ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 57, № 10/3 ФИЗИКА 2014

УДК 621.785:669.14.08

*Ю.А. ДЕНИСОВА***, Ю.Ф. ИВАНОВ*, Е.А. ПЕТРИКОВА***, Е.А. КОЛУБАЕВ***, А.Д. ТЕРЕСОВ*, В.В. ШУГУРОВ**

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 65Г МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ[1]

Представлены результаты исследований поверхностных слоев стали 65Г, модифицированных методами электроискрового легирования с использованием электрода из твердого сплава ВК6 и электронно-пучкового воздействия. Исследованы структура, фазовый состав, шероховатость и микротвердость поверхностных слоев образцов стали.

Ключевые слова: *электроискровое легирование, импульсный электронный пучок, структура, фазовый состав, микротвердость.*

Введение

В последние десятилетия для модификации поверхности инструмента и деталей машин широкое распространение получил метод электроискрового легирования (ЭИЛ), отличающийся от других методов поверхностной обработки своей простотой, надежностью и экономической эффективностью. В основе метода лежит явление электрической эрозии и полярного переноса материала анода на катод (деталь) при импульсном электрическом разряде между ними в газовой среде [1, 2]. В зависимости от материла анода (металлы, их сплавы, карбиды, нитриды и др.) на поверхности детали можно создавать слои с высокой износо-, жаро- и коррозионной стойкостью. Формируемые данным методом поверхностные слои обладают высокой прочностью сцепления с подложкой. Несмотря на множество достоинств, метод ЭИЛ имеет ряд недостатков, которые ограничивают его применение для широкого круга деталей машин. К ним относятся: шероховатость обрабатываемой поверхности детали, трещины, несплошности, пористость легированного слоя. Для устранения данных недостатков в ряде работ [3–6] применялась лазерная обработка поверхности. Кроме того, дополнительная лазерная обработка в определенных режимах облучения приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя, адгезии покрытия к подложке, износо- и коррозионной стойкости. Альтернативным методом обработки поверхности концентрированными потоками энергии является использование импульсных низкоэнергетических высокоинтенсивных электронных пучков. Однако на сегодняшний день не проводилось целенаправленных исследований влияния электронно-пучковой обработки на структуру и свойства поверхностных слоев материалов, подвергнутых ЭИЛ.

Целью данной работы является выявление закономерностей формирования структурно-фазовых состояний в поверхностном слое конструкционной стали и их влияния на физико-механические свойства поверхностного слоя, модифицированного методом ЭИЛ и подвергнутого обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Материал и методы исследования

Материалом исследования служила конструкционная сталь 65Г. Стальные заготовки размером 25×25×50 мм предварительно подверглись закалке от 820 °С в масло и отпуску при 350 °С. Из заготовки вырезались образцы в форме пластинок размером 12×12×5 мм. Электроискровую обработку образцов проводили на воздухе с помощью установки «Элитрон 22А» при токе разряда 2 А и напряжении на легирующем электроде 110 В. В качестве электрода использовали твердый сплав ВК6. Электронно-пучковую обработку образцов осуществляли на установке «СОЛО» со следующими параметрами электронного пучка: средняя энергия электронов в пучке 15 кэВ, длительность импульса 50 мкс, плотность энергии пучка электронов 10–45 Дж/см^2. Число импульсов воздействия составляло 3.

[1] Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 14-08-31706 мол_а).

Структуру и фазовый состав образцов до и после комплексной обработки, сочетающей электроискровое легирование и электронно-пучковое воздействие, исследовали методами оптической микроскопии с помощью микровизора μVizio-MET-221, сканирующей электронной микроскопии на приборе SEM-515 «Philips» и рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Shimadzu XRD в излучение CuK_α. Элементный состав образцов изучали с помощью рентгеновского микроанализатора EDAX Genesis XM 260, встроенного в растровый электронный микроскоп SEM-515 «Philips». Шероховатость поверхности определяли в соответствии с ГОСТ 2789-73 с помощью лазерного микроскопа Olympus OLS LEXT 4000. Измерения микротвердости по Викерсу проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор P = 0.5 Н.

Результаты исследований и их обсуждение

При электроискровой обработке стали 65Г формируется многослойная структура, состоящая из зоны легирования и зоны термического влияния. Зона термического влияния включает в себя зону вторичной закалки, примыкающую к зоне легирования, и зону отпуска. Общая толщина модифицированного слоя составляет ~ 60 мкм, при этом толщина зоны легирования – 22 мкм. Между зонами легирования и термического влияния проходит четкая граница. Электронно-микроскопические исследования показали, что при электроискровом легировании на поверхности стальных образцов формируется высокодефектный слой, содержащий большое количество капель, трещин, микропор (рис. 1, *а*). Микропоры равномерно распределены по всей глубине зоны легирования. Трещины распространяются на глубину зоны легирования. Поскольку обработка проводилась на воздухе, на поверхности легированного слоя образовались окисные пленки.

Электронно-пучковая обработка стальных образцов приводит к существенному изменению рельефа поверхности, сформированного в результате электроискровой обработки. При всех режимах облучения поверхность отчищается от окислов. Отчетливо проявляется несплошность покрытия. Выделяются участки поверхности стали, легированные и нелегированные карбидом вольфрама (рис. 1). При плотностях энергии электронного пучка 10–15 Дж/см^2 и длительности импульса 50 мкс происходит плавление только стальной подложки. Это приводит, с одной стороны, к выглаживанию рельефа поверхности, с другой – к формированию на участках поверхности стали, нелегированных карбидом вольфрама, микрократеров (рис. 1, *б*). Структура легированных участков поверхности подобна структуре твердого сплава, на которых присутствует большое количество неоплавленных твердых частиц. При этом сохраняются микропоры и микротрещины, присутствовавшие в поверхностном слое перед облучением (рис. 1, *б*). С увеличением плотности энергии электронного пучка (20–30 Дж/см^2) несплошности в покрытии сохраняются. На нелегированных карбидом вольфрама участках поверхности выявляется структура ячеистой кристаллизации расплава. Средний размер ячеек кристаллизации увеличивается с ростом плотности энергии пучка с 0.28 мкм (20 Дж/см^2) до 0.58 мкм (30 Дж/см^2). На легированных участках формируется плотный слой, который разбит на фрагменты сеткой трещин (рис. 1, *в*). При плотностях энергии электронного пучка 35–45 Дж/см^2 наблюдается растворение частиц карбида вольфрама и формирование структуры ячеистой кристаллизации, а местами – дендритной кристаллизации расплава (рис. 1, *г*). Термоупругие напряжения, возникающие в поверхностном слое стали в результате высоких скоростей охлаждения, инициируют процесс трещинообразования (рис. 1).

Анализ структуры поперечного сечения стали показал, что при облучении электронным пучком с плотностью энергии 10–20 Дж/см^2 размеры зон легирования и термического влияния, созданные при электроискровом легировании, не изменяются. С ростом плотности энергии пучка 25–45 Дж/см^2 размер модифицированного слоя увеличивается и достигает 100–120 мкм. Следует отметить, что размер зоны легирования существенно не изменяется, при этом граница между зонами легирования и вторичной закалки размывается. Увеличение размера модифицированного слоя в основном происходит за счет роста как зоны вторичной закалки, так и зоны отпуска. При облучении легированных образцов электронным пучком с плотностью энергии 30–45 Дж/см^2 значительно снижается количество микропор в зоне легирования.

Проведено исследование влияния режимов облучения на шероховатость поверхности стали после ЭИЛ. Шероховатость поверхности стали после электроискровой обработки составила R_a = = 7 мкм. Облучение стали электронным пучком с плотностью энергии 10–15 Дж/см^2 не привело к снижению шероховатости (R_a = 7 мкм), несмотря на визуальное выглаживание поверхности. С увеличением плотности энергии электронного пучка (20–35 Дж/см^2) шероховатость поверхно-

сти растет от 9 до 13 мкм. Это связано с интенсивным плавлением и кипением стальной подложки, в результате которого формируется волнообразный рельеф.

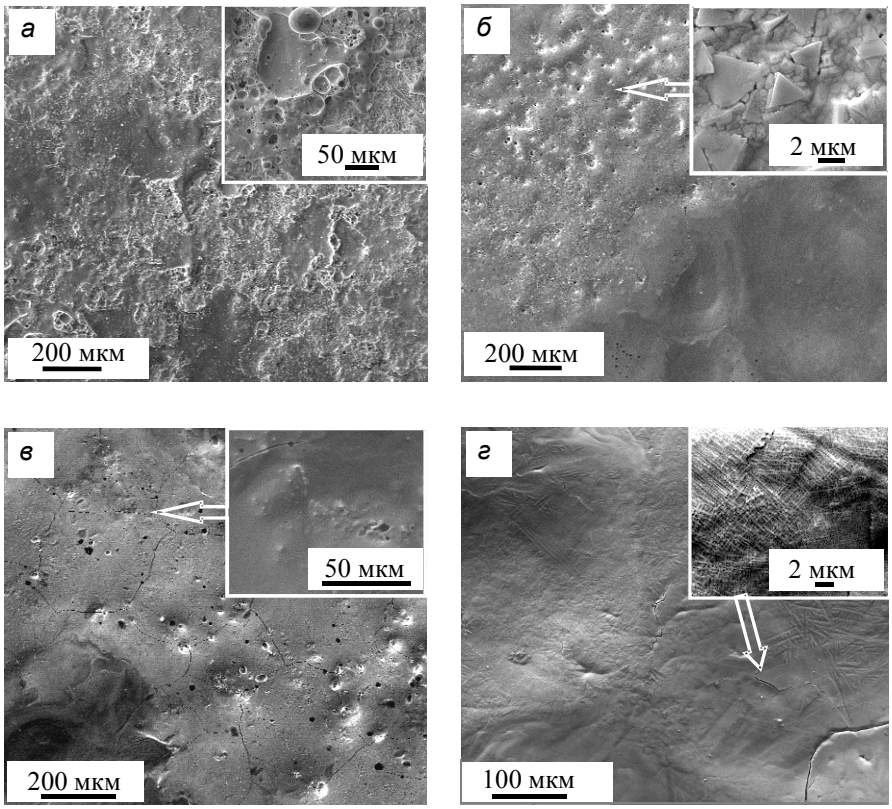

Рис. 1. Изображения структуры поверхности стали 65Г после ЭИЛ (электрод ВК6) (*а*) и электронно-пучковой обработки (*б–г*): *б* – 15 Дж/см^2; *в* – 25 Дж/см^2; *г* – 35 Дж/см^2 (50 мкс, 3 имп.)

По данным рентгеноструктурного анализа поверхностный слой стали 65Г после ЭИЛ имеет многофазную структуру, состоящую из фаз W_2C, WC, α-Fe, γ-Fe, Fe_3C, FeO (рис. 2, кривая *1*). Основной фазой зоны легирования является полукарбид W_2C. Последующее электронно-пучковое облучение с плотностью энергии пучка 10–15 Дж/см^2 не приводит к существенному изменению фазового состава поверхностного слоя. Исчезают рефлексы, принадлежащие фазе оксида железа. При плотностях энергии 20–30 Дж/см^2 наблюдается начальная стадия растворения частиц карбида вольфрама и образование в поверхностном слое карбидной фазы типа Me_6C (рис. 2, кривая *2*). С ростом плотности энергии пучка процесс растворения частиц карбидной фазы интенсифицируется, что приводит к значительному снижению объемной доли частиц карбидной фазы (W_2C, WC) в поверхностном слое и увеличению объемных долей карбидной фазы Me_6C, α- и γ-фазы железа (рис. 2, кривая *3*).

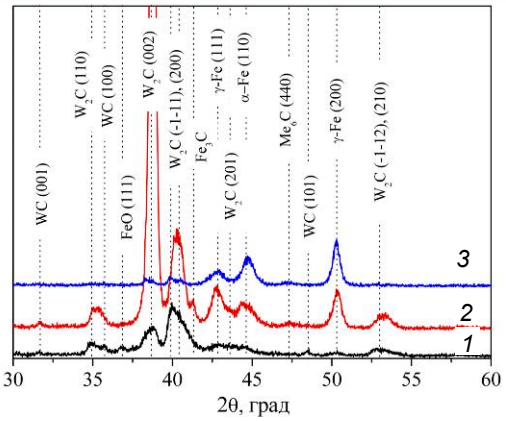

Рис. 2. Участки рентгенограмм поверхностного слоя стали 65Г после ЭИЛ (электрод ВК6) (кр. *1*) и электронно-пучковой обработки (кр. *2*, *3*): кр. *1* – 15 Дж/см^2; кр. *2* – 25 Дж/см^2; кр. *3* – 35 Дж/см^2 (50 мкс, 3 имп.)

На рис. 3 и 4 приведены результаты измерений микротвердости поверхностного слоя стали до и после ЭИЛ и электронно-пучковой обработки, из которых следует, что: 1) электроискровая обработка стали 65Г твердым сплавом привела к повышению средней микротвердости поверхностного слоя в 1.7 раза; 2) электронно-пучковое облучение в режимах с частичным или полным растворением час-

тиц карбидной фазы W_2C, WC (20–45 Дж/см^2) сопровождается уменьшением микротвердости поверхностного слоя; 3) наряду с некоторым снижением микротвердости поверхностного слоя с увеличением плотности энергии пучка (20–45 Дж/см^2) растет толщина слоя с повышенными значениями микротвердости по сравнению с микротвердостью стали в исходном состоянии. Под слоем с повышенными значениями микротвердости располагается зона отпуска с пониженными значениями микротвердости.

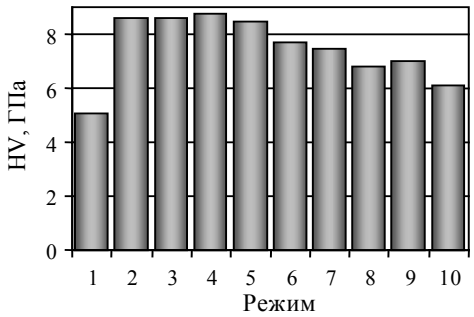

Рис. 3. Микротвердость поверхности стали до и после ЭИЛ и электронно-пучковой обработки. 1 – сталь 65Г; 2 – сталь 65Г+ЭИЛ; 3 – 10 Дж/см^2; 4 – 15 Дж/см^2; 5 – 20 Дж/см^2; 6 – 25 Дж/см^2; 7 – 30 Дж/см^2; 8 – 35 Дж/см^2; 9 – 40 Дж/см^2; 10 – 45 Дж/см^2 (50 мкс, 3 имп.)

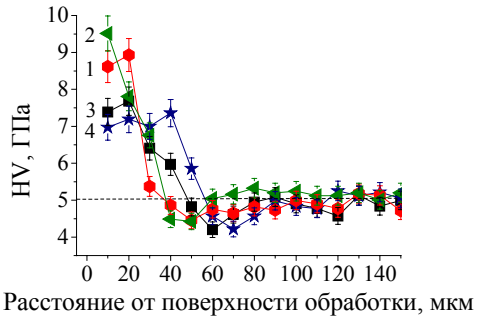

Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине модифицированного слоя: *1* – сталь 65Г+ЭИЛ; *2* – 20 Дж/см^2; *3* – 25 Дж/см^2; *4* – 35 Дж/см^2 (50 мкс, 3 имп.)

Выводы

В результате ЭИЛ твердым сплавом ВК6 на поверхности образцов из стали 65Г формируется высокодефектный слой со средней микротвердостью 8.6 ГПа, которая превышает микротвердость стали перед электроискровой обработкой в 1.7 раза. Последующая электронно-пучковая обработка с плотностью энергии более 20 Дж/см^2 приводит к уменьшению микротвердости поверхностного слоя в результате растворения исходных частиц карбидов W_2C, WC и образования частиц карбидной фазы типа Me_6C, а также за счет увеличения объемной доли γ- и α-фазы железа. Полученные значения микротвердости поверхностного слоя для всех режимов облучения оказались выше микротвердости стали в исходном состоянии. Электронно-пучковая обработка сопровождается уменьшением пористости поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазаренко Н.И. // Электроискровое легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976. – 45 с.
2. Носов А.В., Быков Д.В. // Электроискровая обработка металлов. – М.: Всесоюзное кооперативное издательство, 1953. – 168 с.
3. Radek N. and Bartkowiak K. // Physics Procedia. – 2011. – V. 12. – P. 499–505.
4. Radek N. and Bartkowiak K. // Physics Procedia. – 2011. – V. 5. – P. 417–423.
5. Radek N., Wajs E., and Luchka M. // Порошковая металлургия. – 2008. – № 3–4. – С. 54–59.
6. Верхотурова И.В., Козырь А.В., Никитенко Н.В., Ульянов В.Н. // Вестник АмГУ. – 2009. – Вып. 45. – С. 26–28.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия
**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
***Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия
E-mail: yukolubaeva@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.14.

Денисова Юлия Александровна, науч. сотр.;
Иванов Юрий Федорович, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;
Петрикова Елизавета Алексеевна, мл. науч. сотр.;
Колубаев Евгений Александрович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Тересов Антон Дмитриевич, ведущ. электроник;
Шугуров Владимир Викторович, мл. науч. сотр.

Yu.A. DENISOVA, Yu.F. IVANOV, E.A. PETRIKOVA, E.A. KOLUBAEV, A.D. TERESOV, V.V. SHUGUROV

SURFACE MODIFICATION OF 65G STEEL BY ELECTROSPARK ALLOYING AND ELECTRON-BEAM INFLUENCE METHODS

In article the results of investigations of the surface layers received on 65G steel by methods of electrospark alloying with use of hard alloy (WC – 6 % Co) electrode and electron-beam treatment are presented. The structure, phase composition, surface roughness and microhardness of the surface layers of steel samples are investigated. It is shown, that as a result of electrospark alloying by hard alloy (WC – 6 % Co) on the 65G steel surface is formed the high-defective layer with average microhardness of 8.6 GPa which exceeds the microhardness of steel in an initial state in 1.7 times. The subsequent electron-beam treatment with beam energy density more than 20 J/cm^2 leads to decrease of surface layer microhardness as a result of dissolution of initial particles of W_2C, WC carbides and formations of Me_6C carbide and also due to increase of volume fraction of iron γ- and α-phase. The received values of surface layer microhardness above microhardness of steel in an initial state for all modes of an irradiation. Alongside with some decrease of surface layer microhardness with increase of beam energy density (20–45 J/cm^2) the thickness of layer with increased values of microhardness relatively of steel microhardness in an initial state is rised. Tempering zone with the lowered values of microhardness situated under the layer with the increased values of microhardness. Electron-beam treatment is accompanied by reduction of porosity of the surface layer.

Keywords: *electrospark alloying, pulsed electron beam, structure, phase composition, microhardness.*

REFERENCES

1. Lazarenko N.I. *Electrospark alloying of metal surfaces.* Moscow, Mechanical engineering Publ., 1976, 45 p.
2. Nosov A.V., Bulls D.V. *Electrospark treatment of metals.* Moscow, All-Union cooperative publishing house, 1953, 168 p.
3. Radek N., Bartkowiak K. (2011). *Physics Procedia*, 12, 499–505.
4. Radek N., Bartkowiak K. (2011). *Physics Procedia*, 5, 417–423.
5. Radek N., Wajs E., Luchka M. (2008). *Powder metallurgy*, 3–4, 54–59.
6. Verhoturova I.V., Kozyr A.V., Nikitenko N.V., Uljanov V.N. (2009). *Herald of the AmSU*, 45, 26–28.