



УДК 620.3

Л. С. Белозеров, А. А. Казин, С. Г. Купцов

Влияние режима электроискровой обработки поверхности конструкционного графита на эрозионную стойкость

Рассмотрена эрозионная стойкость графитовых образцов с электроискровым покрытием, нанесенным на разных режимах с целью выявления более качественного. В ходе эксперимента в качестве анода использовали три металла: вольфрам, титан и ванадий. Для эрозионного воздействия применяли плазмотрон.

Ключевые слова: эрозионная стойкость, электроискровое легирование, эрозия, плазмотрон.

Введение

Износостойкость, высокотемпературная, эрозионная и коррозионная стойкости являются необходимыми свойствами материалов, работающих при высоких температурах, давлениях, скоростях и в прочих агрессивных средах, что характерно для изделий авиационной и космической промышленности. Наиболее тяжелые условия для работы материалов наблюдаются в стартовых двигателях и непосредственно сопловых блоках ракет и ускорителей, где за счет сгорания топлива образуется высокотемпературная плазма.

Для увеличения стойкости деталей в агрессивных средах их поверхности модифицируют с помощью концентрированных потоков энергии, например, низкотемпературной плазмой, лазерным, электронным или ионным излучением, а также импульсными разрядами [1].

В настоящее время в данных узлах чаще всего применяются вкладыши из графита из-за уникального набора физико-химических свойств этого материала. Он не растворяется в кислотах, обладает низким коэффициентом трения, проводит электрический ток, жаростоек в отсутствие кислорода – температура плавления достигает 3800 °С. Соответственно, детали, изготовленные из графита, способны без изменения эксплуатационных характеристик работать в таких средах, в которых невозможно использовать другие конструкционные материалы. В то же время графитовые вкладыши в современных изделиях уже работают на пределе возможностей. Дальнейшее увеличение характеристик изделий выполнимо только с ростом эрозионной стойкости графита.

Для повышения эрозионной стойкости графита можно использовать метод электроискрового легирования, который является эффективным методом модификации поверхности конструкционных материалов [2].

Авторы данного метода Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко [3–6] описывают этот процесс как перенос материала анода на поверхность катода при протекании искровых (импульсных) разрядов в газовой среде. Указанный метод прост в использовании, не требует специальной подготовки работников, также не требуется особая подготовка рабочей поверхности детали и ее предварительный подогрев. Электроискровое легирование позволяет формировать модифицированный слой с высокой адгезией и улучшенными свойствами из любых токопроводящих материалов. При этом формируется поверхностная пленка до 100 мкм, что позволяет модифицировать поверхность без существенного увеличения толщины изделия. В некоторых работах [7, 8] показана технология легирования стальных поверхностей графитом.

В данной статье в качестве катода используется графит, а анодом выступают металлы. Поверхность образцов после легирования обрабатывали лазерным излучением для уменьшения шероховатости. Была предпринята попытка определить влияние разных режимов электроискрового легирования на эрозионную стойкость графита при температуре плазмы 1800 °С.

Таким образом, цель работы состоит в определении оптимальных режимов электроискрового легирования поверхности графита, обеспечивающих улучшение эрозионной стойкости.



Объекты и методы исследований

При выполнении эксперимента применялись пластины из конструкционного графита МПГ-7 размером 4×25×25 мм. Свойства графитовых образцов следующие:

- плотность $\geq 1,7$ г/см³;
- размер зерна 45...90 мкм;
- пористость 12...15 %.

Электроискровое легирование проводилось на установке Элитрон-52А [9]. Установка предназначена для упрочняюще-легирующей электроэрозионной обработки поверхностей деталей машин, режущего инструмента, штампов и других металлических изделий. В качестве анода использовались электроды из титана, вольфрама и ванадия диаметром 3 мм, изготовленные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [10]. Технические характеристики установки Элитрон-52А следующие:

- потребляемая мощность 0,9 кВт;
- напряжение питающей сети 220 В;
- энергия импульса 0,1...6,8 Дж;
- частота импульсов 100 Гц;
- рабочий ток 0,3...3,8 А;
- толщина наносимого покрытия до 100 мкм;
- шероховатость наносимого покрытия 2,5...16 мкм;
- максимальная производительность 4 см³/мин.

Анализ литературы [8, 11] позволил подобрать 4 режима (табл. 1) электроискрового легирования, наиболее подходящих для модификации поверхности графита.

Таблица 1

Технологические показатели заданных режимов электроискрового легирования

Режим электроискрового легирования	Энергия импульсов, Дж	Рабочий ток, А	Производительность, см ³ /мин
RC-1	0,5	1,5	2,0
RC-2	1,0	1,5	1,5
RC-3	3,0	1,5	2,0
RC-4	5,0	1,5	1,5

Для того чтобы уменьшить шероховатость поверхности после электроискрового легирования и сохранить требуемый по чертежу допуск толщины образцов, а также увеличить

сплошность покрытия, каждый образец был обработан на лазерной установке *Bulat HTF-150* [12]. Ранее авторы настоящей статьи уже показали положительный результат применения такого способа гибридной обработки поверхностей разных материалов за счет лазерной сварки, которая прочно сцепляет поверхность обработанной детали. Опираясь на данные работы, авторы подобрали оптимальные параметры лазерной обработки:

- напряжение на дуге 320 В;
- частота 6 Гц;
- длительность импульса 7 мс;
- шаг по оси Y 0,2 мм;
- шаг по оси X 0,35 мм;
- фокусировка 8 мм;
- форма импульса – колокол.

Эрозионную стойкость образцов графита с модифицированной поверхностью определяли при воздействии плазменного потока с постоянными температурой и давлением, образованного плазмотроном в инертной среде (аргон) [11]. В течение испытания фиксировались время воздействия плазменной струи, температура и убыль массы образцов. Обработка плазменным потоком проходила при следующих режимах:

- температура торможения 1800 °С;
- давление торможения 0,5 атм;
- длина струи 8 мм.

Результаты и обсуждение

Результаты электроискрового легирования графита для образцов МПГ-7 приведены в табл. 2.

Графики зависимостей прироста массы и шероховатости от энергии импульсов представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Из данных, представленных в табл. 2 и на рис. 1 и 2, видно, что при повышении энергии импульсов масса образцов графита увеличивается. Вероятно, в процессе электроискрового легирования с металлическим электродом на поверхности графита протекает реакция $C + Me \rightarrow MeC$ с образованием пленки карбида титана, вольфрама или ванадия в зависимости от материала анода. Соответственно, чем больше приложенная энергия, тем толще карбидная пленка. В то же время с увеличением энергии импульсов растет и шероховатость



Таблица 2

Результаты электроискрового легирования

Номер образца	Режим нанесения покрытия	Энергия импульсов, Дж	Масса образца, г	Масса после нанесения покрытия, г	Прирост массы, г	Шероховатость Ra, мкм
Ti-1	RC-1	0,5	4,620	4,782	0,162	0,81
Ti-2	RC-2	1,0	4,635	4,836	0,201	1,44
Ti-3	RC-3	3,0	4,590	4,907	0,317	5,80
Ti-4	RC-4	5,0	4,610	5,075	0,465	9,10
W-1	RC-1	0,5	4,615	4,765	0,150	0,83
W-2	RC-2	1,0	4,628	4,851	0,223	1,40
W-3	RC-3	3,0	4,610	4,909	0,299	5,94
W-4	RC-4	5,0	4,595	5,005	0,410	9,12
V-1	RC-1	0,5	4,621	4,770	0,149	0,79
V-2	RC-2	1,0	4,610	4,800	0,190	1,51
V-3	RC-3	3,0	4,605	4,885	0,280	5,86
V-4	RC-4	5,0	4,618	5,008	0,390	9,38

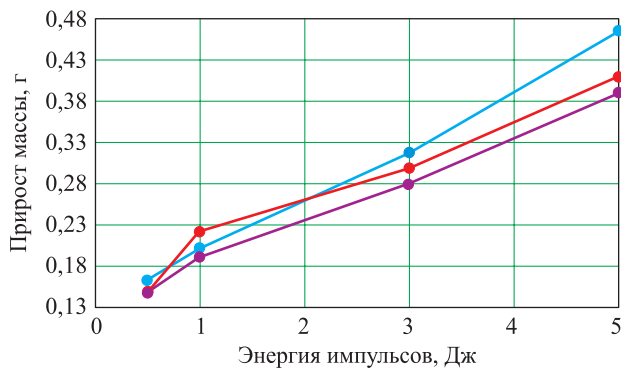


Рис. 1. Зависимость прироста массы образцов от энергии импульсов:
 — образец Ti; — образец W; — образец V

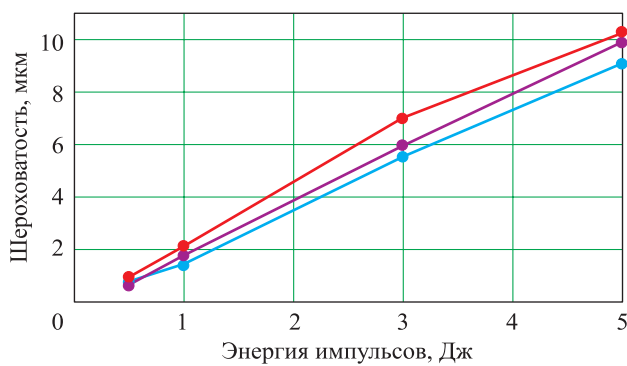


Рис. 2. Зависимость шероховатости образцов от энергии импульсов:
 — образец Ti; — образец W; — образец V

поверхности нанесенного слоя, что негативно скажется при эксплуатации изделия, так как необработанная поверхность может повредить ответную деталь при соприкосновении деталей, также могут образоваться риски и забоины, влияющие на заданный размер изделия.

Следует отметить, что образцы, легированные титаном, обладали меньшей шероховатостью, чем образцы, легированные вольфрамом и ванадием.

На рис. 3 представлены зависимости температуры образцов, легированных титаном, вольфрамом и ванадием, от времени воздействия плазменной струи плазмотрона. В табл. 3 приведены значения убыли массы и макси-

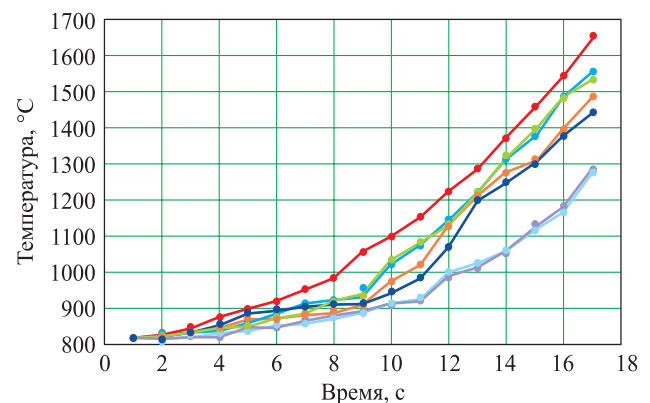


Рис. 3. Зависимость температуры образцов от времени воздействия плазмы:
 — C; — Ti-1; — Ti-2; — Ti-3; — Ti-4;
 — W-3; — V-3



Таблица 3

Максимальная температура и убыль массы образцов в струе плазмы

Параметры	Образец с титановым покрытием						
	С	Ti-1	Ti-2	Ti-3	Ti-4	W-3	V-4
Режим нанесения покрытия	–	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-3	RC-3
T_{\max} , °C	1660	1560	1535	1289	1280	1489	1445
Δm , г	0,874	0,559	0,521	0,318	0,301	0,441	0,419

максимальной температуры образцов в конце эксперимента.

Температура образцов при воздействии плазменной струи монотонно возрастает в течение всего времени эксперимента, и характер зависимости температуры от времени сходный для всех образцов (см. рис. 3). При этом модификация поверхности графита снижает скорость нагрева образцов.

Видно, что образцы Ti-1 и Ti-2, а также Ti-3 и Ti-4 характеризуются одинаковыми зависимостями температуры от времени испытания. Температуры образцов с модифицированной поверхностью систематически ниже, чем у образца графита. При этом образцы Ti-3 и Ti-4 нагреваются значительно медленнее, чем Ti-1, Ti-2 и С.

Образцы W-3 и V-3 обладают схожими зависимостями температуры от времени испытания друг с другом и образцами Ti-1 и Ti-2, но в то же время нагреваются быстрее, чем образцы Ti-3 и Ti-4.

В конце эксперимента температура у образцов Ti-1 и Ti-2 составила 1550 и 1525 °C – на 100 и 125 °C ниже, чем у немодифицированного образца графита (1660 °C). Температура образцов W-3 и V-3 оказалась ниже в среднем на 80 °C, чем у образцов Ti-1 и Ti-2. Температура образцов Ti-3 и Ti-4 в конце эксперимента была значительно ниже – 1290 и 1275 °C соответственно. Это на 371 и 380 °C ниже, чем у немодифицированного образца графита, и в среднем на 183 °C ниже, чем у образцов W-3 и V-3. При этом убыль массы образцов Ti-3 и Ti-4 на 28, 40 и 65 % меньше, чем у образцов W-3 и V-3, Ti-1 и Ti-2, С соответственно, что свидетельствует о большей эрозионной стойкости образцов Ti-3 и Ti-4.

Учитывая минимальную эрозионную стойкость и низкую скорость нагрева образцов Ti-3 и Ti-4 по сравнению с образцами Ti-1, Ti-2 и W-3, V-3, можно утверждать, что для электроискрового легирования поверхности графита лучше всего подходят режимы RC-3 и RC-4 в сочетании с электродом из титана. Однако если учесть более низкую шероховатость образца Ti-3 по сравнению с образцом Ti-4, то можно заключить, что оптимальным режимом электроискрового легирования графита из рассмотренных является RC-3 в сочетании с электродом из титана.

Заключение

Результаты работы показывают, что оптимальным режимом электроискрового легирования поверхности графита является RC-3: энергия импульсов 3 Дж при рабочем токе 1,5 А в сочетании с электродом из титана.

Сочетание электрода из титана и режима легирования RC-3 позволяет получить максимально эрозионностойкую поверхность с минимальной для такой стойкости шероховатостью и значительно снизить скорость нагрева детали.

Таким образом, легирование поверхности графита титаном по режиму RC-3 позволит увеличить время работы соплового блока или уменьшить толщину детали при сохранении прежней длительности работы.

Список литературы

1. Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Сиденко Н. А., Раводина Д. В., Гирн А. В. Влияние технологических режимов микродугового оксидирования на пористость и коррозионную стойкость сплава системы Al-Mg-Sc // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17. № 4. С. 1072–1076.
2. Лазаренко Н. И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами // Электронная обработка металлов. 1957. № 2. С. 56–66.
3. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электроискровой способ обработки металлов. Станки и инструмент // Электронная обработка металлов. 1946. № 4. С. 3–9.
4. Лазаренко Н. И. О механизме образования покрытия при электроискровом легировании металлических поверхностей // Электронная обработка металлов. 1965. № 1. С. 3–10.



5. Лазаренко Н. И., Лазаренко Б. Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С. 12–16.
6. Лазаренко Н. И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1967. № 5. С. 3–12.
7. Кирик Г. В., Жарков П. Е., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г., Носко А. А. Цементация стальных поверхностей электроискровым легированием // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2017. № 4. С. 18–26.
8. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г., Марцинковский В. С., Белоус А. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П. Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение // Электронная обработка материалов. 2017. № 4. С. 1–10.
9. Технические средства для нанесения электроискровых покрытий. URL: https://studbooks.net/1882678/tovarovedenie/tehnicheskie_sredstva_naneseniya_elektroiskrovyyh_pokrytiy (дата обращения 10.02.2019).
10. Сумин В. И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез карбидоборидов титана, разработка и применение износостойких композиционных сплавов на их основе // Metallurgia. 1978. № 1. С. 3.
11. Кокорин А. Ф. Стенд на основе высокочастотного дугового плазмотрона для исследования свойств теплозащитных материалов // Физика. 2014. № 1. С. 3.
12. Серия НТФ. Технологическая лазерная установка с волоконным выводом излучения // ООО «ОКБ «БУЛАТ». URL: <https://www.laserbulat.ru/products/lasersystems/htf/> (дата обращения 10.02.2019).

Поступила 15.05.19

Белозеров Лев Сергеевич – аспирант кафедры литейного производства и упрочняющих технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», начальник ПРБ цеха № 20 Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «Новатор», г. Екатеринбург.
Область научных интересов: металлургия.

Казин Александр Александрович – аспирант кафедры литейного производства и упрочняющих технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.
Область научных интересов: металлургия.

Купцов Сергей Гаврилович – доцент, кандидат технических наук кафедры литейного производства и упрочняющих технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.
Область научных интересов: металлургия.



Influence of structural graphite surface electrospark machining conditions on erosion resistance

The study deals with the erosion resistance of graphite samples with an electrospark coating surfaced in different conditions. The purpose of the study was to identify the coating of better quality. During the experiment, three metals were used as the an-ode: tungsten, titanium, and vanadium. For erosivity, plasmatron was used.

Keywords: erosion resistance, electrospark alloying, erosion, plasmatron.

Belozero Lev Sergeevich – post-graduate, Department of Foundry and Hardening Technologies, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin”, Head of the Planning and Distribution Bureau of workshop No. 20, Joint-Stock Company “Experimental Design Bureau Novator”, Ekaterinburg.

Science research interests: metallurgy.

Kazin Aleksandr Aleksandrovich – post-graduate, Department of Foundry and Hardening Technologies, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin”, Ekaterinburg.

Science research interests: metallurgy.

Kuptsov Sergey Gavrilovich – Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, Department of Foundry and Hardening Technologies, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin”, Ekaterinburg.

Science research interests: metallurgy.