

Трибологические характеристики и коррозионная стойкость покрытий, полученных методами электроискрового легирования, импульсного катодно-дугового испарения и гибридной технологии с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr–Dy₂O₃

© 2020 г. А.Д. Сытченко, А.Н. Шевейко, Е.А. Левашов, Ф.В. Кирюханцев-Корнеев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Статья поступила в редакцию 12.12.19 г., доработана 17.01.20 г., подписана в печать 21.01.20 г.

С помощью методов электроискрового легирования (ЭИЛ), импульсного дугового испарения (ИДИ) и гибридной технологии ЭИЛ–ИДИ с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr–Dy₂O₃, полученных методом порошковой металлургии, были нанесены одно- и двухслойные покрытия на подложки из стали 40X. Структура, элементный и фазовый составы электродов и покрытий исследовались с помощью растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и рентгенофазового анализа. Трибологические свойства покрытий определялись в результате испытаний по схеме «стержень–диск» в контакте с контртелом Al₂O₃ при нагрузках 1, 5 и 10 Н. Температура во время испытаний составляла 20 °С. Потенциал и плотность тока коррозии оценивались с помощью трехэлектродной ячейки с потенциостатом VoltaLab 50. Результаты показали, что электроды состоят из зерен TiC размером 12 мкм, твердого раствора Ni в Cr и, в случае легированного электрода, – частиц Dy₂O₃ размером до 5 мкм. ЭИЛ-покрытия имели малodefектную мелкозернистую структуру, состоящую также из областей твердого раствора Ni и Cr в Fe и зерен TiC с максимальным размером 0,3 мкм. Покрытия с добавкой Dy₂O₃ обладали меньшим коэффициентом трения при нагрузках 1, 5 и 10 Н. Все покрытия при испытаниях в 1N растворе H₂SO₄ находились в устойчивом пассивном состоянии и обладали высокой коррозионной стойкостью: плотность тока коррозии покрытий минимум в 4 раза была меньше значений, полученных для подложки из стали 40X.

Ключевые слова: TiC, NiCr, Dy₂O₃, электроискровое легирование, импульсное катодно-дуговое испарение, покрытия, коэффициент трения, плотность тока коррозии.

Сытченко А.Д. – инженер Научно-учебного центра (НУЦ) СВС МИСиС–ИСМАН (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: alina-sytchenko@yandex.ru.

Шевейко А.Н. – науч. сотрудник НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. E-mail: sheveyko@mail.ru.

Левашов Е.А. – докт. техн. наук, акад. РАЕН, проф., директор НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН, зав. кафедрой порошковой металлургии и функциональных покрытий (ПМиФП) НИТУ «МИСиС». E-mail: levashov@shs.misis.ru.

Кирюханцев-Корнеев Ф.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры ПМиФП, вед. науч. сотрудник НУЦ СВС МИСиС–ИСМАН. E-mail: kiruhancev-korneev@yandex.ru.

Для цитирования: Сытченко А.Д., Шевейко А.Н., Левашов Е.А., Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Трибологические характеристики и коррозионная стойкость покрытий, полученных методами электроискрового легирования, импульсного катодно-дугового испарения и гибридной технологии с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr–Dy₂O₃. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 2. С. 73–79. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79.

Sytchenko A.D., Sheveyko A.N., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V.

Tribological characteristics and corrosion resistance of coatings obtained by electrospark alloying, pulsed cathodic arc evaporation and hybrid technology using TiCNiCr and TiCNiCr–Dy₂O₃ electrodes

Single- and two-layer coatings were deposited on 5140 steel substrates by electrospark alloying (ESA) and a combination of ESA technology and pulsed cathodic arc evaporation (PCAE) using TiCNiCr and TiCNiCr–Dy₂O₃ electrodes obtained by powder metallurgy. The structure, elemental and phase composition of electrodes and coatings were studied using scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, and X-ray phase analysis. Tribological properties of coatings were determined as a result of tests according

to the «pin-on-disk» scheme in contact with the Al_2O_3 counterbody at loads of 1, 5, and 10 N. The temperature during the tests was 20 °C. The potential and density of corrosion current were determined using a three-electrode cell with a VoltaLab 50 potentiostat. The results showed that electrodes consist of 12 μm TiC grains, a solid solution of Ni in Cr, and Dy_2O_3 up to 5 μm in size in case of a doped electrode. ESA coatings had a low-defect fine-grained structure consisting of regions of a solid solution of Ni and Cr in Fe and TiC grains with a maximum size of 0.3 μm . Coatings with the addition of Dy_2O_3 had a lower friction coefficient at loads of 1, 5, and 10 N. All coatings during the tests in the H_2SO_4 1N solution were in a stable passive state and featured high corrosion resistance: corrosion current density of the coatings was at least 4 times lower than the values obtained for the 5140 steel substrate.

Keywords: TiC, NiCr, Dy_2O_3 , electro-spark alloying, pulsed cathodic arc evaporation, coatings, friction coefficient, corrosion current density.

Sytchenko A.D. – Engineer, Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN (119049, Russia, Leninskii pr., 4).
E-mail: alina-sytchenko@yandex.ru.

Sheveyko A.N. – Researcher, Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN. E-mail: sheveyko@mail.ru.

Levashov E.A. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Acad. of Russian Academy of Natural Science, Head of Scientific-Educational Centre of SHS of MISIS–ISMAN, Head of the Department of powder metallurgy and functional coatings (PM&FC), NUST «MISIS». E-mail: levashov@shs.misis.ru.

Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. – Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of PM&FC; Leading researcher of Scientific-Educational of Centre SHS MISIS–ISMAN. E-mail: kiruhancev-korneev@yandex.ru.

Citation: Sytchenko A.D., Sheveyko A.N., Levashov E.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. Tribological characteristics and corrosion resistance of coatings obtained by electrospark alloying, pulsed cathodic arc evaporation and hybrid technology using TiCNiCr and TiCNiCr– Dy_2O_3 electrodes. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 2. P. 73–79 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-73-79.

Введение

В области создания защитных покрытий, повышающих износо-, жаро- и коррозионную стойкость изделий, перспективным направлением является разработка безвольфрамовых твердых сплавов на основе TiC [1, 2]. Они состоят из твердой фазы TiC, окруженной металлическим связующим (Ni). В таких материалах карбидные зерна обеспечивают высокие механические свойства, а никелевая матрица улучшает прочностные характеристики и коррозионную стойкость [3–5]. Дополнительное введение хрома в композиционный материал повышает механические и трибологические характеристики, а также жаростойкость покрытий [6]. Введение 1–2 % боридов в состав электродов TiC–Ni улучшает физико-химические показатели легированного слоя, снижает шероховатость и повышает его износостойкость [7].

Важно отметить, что добавки керамических наночастиц в состав электродных материалов приводят к модификации их структуры, повышают твердость (на 20 %) и трещиностойкость (на 40 %) [8], что важно для увеличения срока службы электродов. Легирование покрытий на основе TiC редкоземельными металлами и их оксидами позволяет модифицировать структуру, снизить коэффициент трения и повысить механические свойства покрытий [9, 10].

Ранее нами было показано, что введение Eu_2O_3 в состав электродов TiCNiCr позволяет повысить их прочностные характеристики [11], скорость роста покрытий [12], а также механические и трибологические свойства покрытий [13]. В настоящей работе были увеличены (в 4 раза) концентрации хрома и никеля по сравнению с предыдущими исследованиями. Перспективным для нанесения покрытий является метод импульсного катодно-дугового испарения [12] с использованием данных электродов, впервые предложенный в работе [14].

Оксид диспрозия находит широкое применение в качестве оптических слоев [15, 16], а также антикоррозионных покрытий [17]. Известны случаи положительного влияния Dy_2O_3 на трибологические свойства покрытий. Авторы [18] объясняют это тем, что частицы Dy_2O_3 в зоне трибоконтакта служат твердым смазочным материалом, который способствует снижению коэффициента трения и увеличению износостойкости покрытий.

Целью настоящей работы являлось получение покрытий с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr– Dy_2O_3 по технологии электроискрового легирования (ЭИЛ), а также исследование влияния осаждения верхнего слоя методом импульсного дугового испарения (ИДИ) на структуру и свойства электроискровых покрытий.

Материалы и методы исследований

В качестве исходных компонентов для изготовления электродов использовались порошки, состав которых приведен в табл. 1.

Порошки смешивали в планетарной центробежной мельнице Активатор-2S в атмосфере аргона в течение 5 мин и прессовали на гидравлическом прессе при давлении 200 МПа. Полученные брикеты размером 5×5×42 мм и 10×10×75 мм спекали в засыпке из Al₂O₃ в вакуумной печи ВЭ-3-16 (ООО «НПП ВакЭТО», Россия) при температуре 1450 °С в течение 60 мин. В качестве подложек использовали полированные стальные диски марки 40X (аналог стали 5140) размером Ø 30×5 мм. Перед нанесением покрытия подложки подвергали ультразвуковой очистке в C₃H₈O в течение 5 мин на установке УЗДН-2Т.

Покрывают наносили с помощью установки на базе откачивающей системы УВН-2М (Россия), состоящей из трехпозиционного модуля ЭИЛ, который приспособлен к работе в вакууме и различных газовых средах, и блока ИДИ. Процесс легирования проводили в среде Ar (99,9995%) в режиме обратной полярности (электрод—катод) при следующих параметрах обработки: напряжение — 100 В, частота следования импульсов — 100 Гц, давление — 30 Па, длительность импульса — 50 мкс, количество проходов — 10.

При осуществлении процесса ИДИ давление рабочего газа (Ar) составляло 0,5 Па, остаточное давление — 2·10⁻² Па, напряжение разряда колебалось в диапазоне от 160 до 200 В, напряжение и частота поджига — 15 кВ и 10 Гц соответственно. Перед нанесением покрытий подложки проходили очистку путем подачи на них отрицательного напряжения смещения (2 кВ) в среде аргона в течение 5 мин.

Морфологию, элементный и фазовый составы электродов и покрытий определяли с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на микроскопе Hitachi S-3400N (Япония) с приставкой

Noran 7 Thermo и рентгенофазового анализа (РФА) на приборе AXS D8 ADVANCE («Bruker», Германия) с использованием CuK_α-излучения.

Трибологические испытания по определению коэффициента трения проводили на высокотемпературном трибометре CSM Instruments (Швейцария) по схеме «стержень—диск» с помощью шарика из Al₂O₃ диаметром 6 мм при нагрузке 1 Н (для ЭИЛ- и ИДИ-образцов), 5 и 10 Н (для ЭИЛ-образцов). Для определения шероховатости и исследования дорожек износа покрытий использовали оптический профилометр WYKO NT 110.

Электрохимические свойства покрытий оценивали с помощью трехэлектродной ячейки с потенциостатом VoltaLab 50 («Radiometer Analytical», Франция). Испытания проводили в растворе 1N H₂SO₄ с использованием эталонного Ag/AgCl-электрода и вспомогательного Pt-электрода. Все потенциалы были пересчитаны относительно стандартного водородного электрода. Плотность тока коррозии была рассчитана с использованием формулы Тафеля.

Результаты и их обсуждение

Структура и состав электродов и покрытий

Полученные методом РЭМ снимки электродов TiCNiCr и TiCNiCr—Dy₂O₃ показаны на рис. 1. Видно, что они состоят из зерен TiC (темные участки на микрофотографиях), твердого раствора Ni в Cr (серые участки) и Dy₂O₃ (белые области) в случае легированного электрода. Размеры зерен карбида титана для электродов достигали 12 мкм, а частиц Dy₂O₃ — около 5 мкм.

Микроструктура электроискровых покрытий, полученных с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr—Dy₂O₃, показана на рис. 2. Видно, что она типична для ЭИЛ-покрытий и имеет небольшое количество дефектов (поры и конденсированные брызги расплавленного материала). Покрытия обладают идентичным рельефом.

Образцы, полученные с помощью электрода TiCNiCr, имеют следующий состав, ат. %: 16,0 Ti, 34,0 С, 8,0 Cr, 4,6 Ni и 37,4 Fe. В случае использования допированного электрода покрытие содержит, ат. %: 17,9 Ti, 25,9 С, 8,3 Cr, 3,1 Ni, 29,4 Fe, 13,0 О и 2,4 Dy. Оксид диспрозия распределен по границам капель на поверхности покрытия, что можно объяснить меньшей плотностью Dy₂O₃ по сравнению с другими элементами покрытия. В нашей предыдущей работе [13] было показано, что Eu₂O₃

Таблица 1

Состав порошков для изготовления электродов

Электрод	Содержание, ат. %			
	TiC	Ni	Cr	Dy ₂ O ₃
TiCNiCr	50	16,7	33,3	—
TiCNiCr—Dy ₂ O ₃	50	16,3	32,7	1,0

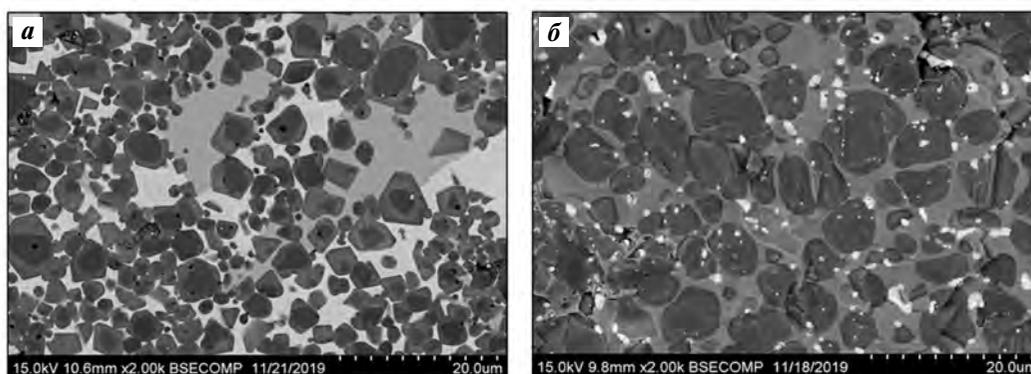


Рис. 1. Структура электродов TiCNiCr (а) и TiCNiCr–Dy₂O₃ (б)

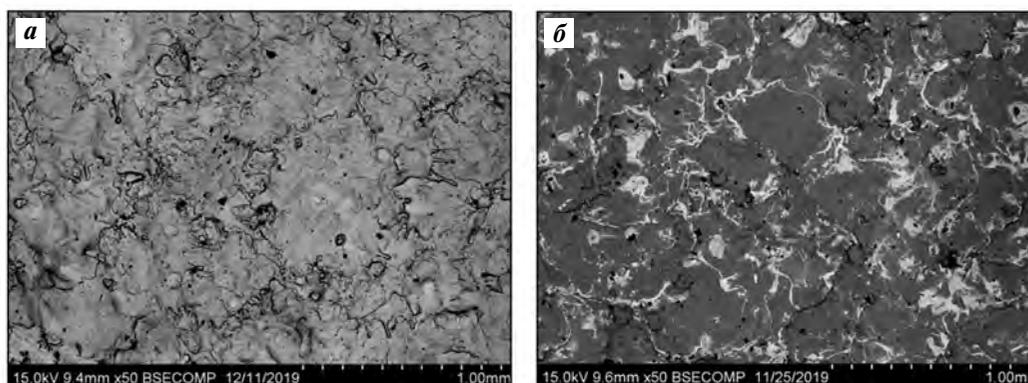


Рис. 2. СЭМ-изображения микроструктуры поверхности электрохромных покрытий, полученных электродами TiCNiCr (а) и TiCNiCr–Dy₂O₃ (б)

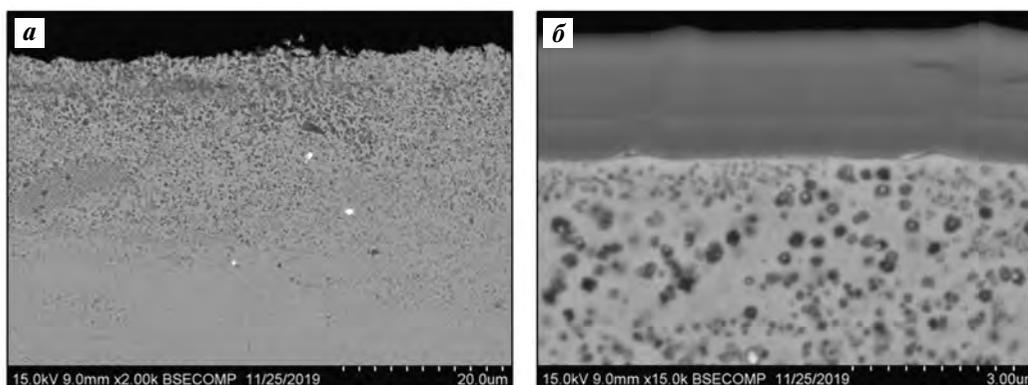


Рис. 3. СЭМ-изображения поперечных шлифов покрытий, полученных методом ЭИЛ (а) и ЭИЛ–ИДИ (б) с применением электрода TiCNiCr–Dy₂O₃

находится по большей части на границе подложка—покрытие. Такую разницу в распределении фаз можно объяснить более высоким количеством металлических компонентов (Ni и Cr) в составе электрода TiCNiCr–Dy₂O₃, при плавлении которого материал переносится через жидкую фазу. В случае использования электрода с добавкой Eu₂O₃ и с меньшей концентрацией Ni и Cr частицы переносятся через твердую фазу.

Из рис. 3 видно, что покрытия имеют мелкозернистую структуру: минимальный размер зерен TiC составлял около 30 нм, максимальный — 3 мкм, а оксида диспрозия — порядка 1 мкм. Анализ поперечных шлифов показал, что ЭИЛ-покрытия состоят из темных зерен карбида титана, серых участков, соответствующих твердому раствору Ni и Cr в Fe, и белых зерен Dy₂O₃ (в случае допированного покрытия). Размер прослоек находился в

диапазоне от 40 нм до 2,5 мкм. Толщина покрытий TiCNiCr—Dy₂O₃ составляла около 30 мкм. Покрытие, полученное методом ИДИ, имело равномерную структуру без выраженных столбчатых элементов. Состав верхнего слоя, определенный методом ЭДС, следующий, ат. %: 34,9 Ti, 9,0 C, 22,5 Cr, 18,2 Ni, 8,1 O и 5,9 Dy, а его толщина составляла 2,2 мкм.

Результаты РФА (рис. 4) подтверждают данные ЭДС для покрытий, полученных с помощью базового электрода и электрода с добавкой Dy₂O₃. Пики, соответствующие плоскостям (110), (220) и (310), принадлежат фазе α -Fe. Для обоих образцов наблюдаются пики, связанные с отражениями от плоскостей (111), (200), (220), (311), (222) и (400) ГЦК-фазы на основе карбида титана. Также в покрытиях присутствуют пики твердого раствора никеля и хрома в железе — Fe (NiCr). На рентгенограммах покрытий, полученных с помощью допированного электрода, выявляются пики, связанные с отражением от плоскостей (321), (400), (411) и (444) Dy₂O₃.

Размер кристаллитов карбида титана, определенный из уширения линий (111) и (200), для всех покрытий не отличался и составлял 22 и 18 нм соответственно. Размер кристаллитов Dy₂O₃ находился в интервале от 6 до 30 нм.

Для покрытия, полученного ИДИ, были найдены пики ГЦК-фазы на основе TiC, связанные с отражениями от плоскостей (111) и (200). Размер кристаллитов карбида титана был порядка 2 нм.

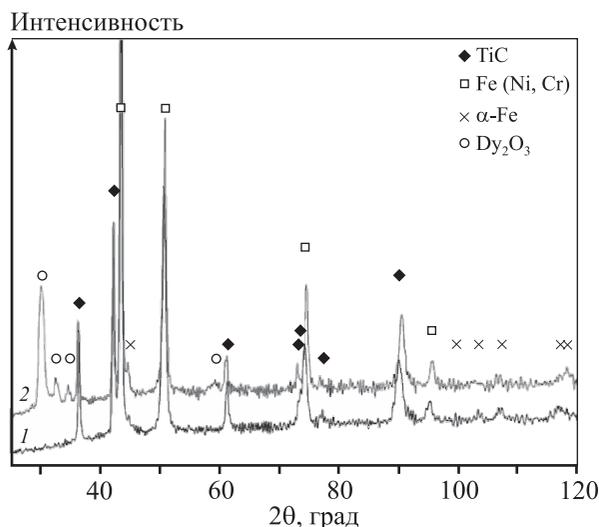


Рис. 4. Результаты РФА покрытий, полученных с помощью электродов TiCNiCr (1) и TiCNiCr—Dy₂O₃ (2)

Трибологические свойства покрытий

Согласно результатам трибологических испытаний, приведенным на рис. 5 и 6, коэффициент трения (f) ЭИЛ-покрытия, полученного с использованием электрода TiCNiCr, при нагрузке $P = 1$ Н был стабилен на протяжении дистанции $l = 0 \div 150$ м и составил 0,18. На дистанции 150—200 м среднее значение f составило 0,25. Образец электроискрового покрытия с добавкой Dy₂O₃ обладал меньшим коэффициентом трения (0,11), чем недопированное покрытие, при $P = 1$ Н.

В случае нагрузки 5 Н величина f базового покрытия в интервале от 0 до 100 м плавно возрастала с 0,13 до 0,27, после чего резко повышалась до 0,66. У образца с Dy₂O₃ коэффициент трения плавно увеличивался от 0,11 до 0,3 на протяжении дистанции 0—150 м, а за следующие 50 м он вырос до 0,6.

При $P = 10$ Н показатель f недопированного покрытия за первые 30 м изменился от 0,12 до 0,75, износ покрытия наблюдался после 30 м испытания ($f = 0,7 \div 0,8$). При проведении исследований покрытия, полученного с помощью электрода TiCNiCr—Dy₂O₃, величина f при нагрузке 10 Н стремительно возрастала от 0,13 до 0,73 на дистанции 0—60 м, а затем, в результате действия продуктов износа, снизилась и на протяжении оставшейся дистанции находилась в пределах 0,64—0,67. Выход на повышенный коэффициент трения при нагрузках 5 и 10 Н для электроискровых покрытий с добавкой Dy₂O₃ происходит позже (на расстоянии 50 и 30 м)

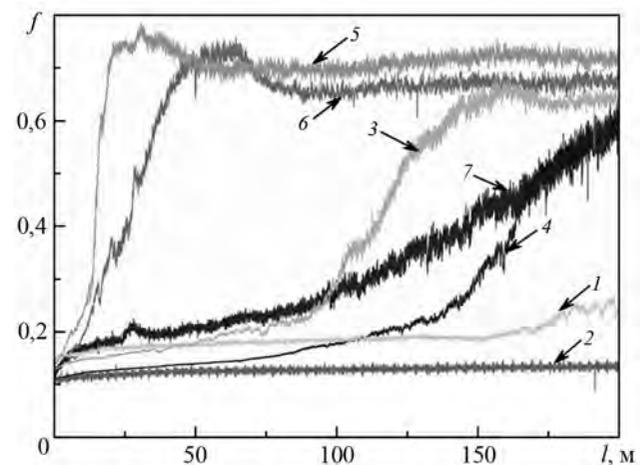


Рис. 5. График зависимости коэффициента трения от дистанции покрытий TiCNiCr при нагрузках 1 Н (1), 5 Н (3) и 10 Н (5), TiCNiCr—Dy₂O₃ при 1 Н (2), 5 Н (4) и 10 Н (6) и ЭИЛ—ИДИ-покрытия при 1 Н (7)

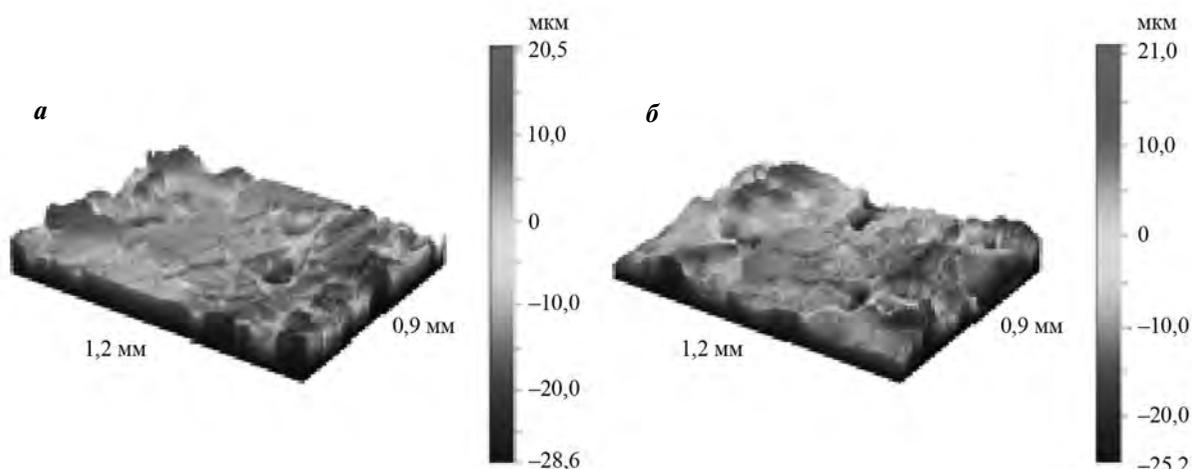


Рис. 6. Дорожки износа базового покрытия (а) и покрытия с добавкой Dy₂O₃ (б) при нагрузке 10 Н

по сравнению с базовым покрытием, что свидетельствует об их более высокой износостойкости за счет использования допированного электрода. Для многослойного покрытия с добавкой Dy₂O₃ при $P = 1$ Н наблюдался низкий (на уровне 0,14) показатель трения до 80 м, однако по достижении дистанции 200 м он вырос до 0,6.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что однослойное ЭИЛ-покрытие имеет низкий коэффициент трения при нагрузках 1 Н, в то время как верхний слой увеличивает его в 1,5 раза. У многослойного покрытия наблюдается более плавный рост f в результате удаления продуктов износа из зоны контакта. Износ покрытий не удалось определить из-за высокой шероховатости поверхности ($R_a = 6,0 \div 7,2$ мкм).

Коррозионная стойкость покрытий

Поляризационные кривые в полулогарифмических координатах для подложки, образца сравнения (нержавеющая сталь X18H10T), однослойных и многослойных покрытий представлены на рис. 7. Видно, что при потенциалах положительнее 1,75 В для всех образцов наблюдался пробой пассивной пленки. Отметим, что потенциал коррозии всех покрытий, нанесенных на стальную подложку, соответствует свободному потенциалу коррозии железа (-190 В). Это связано с тем, что электролит через трещины и дефекты покрытия доходит до подложки, и происходит обильное растворение ее компонентов. Покрытия, полученные методом ЭИЛ с помощью электродов TiCNiCr и TiCNiCr–Dy₂O₃, имели близкие значения плотности тока коррозии $I_{кор} = 0,20$ и $0,19$ мА/см² соответственно (табл. 2). Все покры-

тия в 1Н растворе H₂SO₄ находились в устойчивом пассивном состоянии.

Плотности тока коррозии однослойных покрытий в 5,5 раза ниже значений, полученных для подложки (1,1 мА/см²). Осаждение верхнего

Таблица 2
Потенциал и плотность тока коррозии сплавов и покрытий в 1N H₂SO₄

Образец	$E_{кор}$, МВ	$I_{кор}$, мА/см ²
Сталь 40Х (подложка)	-235	1,1
Сталь X18H10T	+470	0,001
TiCNiCr (ЭИЛ)	-168	0,20
TiCNiCr–Dy ₂ O ₃ (ЭИЛ)	-178	0,19
TiCNiCr (ЭИЛ–ИДИ)	-195	0,26

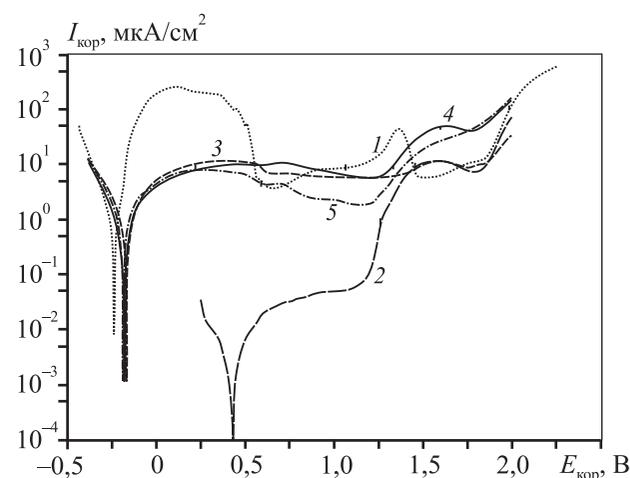


Рис. 7. Поляризационные кривые для подложки 40Х (1), стали X18H10T (2), ЭИЛ-покрытий, осажденных с помощью электродов TiCNiCr (3) и TiCNiCr–Dy₂O₃ (4) и многослойного покрытия (5)

дугового слоя TiCNiCr привело к повышению величины $I_{кор}$ на 30 %. У многослойных покрытий $I_{кор} = 0,26$ мА/см², что в 4 раза ниже, чем у подложки. Потенциал коррозии после осаждения однослойных и многослойных покрытий становился более положительным и приближался к значению $E_{кор}$ нержавеющей стали X18H10T.

Заключение

Методом ЭИЛ и комбинированной технологией ЭИЛ—ИДИ с использованием электродов TiCNiCr и TiCNiCr—Dy₂O₃ были получены покрытия на стальной (марки 40X) подложке. Они содержали фазу TiC, прослойку из твердого раствора Ni и Cr в Fe, а также Dy₂O₃ (электрод TiCNiCr—Dy₂O₃). Введение оксида диспрозия привело к снижению коэффициента трения минимум на 30 % и не оказало заметного влияния на коррозионную стойкость.

Установлено, что осаждение одно- и многослойных покрытий способствует снижению плотности тока коррозии подложки как минимум в 4 раза. Полученные покрытия могут использоваться для повышения трибологических характеристик и коррозионной стойкости ответственных деталей машин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект No 15-19-00203-П).

Авторы признательны Н.В. Швындиной (НИТУ «МИСиС») за помощь в проведении структурных исследований покрытий.

Литература/References

1. Wang X., He X., Guo H. Influence of Mo on the microstructure and mechanical properties of TiC-based cermets. *Rare Met.* 2010. Vol. 29. P. 346—350.
2. Levinskii Yu.V., Petrov A.P. Tungsten-free hard alloys based on titanium carbide. *Inorg. Mater.* 2000. Vol. 36. P. 24—27.
3. Rajabi A., Ghazali M.J., Syarif J., Daud A.R. Development and application of tool wear: A review of the characterization of TiC-based cermets with different binders. *Chem. Eng. J.* 2014. Vol. 255. P. 445—452.
4. Liu Z., Tian J., Li B., Zhao L. Microstructure and mechanical behaviors of in situ TiC particulates reinforced Ni matrix composite. *Mater. Sci. Eng. A.* 2010. Vol. 527. P. 3898—3903.
5. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sheveyko A.N., Shvindina N.V., Levashov E.A., Shtansky D.V. Comparative study of Ti—C—Ni—Al, Ti—C—Ni—Fe, and Ti—C—Ni—Al/Ti—C—Ni—Fe coatings produced by magnetron sputtering, electro-spark deposition, and a combined two-step process. *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44. P. 7637—7646.
6. Andreev A.V., Litovchenko I.Y., Korotaev A.D., Borisov D.P. Thermal stability of Ti—C—Ni—Cr and Ti—C—Ni—Cr—Al—Si nanocomposite coatings. *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. Vol. 652. No. 012057.
7. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D., Syui N.A., Kuz'michev E.N. Influence of electrospark discharge parameters on roughness and microabrasive wear of steel 45 surface after ESA by TiC-based electrodes. *Surf. Eng. Appl. Electr.* 2016. Vol. 52. P. 342—349.
8. Levashov E.A., Malochkin O.V., Kudryashov A.E., Gammel F., Suchentrunk R. Effects of nanocrystalline powders additions on the characteristics of combustion process, phase and structure-formation, and properties of SHS alloys on titanium carbide base. *J. Mater. Synth. Process.* 2002. Vol. 10. P. 231—236.
9. Quazi M.M., Fazal M.A., Hasee A.S.M.A., Yusof F., Masjuki H.H., Arslan A. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review. *J. Rare Earths.* 2016. Vol. 34. P. 549—564.
10. Zhu R., Li Z., Li X., Sun Q. Microstructure and properties of the low-power-laser clad coatings on magnesium alloy with different amount of rare earth addition. *Appl. Surf. Sci.* 2015. Vol. 353. P. 405—413.
11. Kiryukhantsev-Korneev F.V., Sytchenko A.D., Kudryashov A.E., Levashov E.A. Protective coatings produced by electro-spark deposition with TiCNiCr—(Eu₂O₃) electrodes. *CIS Iron Steel Rev.* 2018. Vol. 16. P. 57—62.
12. Kiryukhantsev-Korneev Ph., Sytchenko A., Sheveyko A., Vorotilo S. Deposited by pulsed cathodic arc evaporation in Ar, N₂, and C₂H₄ environments using the TiC—NiCr—Eu₂O₃ cathode. *Coatings.* 2019. Vol. 9. P. 230—243.
13. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Сытченко А.Д., Левашов Е.А. Сравнительное исследование электроискровых покрытий, полученных с использованием электродов TiC—NiCr и TiC—NiCr—Eu₂O₃. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2019. No. 5. С. 67—78.
14. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sytchenko A.D., Levashov E.A. Comparative study of electrospark alloying coatings formed using TiC—NiCr and TiC—NiCr—Eu₂O₃ electrodes. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2019. Vol. 60. No. 6. P. 662—672.
15. Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sheveyko A.N., Kuptsov K.A., Novikov A.V., Shtansky D.V. Ti—Cr—B—N coatings prepared by pulsed cathodic-arc evaporation of ceramic TiCrB target produced by SHS. *Prot. Met. Phys. Chem. of Surf.* 2013. Vol. 49. P. 677—681.
16. Dong X., Cheng X.L., Zhang X.F., Sui L.L., Xu Y.M., Gao S. A novel coral-shaped Dy₂O₃ gas sensor for high sensitivity NH₃ detection at room temperature. *Sens Actuators. B.* 2018. Vol. 255. P. 1308—1315.
17. Wei C.C. Transparent ceramics for lighting. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 29. P. 237—244.
18. Ramay S.M., Saleem M. Magnetron sputtered Dy₂O₃ with chromium and copper contents for antireflective thin films with enhanced absorption. *J. Rare Earths.* 2019. Vol. 37. P. 989—994.
19. Liu X., Huang W. Preparation and tribological performance of electrodeposited Ni—TiB₂—Dy₂O₃ composite coatings. *J. Rare Earths.* 2009. Vol. 27. P. 480—485.