
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.793.79

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ КОМПОЗИТНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

© 2024 г. В. П. Лялякин¹, В. А. Денисов¹, А. А. Евсюков^{1, *}

¹Федеральный научный агроинженерный институт ВИМ, Москва, Россия

*e-mail: zoidbergdec10@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2023 г.

После доработки 16.02.2024 г.

Принята к публикации 19.02.2024 г.

Электроискровая обработка позволяет наносить на поверхности деталей покрытия любыми электропроводящими материалами, обеспечивая хорошую адгезию к основному материалу, тем самым восстанавливая изношенные поверхности. Однако ограничение по толщине наносимого покрытия в значимой мере влияет на ее распространение при восстановлении деталей с износами более 0.2 мм. Одним из путей решения этой проблемы при восстановлении деталей с увеличенными износами является электроискровая обработка с использованием композитных электродов с углеродными нанотрубками. Благодаря использованию композитного электрода с углеродными нанотрубками, удалось увеличить толщину покрытия в 2–4 раза, что позволит расширить номенклатуру восстанавливаемых деталей. При этом микротвердость покрытий при добавлении в электрод углеродных нанотрубок уменьшилась, но при определенных режимах удалось добиться значения микротвердости, сопоставимой с покрытиями из электродов БрО10С10.

Ключевые слова: электроискровая обработка, углеродные нанотрубки (УНТ), микротвердость

DOI: 10.31857/S0235711924030012, **EDN:** RHPPMJ

При работе в парах трения могут наблюдаться такие виды износов, как абразивный, эрозивно-кавитационный, усталостный, коррозионный и фреттинг-коррозионный [1, 2].

Перспективным методом устранения таких износов при восстановлении деталей является электроискровая обработка (ЭИО) [3, 4]. Она позволяет наносить материалы из любого токопроводящего материала, а также формировать рельеф для удержания смазки, что повышает долговечность покрытия.

Одним из недостатков электроискровой обработки является меньшая по сравнению с наплавочными методами износостойкость наносимого покрытия, причинами которой являются: образование дефектных слоев, большие остаточные напряжения и др. [4]. Также недостатком электроискровых покрытий является их малая толщина. Существуют несколько способов увеличения износостойкости электроискровых покрытий: поверхностное пластическое деформирование нанесенных покрытий, нанесение покрытий из твердосплавных материалов [5]. Но некоторые методы позволяют

лишь немного увеличить износостойкость покрытий, а другие требуют дополнительного оборудования. Кроме того, применение твердосплавных материалов не всегда целесообразно, т.к. это может уменьшить долговечность ответной детали. Поэтому актуальной задачей является увеличение износостойкости и толщины покрытия.

Одним из способов увеличения износостойкости и улучшения физико-механических свойств электроискрового покрытия является применение композитных электродов. Перспективными наполнителями для композитов в настоящее время являются углеродные нанотрубки [6]. В настоящее время известно много работ, посвященных изготовлению композитных материалов с применением углеродных нанотрубок, причем как с полимерной [7], так и с металлической матрицей [8–10]. Также покрытия из нанотрубок обладают хорошей коррозионной стойкостью и могут применяться в автомобильной промышленности. Известна гипотеза о самосмазывающихся покрытиях, в которых углеродные нанотрубки могут выполнять роль внутреннего смазочного материала. Тем самым возможно заменить внешнее трение между восстанавливаемыми деталями на внутреннее трение, что увеличит долговечность трибосопряжения. Таким образом, небольшое снижение микротвердости электроискровых покрытий за счет внедрения углеродных нанотрубок может увеличить их износостойкость. В настоящей статье планируется изготовить композитный электрод из бронзы с добавлением углеродных нанотрубок, нанести покрытия полученным электродом и определить их толщину и микротвердость.

Цель исследований. Исследование структуры и свойств электроискровых покрытий, нанесенных композитным электродом с углеродными нанотрубками.

Материалы и методы исследования. В качестве основы для спеченных композитных электродов выбран порошок бронзового сплава BrO10C10 . В композитный материал добавлены одностенные углеродные нанотрубки фирмы OCSiAl. Процентное содержание углеродных нанотрубок в композите составило 0.1% по массе (на основании расчета критической объемной доли волокна в композите). Для улучшения свойств композитного материала порошки бронзы были смешаны в планетарной мельнице 2SL с частотой 30 Гц в течение 20 минут с добавлением 1 мл изопропилового спирта.

Полученная смесь была спечена методом искрового плазменного спекания (ИПС) на установке Spark Plasma Sintering-Labox 650, Sinter Land в среде инертных газов с усилием прессования 50 МПа и температуре 700°C в течение пяти минут.

В результате были получены два образца в виде дисков диаметром 50 мм и толщиной 5 мм. Один из образцов изготовлен с добавлением углеродных нанотрубок, а второй состоял только из бронзы. Образцы были разрезаны на электроды, представляющие собой бруски длиной 50 мм с квадратным поперечным сечением. Сторона квадрата равна 5 мм.

С помощью спеченных электродов изготовлено 24 образца с электроискровыми покрытиями на установке для электроискровой обработки БИГ-5. На 12 образцов (рис. 1) было нанесено покрытие составом BrO10C10 и на 12 образцов нанесено покрытие составом $\text{BrO10C10} + 0.1\% \text{ УНТ}$ (образцы 13–24).

При нанесении покрытий варьировалась энергия импульсов искровых разрядов (значения энергии разрядов: 0.22 Дж, 0.32 Дж, 0.9 Дж), а также при каждом значении энергии искровых разрядов варьировалась частота импульсов с помощью коэффициента энергии (значения коэффициентов энергии: 0.4, 0.6, 0.8, 1.0).

Толщина покрытий измерялась на шлифах. Из изготовленных образцов было сделано 24 шлифа, которые впоследствии были рассмотрены под микроскопом. Также на микроскопе были сделаны фотографии покрытий при увеличении $\times 200$ и измерена толщина покрытия в трех точках для каждого образца. Микротвердость была измерена на твердомере, количество измерений для каждого покрытия – пять. Далее



Рис. 1. Внешний вид спеченного образца из материала BrO10C10 .

значения микротвердости были проверены с помощью коэффициента Стьюдента, и для каждого образца найдена средняя микротвердость. По значениям микротвердости покрытий были построены графики, где независимая переменная – коэффициент энергии, который характеризует частоту следования импульсов, а зависимая переменная – микротвердость по Викерсу.

Результаты и обсуждение. В табл. 1 и 2 приведены толщины полученных покрытий. Прочерком показаны образцы, на которых не удалось получить покрытия.

Таблица 1. Толщина электроискровых покрытий, нанесенных электродом BrO10C10

№	Режим	Коэффициент энергии	Толщина, мкм
1	2	0.4	—
2	2	0.6	—
3	2	0.8	73
4	2	1.0	50
5	3	0.4	—
6	3	0.6	—
7	3	0.8	—
8	3	1.0	40
9	4	0.4	170
10	4	0.6	175
11	4	0.8	170
12	4	1.0	227

Таблица 2. Толщина электроискровых покрытий электродом $\text{BrO}10\text{C}10 + 0.1\% \text{ УНТ}$

№	Режим	Коэффициент энергии	Толщина, мкм
13	2	0.4	—
14	2	0.6	—
15	2	0.8	—
16	2	1.0	—
17	3	0.4	91
18	3	0.6	193
19	3	0.8	362
20	3	1.0	199
21	4	0.4	132
22	4	0.6	192
23	4	0.8	355
24	4	1.0	212

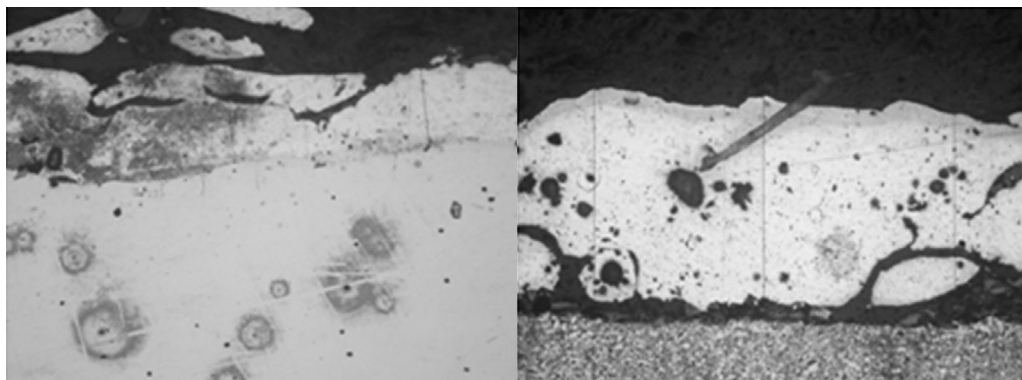
При низких значениях коэффициента энергии толщина покрытий из нелегированного электрода соответствует 1.0–1.28 толщине покрытий из композитного электрода. При повышении коэффициента энергии (до значений 0.8) толщина покрытий из легированных электродов вырастает в 2–4 раза в сравнении с толщиной покрытий из нелегированных электродов. Наиболее оптимальным коэффициентом энергии для каждого значения энергии импульса является 0.8. На рис. 2а, б можно увидеть микроструктуру покрытий при энергии импульса 0.9 Дж и коэффициенте энергии 0.8 при увеличении $\times 200$. При нанесении покрытия электродом $\text{BrO}10\text{C}10 + 0.1\% \text{ УНТ}$ было получено более равномерное покрытие, чем при использовании электрода $\text{BrO}10\text{C}10$.

График микротвердости покрытий показан на рис. 3.

По результатам измерения микротвердости видно, что микротвердость покрытий при добавлении углеродных нанотрубок снижается. При обработке электродом из материала $\text{BrO}10\text{C}10$ микротвердость покрытий снижается с увеличением частоты

(а)

(б)

**Рис. 2.** Микроструктура электроискровых покрытий $\text{BrO}10\text{C}10$ и $\text{BrO}10\text{C}10 + 0.1\% \text{ УНТ}$:

(а) — покрытие из электрода $\text{BrO}10\text{C}10$; (б) — покрытие из электрода $\text{BrO}10\text{C}10 + 0.1\% \text{ УНТ}$.

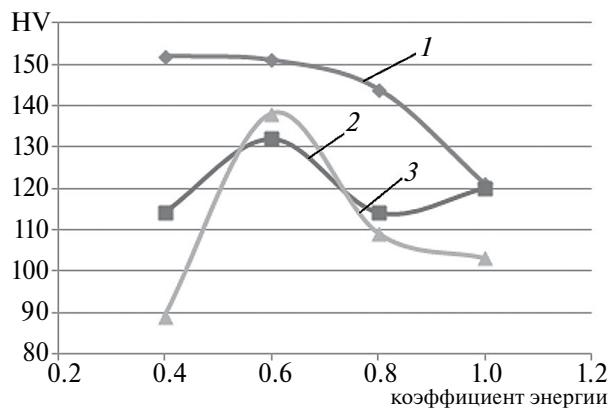


Рис. 3. Микротвердость электроискровых покрытий БрО10С10 и БрО10С10 + 0.1% УНТ:
1 – без УНТ режим 4; 2 – с УНТ режим 3; 3 – с УНТ режим 4.

следования импульсов. Изменения микротвердости покрытий после обработки электродом из БрО10С10 имеют другой характер. Сначала микротвердость увеличивается при увеличении частоты следования импульсов. При достижении частоты импульсов, соответствующей коэффициенту энергии 0.6, микротвердость начинала снижаться. При низких значениях коэффициента энергии может снизиться до 2 раз. Наибольшей микротвердостью обладают покрытия с нанотрубками при режиме 4 и коэффициенте энергии 0.6, что лишь на 12% меньше микротвердости покрытия без нанотрубок при схожем режиме. Данное снижение можно объяснить тем, что при обработке образца в покрытии находились фазы из углерода, которые могли сработать как внутренняя смазка.

Вывод. Анализ толщины покрытий показал, что применение композитных электродов, легированных углеродными нанотрубками, позволяет увеличить толщину покрытия до 2 раз и более. При этом микротвердость покрытий снижалась на 12%, что можно объяснить присутствием углеродных нанотрубок в покрытии.

Финансирование работы. Работа выполнялась в рамках программы исследований лаборатории № 11.2 по теме “Повышение абразивной износостойкости рабочих органов сельхозмашин и перерабатывающего оборудования путем применения методов электроискрового легирования и скоростного ТВЧ-борирования”.

Благодарности. Выражаем благодарность компании OCSiAl за предоставление углеродных нанотрубок.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Денисов – научное руководство, анализ и доработка текста.

В. П. Лялякин – редактирование текста, анализ литературных данных.

А. А. Евсюков – подготовка и анализ литературных данных, подготовка текста, проведение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамасалиева М. И. Виды износосов основных деталей гидроагрегатов и методика их определения // Вестник Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова. 2019. № 3. С. 27.

2. *Казанцев Р. В., Гиннэ С. В.* К вопросу о сущности явления и эффективных методах предотвращения фреттинг-коррозии // Актуальные вопросы современной науки и образования: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 18 декабря 2019 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства “Новая Наука”, 2019. С. 311.
3. *Гвоздев А. А., Иванов В. И., Костюков А. Ю.* О развитии опыта восстановления неподвижных соединений нанесением электроискровых покрытий // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 12. С. 9.
4. *Barile C. et al.* Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review // Coatings. 2022. Т. 12. № 10. С. 1536.
5. *Евсюков А. А., Денисов В. А.* Исследование физико-механических свойств электроискровых покрытий // МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 24–26 мая 2022 года. Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. С. 297.
6. *Krishnan A., Shandilya S., Balasubramanya H. S., Gupta P.* A Review on Applications of Carbon Nanotubes in Automobiles // Int. J. of Mechanical Engineering and Technology. 2020. Т. 11. № 1. Р. 204.
7. *Миронова С. А. и др.* Исследование композитов, модифицированных углеродными нанотрубками, на устойчивость к изгибающим и растягивающим нагрузкам // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения. 2018. С. 27.
8. *Ковтун В. А., Пасовец В. Н., Плескачевский Ю. М.* Физико-механические характеристики порошковых нанонаполненных металлополимерных композитов, сформированных электроконтактным спеканием // Механика. Исследования и инновации. 2016. № 9. С. 54.
9. *Manikandan P., Sieh R., Elayaperumal A., Le H. R., Basu S.* Micro/Nanostructure and tribological characteristics of pressureless sintered carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites // J. of Nanomaterials. 2016. P. 1.
<https://doi.org/10.1155/2016/9843019>
10. *Munir K. S., Kingshott P., Wen C.* Carbon nanotube reinforced titanium metal matrix composites prepared by powder metallurgy – a review // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2015. Т. 40. № 1. Р. 38.