднородность микротвердости. Это обусловлено неоднородностью химсостава этой стали, содержание карбидов в которой может варьировать в очень сильной степени (в качестве интервальных представлены стандартные отклонения, табл. 2, 3). Интересно отметить, что микротвердость поверхности в варианте обработки «сталь по стали» при обработке стали 45 возрастает при переходе от ОЭ из твердого сплава к электроду из стали, в то время как при обработке поверхности из мягкой стали Ст3 она снижается (табл. 3). Можно также констатировать, что и с точки зрения этого свойства поверхности микротвердость в сильной степени зависит от природы обрабатываемой стали.

Износостойкость

Наиболее ярко влияние состава обрабатываемого материала проявилось при определении его износостойкости в паре трения с контртелом из закаленной стали (рис. 4). Даже при использовании варианта обработки «сталь по стали» износостойкость была минимальна при

обработке стали 45. Поверхности, полученные на СтЗ, имели износостойкость более чем на порядок превышающую износостойкость композита на основе стали 45. Важно отметить при этом, что какой-либо корреляции с микротвердостью поверхности не наблюдается (ср. табл. 3 и рис. 4). Одной из причин столь значительного влияния природы обрабатываемой стали могли быть более высокие значения шероховатости (R_z). Но более высокая шероховатость поверхности, получаемая после обработки СтЗ, не может объяснить столь резкого роста износостойкости (ср. рис. 3 и 4).

Принципиально важно подчеркнуть, что отнюдь не природа материала ОЭ влияет на износостойкость, а материал подложки, как это следует из результатов, приведенных на рис. 4 применительно к ЭИЛ сталей 45 и 65Г. И очевидная причина этого, конечно, заключается в том, что собственно поверхностный композит на 70% состоит из обрабатываемой стали, модифицированной в результате электро-разрядной обработки. Тот факт, что износостойкость получаемых поверхностей определяется в первую очередь составом стали, а не ОЭ, показывает, что по крайней мере с точки зрения повышения износостойкости получаемых композитов в качестве ОЭ можно использовать просто обычную сталь (например, сталь 45). Необходимо отметить, что высокая износостойкость обеспечивается прежде всего наличием карбидов в ОЭ и стали, а также возможностью их синтеза в процессе обработки [1, 21–24].

Неоднородность состава обрабатываемого материала (подложки), неоднородность получаемых композитов приводит к разбросу измеренных значений износостойкости. В максимальной степени это касается подложки из СтЗ. Наиболее высокая износостойкость при обработке стали 45 объясняется высоким содержанием карбидов как в самом обрабатываемом материале, так и в обрабатывающем электроде. Достаточно высокое содержание карбидов в стали 65Г, очевидно, служит причиной высокой износостойкости композитов, полученных при обработке этой стали, меньшей, чем на стали 45, но достаточно высокой (рис. 4). Одновременно можно утверждать, что для повышения износостойкости можно использовать обрабатывающий электрод из стали 45. Как видно, изменяя состав обрабатываемого материала, можно изменять износостойкость поверхностного слоя на порядок величины и более.

Полученные результаты свидетельствуют о широких возможностях управления свойствами

композитов не только подбором обрабатывающих электродов и определенных энергий разряда, но и материала обрабатываемой поверхности. Важно также подчеркнуть, что, учитывая ряд ранее проведенных исследований [6–15, 19], это путь получения наноструктурированных поверхностных композитов.

ВЫВОДЫ

Детальное исследование свойств поверхностных композитов, образованных в результате электроискрового модифицирования поверхностей различных сталей (СтЗ, 45 и 65Г) обрабатываемыми электродами из твердых сплавов Т15К6, ВК8, а также сталей СтЗ и 45 (в варианте «сталь по стали»), показало, что:

- получаемые композитные поверхностные слои представляют собой смесь материала ОЭ и подложки, в котором материал подложки составляет до ~70% (масс.), ~20–25 % (масс.) карбиды W и Ti, а содержание Co превышает 50% (достигает ~90 %) от его содержания в ОЭ;

- коэффициенты массопереноса определяются: энергией разряда E (рост при увеличении E), материалом обрабатываемой поверхности (минимальные значения наблюдаются для стали 45), превышение значений E , при которых достигаются значения $K \sim 1$, приводит к снижению K ;

- от величины K зависят шероховатость и микротвердость поверхностных композитов, что обусловлено теплофизическими свойствами как ОЭ, так и обрабатываемых поверхностей сталей;

- износостойкость получаемых покрытий определяется в основном природой обрабатываемой стали (максимальная для стали 45 и в зависимости от природы стали может изменяться на порядок и более величины) и лишь в малой степени микротвердостью и шероховатостью получаемых поверхностей. Этот вывод справедлив в рамках настоящей работы и должен быть подтвержден дополнительными исследованиями.

Обнаруженные эффекты влияния природы обрабатываемого материала на свойства композитов, образующихся при ЭИЛ, открывают возможности получения изделий с поверхностными слоями из композитов с прогнозируемыми свойствами, в том числе наноструктурированных.

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 европейского проекта H2020 «Smartelectrodes» (№ 778537), бюджетного финансирования Приднестровского госуниверситета им. Т.Г. Шевченко и Технического университета Молдовы (Республика Молдова).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кроитору, Д.М., Силкин, С.А., Казак, Н. и др., Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокompозитов, полученных электроискровым легированием, *ЭОМ*, 2020, т. 56, № 6, с. 12.
2. Лазаренко, Б.Р., Лазаренко, Н.И., *Электроискровой способ изменения свойств исходных поверхностей*, М.: Изд. АН СССР, 1958, 177 с.
3. Лазаренко, Н.И., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*, М.: Машиностроение, 1976, 46 с.
4. Гитлевич, А.Е., Михайлов, В.В., Парканский, Н.Я., Ревуцкий, В.М., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*, Кишинев: Штиинца, 1985, 196 с.
5. 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.
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. Dikumar, A.I., Obtaining nanowires under conditions of electrodischarge treatment, In: *Nanowires: Implementations and Application*, Ed. Abbas Hashim, Croatia, 2011, vol. 47, p. 217.
8. Nicolenco, S.V., Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2001, vol. 47, no. 4, p. 217.
9. Левашов, Е.А., Кудряшов, А.Е., Потапов, Н.Т., Новые СВС-материалы для электроискрового легирования с использованием ультрадисперсных порошков, *Изв. ВУЗов, Цветная металлургия*, 2000, № 6, с. 67.
10. Левашов, Е.А., Минаева, Е.С., Сематуллин, Б.Р. и др., Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплавов TiC-40% КН70Ю, полученных методом СВС, *Физика металлов и металлургия*, 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 горячей прокатки. Ч. 2. Структура и свойства сформированных покрытий, *ЭОМ*, 2019, т. 55, № 2, с. 10.
12. Topala, P., Ojegov, A. and Ursaki, V., Nanostructures obtained using electric discharges at atmospheric pressure, In: *Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications*. Tiginyanu I., Topala P., Ursaki V. (Eds), Cham: Springer, 2016, p. 43.
13. Zamulaeva, E.I., Levashov, E.A., Kudryashov, P.V., et al., Electrospark coatings deposited onto an armco iron substrate with nano- and microstructured WC-Co electrodes: deposition process, structure and properties, *Surf. Coat. Technol.*, 2008, vol. 202, p. 3715.
14. Kuptsov, K.A., Sheveyko, A.N., Zamulaeva, E.I., et al., Two-layer nanocomposite WC/a-C coatings produced by a combination of pulsed arc evaporation and electro-spark deposition in vacuum, *Materials and Design*, 2019, vol. 167, p. 107645.
15. Parkansky, N., Beilis, I., Rapoport, L., et al., Electrode erosion and coating properties in pulsed air arc deposition of WC-based hard alloys, *Surf. Coat. Technol.*, 1998, vol. 105, p. 130.
16. 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 металлургия*, 2007, т. 104, № 6, с. 650.
17. Панин, В.Е., Сергеев, В.П., Панин, А.В., *Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурированных покрытий*, Томск: Изд. ТПИ, 2010, 254 с.
18. Gleiter, H., Nanostructured materials: basic concepts and microstructure, *Acta Mater.*, 2000, vol. 48, no. 1, p. 1.
19. Yurchenko, V.I., Yurchenko, E.V. and Dikumar, A.I., Thick-layer nanostructured electrospark coatings of aluminum and its alloys, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 6, p. 656.
20. Pawlak, W., Kubiak, K.J., Wender, B.G. and Matina, T.G., Wear resistant multilayer nanocomposite WC_{1-x}/C coating on Ti-6Al-4V titanium alloy, *Tribol. Int.*, 2015, vol. 82, p. 400.
21. Tarel'nik, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Yu.G., et al. Electrospark graphite alloying of steel surfaces: technology, properties and applications, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 2, p. 147.
22. 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.
23. Михайлюк, А.И., Ревенко, В.Г., Натаров, Н.Н., Повышение износо- и коррозионной стойкости методом электроискрового легирования, *Физ. химия обр. матер.*, 1993, № 1, с. 101.
24. 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.

Summary

Basing on the study of the elemental composition of surface composites obtained on 45, 65G, and St3 steels by electrospark alloying using processing electrode from T15K6, VK8 hard alloys, as well as 45 and St3 steels (the “steel on steel” option), it was shown that the resulting surface layers are ~70% composed of the material steel substrate modified by electro-discharge

treatment. The influence of the steel composition on the coefficients of the processing electrode material transfer on the substrate, on the roughness, microhardness, and wear resistance of the resulting surfaces has been studied. It is shown that the wear resistance of the resulting composites is determined mainly by the nature of the treated surface and, to a much lesser extent, by the processing electrode material, roughness, and microhardness of the surface.

Keywords: electrospark alloying, steel, hard alloy, composite materials, surface, wear resistance