

УДК 543.442, 620.187, 621.9.048.4

Оригинальная статья

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 35ХГСЛ ПОСЛЕ ЕЁ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ-АНОДОМ

Н.А. Панькин, В.П. Мишкин

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н.П. Огарева»*

430005, Россия, Саранск, ул. Большевикская, 68

panjkinna@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.807

Аннотация. Методом растровой электронной микроскопии исследована морфология поверхности стали 35ХГСЛ после её электроискровой обработки электродом-анодом из вольфрама марки ЭВЧ. Выявлены следующие структурные элементы: наплывы, шарообразные и дискообразные включения, трещины, поры и частицы неправильной формы. Их появление обусловлено высокими температурами в межэлектродном промежутке (больше соответствующих температур плавления основных материалов электродов) и неравновесностью процессов протекающих в нем. При формировании пор основным механизмом является выделение газов при остывании материалов электродов в жидкой фазе. Макронапряжения, возникающие при электроискровом разряде в поверхностных слоях электродов, превосходящие механические свойства материалов электродов приводят к выбросу в межэлектродный промежуток твердых частиц неправильной формы и возникновению трещин. Возникновение наплывов, включений круглой/овальной формы и шарообразных частиц связано с взаимодействием жидкой фазы из межэлектродного промежутка с поверхностью катода.

Ключевые слова: сталь, вольфрам, электроискровая обработка, морфология, электронная микроскопия.

1. Введение

Метод электроискровой обработки (ЭИО) нашел широкое применение при модификации проводящих материалов с целью изменения их физических, химических, механических и эксплуатационных свойств, а также восстановления эксплуатационных параметров после различного рода износа [1-3]. Это достигается, в том числе, за счет формирования наноструктурированного состояния поверхностного слоя [4, 5]. Суть электроискровой обработки заключается в переносе вещества между электродами при электроискровом импульсном разряде (ЭИИР) [4]. При этом в качестве катода, чаще всего, служит обрабатываемая деталь, а анодом – электрод из расходного материала. Структура и свойства будущего слоя определяются многими параметрами работы применяемой установки и состояния электродов – состав электродных материалов, их геометрические размеры, энергия одиночного импульса, длительность обработки, состав среды в которой происходит ЭИО, частота и амплитуда колебаний анода и т.д. [4].

Не смотря на большое количество публикаций по методу

электроискровой обработки, остаются вопросы о механизмах формирования структурных элементов рельефа поверхности, атомно-кристаллической структуры и свойств поверхностного слоя.

Целью настоящей работы являлось исследование морфологии поверхности стали 35ХГСЛ после электроискровой обработки вольфрамом.

2. Методика эксперимента.

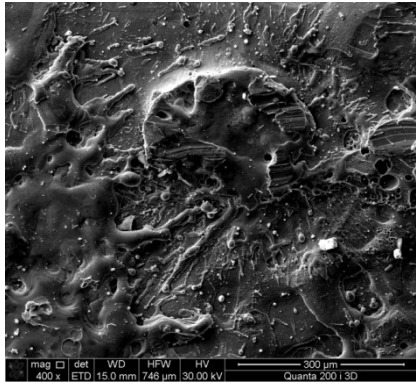
В качестве подложки (катода) взяты плоские образцы из стали 35ХГСЛ с геометрическими размерами 20×10×2 мм. Анодом служила проволока диаметром 1,6 мм и начальной длиной 50 мм из вольфрама марки ЭВЧ по ГОСТ 23949-80 [6]. Электроискровая обработка поверхности стали проводилась на установке Alier-31 (НПК «SCINTI», Молдова) в ручном режиме. Частота вибрации электрода-анода составляла 100 Гц. Исследование морфологии поверхности проводилось с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200 i 3D FEI при ускоряющем напряжении 30 кВ. В ходе эксперимента изменяли амплитуду колебаний электрода-анода A (в долях от максимальной амплитуды колебаний A_{max}) и энергию одиночного ЭИИР W (см. Таблицу 1). Значения W ЭИИР для различных режимов работы установки Alier-31 взяты из работы [5].

Таблица 1. Режимы работы установки.

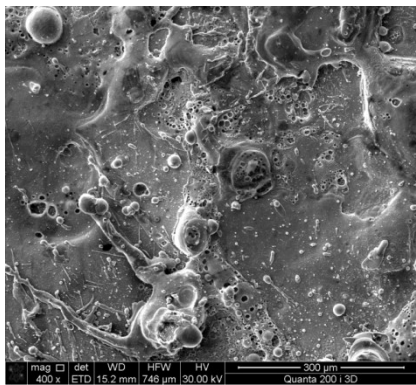
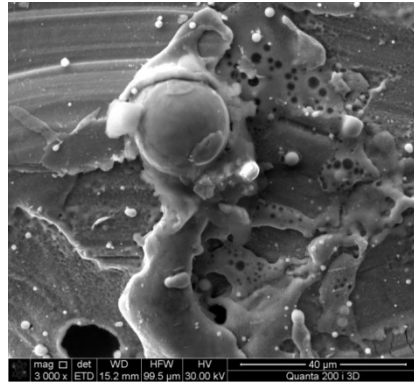
Режим, №	A / A_{max}	W , Дж
1	1,0	1,58
2	0,5	1,58
3	1,0	0,07
4	0,5	0,07
5	0,75	0,39

3. Результаты и их обсуждение

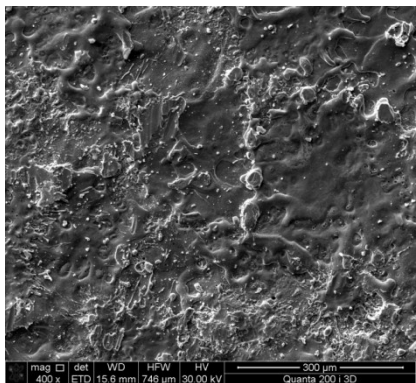
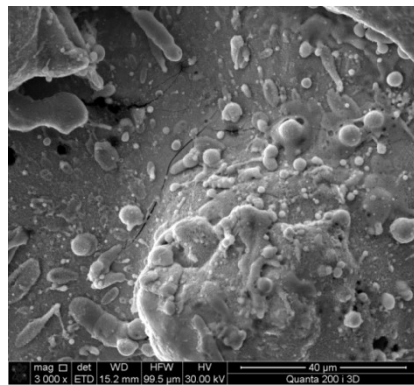
Поверхность стали 35ХГСЛ после её электроискровой обработки характеризуется развитой морфологией. Отмечается присутствие напылов, частиц сферической, круглой и овальной форм, ударных кратеров, пор, систем микротрещин и т.д. Примеры изображений некоторых участков модифицированной поверхности представлены на рис. 1. Наиболее сильно на морфологию поверхностного слоя влияет энергия ЭИИР. Её увеличение сопровождается ростом размеров неровностей в направлении перпендикулярное поверхности – увеличивается шероховатость (определяется визуально). Существенных различий в макроскопической структуре при изменении значений A / A_{max} нами не выявлено. Ниже изложены возможные механизмы формирования некоторых наблюдаемых структурных элементов поверхности при ЭИО.



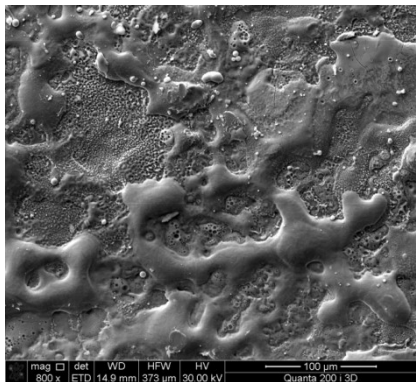
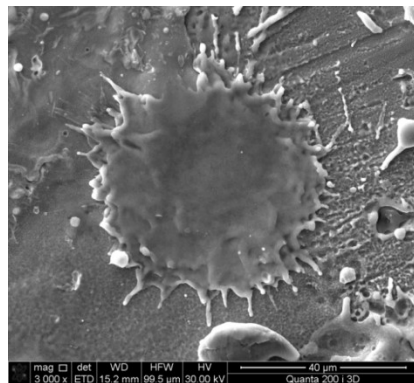
$A / A_{max} = 1,0; W = 1,58 \text{ Дж}$



$A / A_{max} = 0,5; W = 1,58 \text{ Дж}$



$A / A_{max} = 1,0; W = 0,07 \text{ Дж}$



$A / A_{max} = 0,5; W = 0,07 \text{ Дж}$

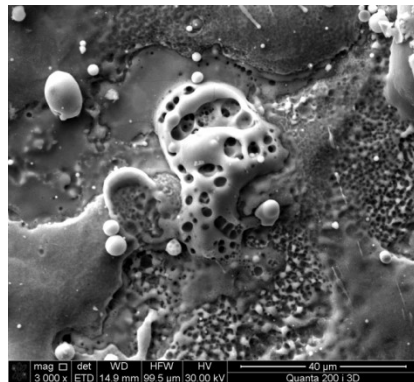


Рис. 1. Фрагменты морфологии поверхности стали 35ХГСЛ после её электроискровой обработки вольфрамовым анодом при различных режимах.

В результате ЭИИР происходит сильный разогрев места контакта электродов и ближайшего к нему пространства. В прилегающих областях возникают большие термонапряжения, вызванные тепловым расширением материалов электродов. Они могут превысить их механические свойства (например, предел прочности). В результате происходит механическое разрушение и выброс в межэлектродный промежуток твердых частиц неправильной формы, как материала анода, так и катода.

В области непосредственного контакта, термическое воздействие на материал электродов приводит преимущественно к их сильному разогреву с образованием жидкой фазы и парообразного состояния. При этом формируется эрозионный кратер, а температура межэлектродного промежутка составляет величину порядка 4000 К [7]. Большая разница коэффициентов теплового расширения твердой и жидкой фаз, их температурная зависимость, а также высокая температура, достигаемая за короткое время, способствуют взрывному выбросу жидкой фазы с поверхности электродов в межэлектродный промежуток. Для основных элементов катода и анода имеется сильное различие в температурах плавления (1811 К и 3653 К, для *Fe* и *W*, соответственно). Вследствие этого наибольший объем жидкой фазы будет приходиться на жидкое железо. Повышение энергии ЭИИР будет сопровождаться увеличением объема жидкой фазы вследствие роста температуры в области разряда. Из-за этого возможно также увеличение эмиссии паровой фазы. Прежде всего, это касается *Fe*, т.к. его температура испарения (3134 К) меньше отмечаемой температуры в области разряда [7]. Для *W* температура кипения составляет 5828 К, что затрудняет образование паровой фазы тугоплавкого компонента. В дальнейшем жидкая фаза будет осаждаться на электроды с образованием на них наплывов, вследствие её растекания по поверхности. Часть продуктов эрозии будет переноситься при последующем механическом контакте электродов. Некоторый объем эмитированного материала, вследствие взрывного выброса, будет двигаться между электродами в виде сферических жидких капель. Часть из них за время пролета от места эмиссии до места конденсации успевает остыть. Это касается, прежде всего, достаточно мелких частиц (менее 3-5 мкм). Они осаждаются преимущественно в виде частиц шарообразной формы. Более крупные частицы, в ряде случаев, также сохраняют сферическую форму. Это возможно при их осаждении в сконденсированный жидкий материал при малой скорости движения. Жидкие частицы, движущиеся с большими скоростями, будут формировать на поверхности образования с формой близкой к кругу/овалу.

Локально можно отметить наличие большого числа пор различного размера. Их образование, скорее всего, обусловлено взаимодействием

жидкого металла с атмосферными газами (азота и кислорода, прежде всего). Это связано с тем, что процесс обработки, как отмечалось выше, проводился на воздухе. Кроме того, растворимость азота в жидком железе значительно выше, чем в твердом агрегатном состоянии [8, 9]. Также некоторое количество газа будет заключена в замкнутых объемах образованных жидким металлом. Возможно, образование части газообразных материалов образуются в результате химических реакций углерода, водорода и серы (присутствуют в составе стали) с кислородом и между собой (образуются летучие CO , CH_4 , SO_2 и т.д.).

При быстром охлаждении растворенные газы начинают выделяться из металла в виде пузырьков различного размера. При этом образуются области, контактирующие с окружающей средой и способствующие увеличению выделения энергии в виде теплового излучения и, соответственно, скорости остывания. Некоторые из этих областей затягиваются вследствие большой текучести жидкого металла, но большая часть остается с образованием открытых и закрытых пор.

Конденсация материала в условиях большого градиента температуры в направлении перпендикулярного поверхности формированию существованию в обрабатываемом материале и межэлектродном промежутке термодинамических неравновесных условий. Данный факт, при кристаллизации осажденного жидкого материала, приводит к возникновению в поверхностном слое высоких термических напряжений [10, 11]. В ряде случаев их величина превышает пределы пластичности/прочности материала наносимого покрытия, что способствует образованию поверхностных трещин и последующему разрушению материала. К появлению вышеуказанных макродефектов способствует также механическое воздействие при непосредственном контакте электродов (анод при ЭИО испытывает вынужденные вибрации).

4. Заключение.

Исследования поверхности катодного материала (стали 35ХГСЛ) методом растровой электронной микроскопии после электроискровой обработки указывает на преимущественное формирование морфологии из жидкой фазы, образованной в межэлектродном промежутке. Формирование порового пространства связано с выделением газов из жидкой фазы при её остывании, которые там появились в результате растворения при высоких температурах и химических реакций углерода, водорода и серы (легирующих элементов электродов) с кислородом и между собой. Вследствие различия в коэффициентах теплового расширения материалов электродов и их температурной зависимости, в поверхностном слое в ходе или после электроискровой обработки могут возникать термические

напряжения, превосходящие механические свойства веществ катода и анода. При разряде это приводит к выбросу в межэлектродный промежуток твердых частиц неправильной формы с формированием эрозионных кратеров, а при остывании модифицируемой области - возникновению трещин. Возникновение наплывов, разноразмерных включений круглой/овальной формы, а также шарообразных частиц связано с взаимодействием жидкой фазы из межэлектродного промежутка с поверхностью электрода.

Библиографический список:

1. **Коротаев, Д.Н.** Оптимизация режимов упрочнения и эксплуатации стальных поверхностей трения после электроискрового легирования / Д.Н. Коротаев, Е.В. Иванова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 1 (49). – С. 39-42.
2. **Овчаренко, П.Г.** Сравнительная характеристика износостойкости поверхностных слоев, полученных электроискровым легированием / П.Г. Овчаренко, А.Ю. Лещев, В.В. Тарасов, И.С. Трифонов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – № 1 (157). – С. 27-29.
3. **Логинов, Н.Ю.** Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом / Н.Ю. Логинов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – № 2 (146). – С. 67-70.
4. **Верхотуров, А.Д.** Физико-химические основы процесса электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 180 с.
5. **Юрченко, Е.В.** Новые электроды для получения наноструктурированных покрытий на алюминиевых деталях методом электроискрового легирования / Е.В. Юрченко, О.Е. Юрченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 12 (204). – С. 574-576. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-574-576.
6. Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. Технические условия: ГОСТ 23949-80. – Введ. 01.01.1981. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
7. **Панькин, Н.А.** Оптическая спектроскопия межэлектродного промежутка электроискровой обработке стали вольфрамом и оловянной бронзой / Н.А. Панькин, С.В. Ильин // Прикладная физика. – 2023. – № 4. – С. 100-106. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-100-106.
8. **Эндерс, В.В.** Азот в сталеплавильных процессах / В.В. Эндерс // Литьё и металлургия. – 2002. – № 1. – С. 95-100. DOI: 10.21122/1683-6065-2002-1-95-100.
9. **Базалева, К.О.** Механизмы влияния азота на структуру и свойства сталей (обзор) / К. О. Базалева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 10 (604). – С. 17-24.
10. **Paustovskii, A.V.** Stresses in coatings obtained by electro-spark alloying and laser processing (review) / A.V. Paustovskii, Y.V. Gubin // Materials Science. – 1997. – V. 33. – I. 6. – P. 770-776. DOI: 10.1007/BF02355555.
11. **Mehta, M.G.** Temperature and thermal stress analysis of electrical discharge machining - a review / M.G. Mehta , N.K. Patel // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014. – V. 3. – I. 1. – P. 1691-1697.

References:

1. Korotaev D.N., Ivanova E.V. Optimizatsiya rezhimov uprochneniya i ekspluatatsii stal'nykh poverkhnostej treniya posle elektroiskrovogo legirovaniya [Optimization of modes of hardening and operation of steel surfaces of friction after electro-spark modifying], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Hardening Technologies and coatings]*, 2009, no. 1 (49), pp. 39-42. (In Russian).
2. Ovcharenko P.G., Leshchev A.Yu., Tarasov V.V., Trifonov I.S. Sravnitel'naya kharakteristika iznosostojkosti poverkhnostnykh sloev, poluchennykh elektroiskrovym legirovaniem [Comparative analysis of wear resistance of surface layers obtained by spark-alloying], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Hardening Technologies and coatings]*, 2018, no. 1 (157), pp. 27-29. (In Russian).
3. Loginov N.Yu. Issledovanie tribologicheskikh kharakteristik obraztsov s pokrytiem, nanesennym elektroiskrovym metodom [Study of tribological characteristics of samples with the coating made by the electric-spark method], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Hardening Technologies and coatings]*, 2017, no. 2

(146), pp. 67 - 70. (In Russian).

4. Verkhoturov A.D. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessa ehlektroiskrovogo legirovaniya* [Physico-chemical foundations of the electrospark alloying process], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1992. 180 p. (In Russian).

5. Yurchenko E.V., Yurchenko O.E. Novye elektrody dlya polucheniya nanostrukturirovannykh pokrytij na alyuminievyykh detal'yakh metodom ehlektroiskrovogo legirovaniya [New electrodes for producing nanostructured coatings on aluminum parts using electrospark doping], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and coatings], 2021, vol. 17, no. 12 (204), pp. 574-576. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-574-576. (In Russian).

6. Elektrody vol'framovye svarochnye neplavyashchiesya. Tekhnicheskie usloviya: GOST 23949-80 [Electrodes tungsten welding nonconsumable. Specifications: State Standard 23949-80]. Moscow, Standartinform Publ., 2004, 8 p. (In Russian).

7. Pan'kin N.A., Ilyin S.V. Opticheskaya spektroskopiya mezhelektrodnogo promezhnutka ehlektroiskrovoy obrabotke stali vol'framom i olovyannoju bronzoju [Optical spectroscopy of the interelectrode gap in the electrospark machining of steel with tungsten and tin bronze], *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2023, no. 4, pp. 100-106. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-100-106. (In Russian).

8. Enders V.V. Azot v staleplavil'nykh protsessakh [Nitrogen in steel-making], *Litiyo i metallurgiya* (Foundry Production and Metallurgy), 2002, no. 1, pp. 95-100. DOI: 10.21122/1683-6065-2002-1-95-100. (In Russian).

9. Bazaleeva K.O. Mechanisms of the influence of nitrogen on the structure and properties of steels (a review), *Metal Science and Heat Treatment*, 2005, vol. 47, issue 9-10, pp. 455-461. DOI: 10.1007/s11041-006-0010-5.

10. Paustovskii, A.V., Gubin Y.V. Stresses in coatings obtained by electro-spark alloying and laser processing (review), *Materials Science*, 1997, vol. 33, issue 6, pp. 770-776. DOI: 10.1007/BF02355555.

11. Mehta M.G., Patel N.K. Temperature and thermal stress analysis of electrical discharge machining - a review, *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014, vol. 3, issue 1, pp. P. 1691-1697.

Original paper

ELECTRONIC MICROSCOPY OF THE SURFACE OF SCMnCr3 STEEL AFTER ELECTRIC SPARK TREATMENT WITH A TUNGSTEN ELECTRODE-ANODE

N.A. Pan'kin, V.P. Mishkin

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.807

Abstract: The method of scanning electron microscopy was used to study the surface morphology of steel SCMnCr3 after its electrospark treatment with a tungsten (without additives) anode electrode. The following structural elements have been identified: bulges, spherical and disk-shaped inclusions, cracks, pores and particles of irregular shape. Their appearance is due to high temperatures in the interelectrode gap (higher than the corresponding melting temperatures of the main electrode materials) and the non-equilibrium of the processes occurring in it. During the formation of pores, the main mechanism is the release of gases during cooling of the electrode materials in the liquid phase. Macro stresses arising from an electric spark discharge in the surface layers of the electrodes, which exceed the mechanical properties of the electrode materials, lead to the ejection of irregularly shaped solid particles into the interelectrode gap and the appearance of cracks. The appearance of sagging, round/oval inclusions, and spherical particles is associated with the interaction of the liquid phase from the interelectrode gap with the cathode surface.

Keywords: *steel, tungsten, electrospark processing, morphology, electron microscopy.*

*Панькин Николай Александрович – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева»
Мишкин Владимир Петрович – младший научный сотрудник, кафедра общей физики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет»*

Nikolay A. Pan'kin – Ph. D., Docent, Department of Solid State Physics, National Research N.P. Ogarev Mordovia State University

Vladimir P. Mishkin – Senior Researcher, Department of General Physics, National Research N.P. Ogarev Mordovia State University

Поступила в редакцию/received: 05.08.2023; после рецензирования/reviised: 06.09.2023; принята/accepted: 12.09.2023.