

УДК 543.423, 537.523

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-100-106

EDN: UGAMJO

PACS: 07.60.-j, 32.30.-r, 52.80.-s



Оптическая спектроскопия межэлектродного промежутка при электроискровой обработке стали вольфрамом и оловянной бронзой

Н. А. Панькин, С. В. Ильин

Методом оптической атомно-эмиссионной спектроскопии исследована область межэлектродного промежутка при электроискровой обработке стали 35ХГСЛ с использованием анодов из вольфрама WP и оловянной бронзы ERCuSn-C. При обработке анодом из вольфрама WP, температура плазмы искрового разряда составляет 4000 К. Спектр излучения состоит из спектральных линий атомарного железа (Fe I). Низкие температуры плазмы искры затрудняют образование паровой фазы тугоплавкого вольфрама. При использовании анодного материала из бронзы ERCuSn-C температура в области разряда принимает значения порядка 10000 К. В спектре излучения, присутствуют спектральные линии атомарной (Cu I) и однократно ионизированной (Cu II) меди. Образование ионов связано с протеканием термической и ударной ионизаций атомов меди. Отсутствие спектральных линий от элемента катода (железа) обусловлено образованием на начальном этапе развития электроискрового разряда жидкого слоя из материала анода (бронзы) на поверхности катода.

Ключевые слова: атомная эмиссионная спектроскопия, вольфрам, оловянная бронза, межэлектродный промежуток, температура.

Введение

Электроискровая обработка (легирование) широко используется для получения материалов с улучшенными характеристиками, а также восстановления эксплуатационных свойств изношенных деталей различных механизмов [1, 2]. Суть данного метода состоит в переносе материала с расходоуемого электрода (анода) на модифицируемую поверхность (катод) под воздействием высокоэнергетических импульсных электрических разрядов [1, 2].

Панькин Николай Александрович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: panjkinna@yandex.ru

Ильин Сергей Владимирович, ст. преподаватель.

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

Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68.

Статья поступила в редакцию 3.04.2023

После доработки 25.04.2023

Принята к публикации 2.05.2023

© Панькин Н. А., Ильин С. В., 2023

При электроискровой обработке (ЭИО), на поверхностях электродов и межэлектродном промежутке, происходят различные физические и химические процессы (плавление, испарение, ионизация, окисление и т. д.) [1, 2]. Для их исследования привлекается широкий спектр различных физических методов – электронная микроскопия [3], рентгенография [4, 5], регистрация вольт-амперных характеристики межэлектродного промежутка [6], измерение массопереноса [7] и т. д. При том получают экспериментальные данные о микроструктуре и морфологии поверхности электродов, фазовом составе, электрических параметрах разрядного промежутка, изменениях массы электродов и т. д.

Среди всех параметров электроискрового разряда при ЭИО можно выделить температуру плазмы, формируемую в области между катодом и анодом. Её значения во многом будут определять основные механизмы протекания тех или иных процессов в межэлектродном промежутке и на поверхности электродов. Кроме того, учет температуры

является необходимым при построении различных математических моделей электроискровой обработки материалов [8, 9].

Определение температуры из спектров излучения плазмы электродугового разряда при обработке материалов является наиболее предпочтительным по отношению к другим способам. Использование спектроскопического метода не изменяет кинетику процесса разряда, как это происходит при применении зондов и термопар. Кроме того, обработка спектров позволяет получить качественные и количественные данные об атомарном и ионном составе плазменного потока в межэлектродном промежутке.

Целью настоящей работы являлось исследование спектров оптической эмиссионной спектроскопии полученных из межэлектродной области при электроискровой обработке поверхности стали с использованием анодов из вольфрама и оловянной бронзы. Для достижения цели решались следующие задачи: определение атомного и ионного состава плазмы электроискрового разряда; расчет температуры в межэлектродном промежутке из данных спектрометрического метода.

1. Методика эксперимента

В качестве подложки (катода) взяты плоские образцы из стали 35ХГСЛ с геометрическими размерами 20×10×2 мм. Данная сталь широко используется при изготовлении высоконагруженных агрегатов. В качестве анода использовали проволоки диаметром 1,6 мм и начальной длиной 50 мм из вольфрама марки WP по международному стандарту EN ISO 6848-2015 (ЭВЧ по ГОСТ 23949-80) и оловянной бронзы ERCuSn-C по стандарту AWS A5.7-84 (БрОФ8-0,3 по ГОСТ 5017-2006).

Электроискровая обработка поверхности стали проводилась в ручном режиме на установке Alier-31 (НПК «SCINTI», Молдова) при энергиях одиночного импульса 1,58 Дж и 3,15 Дж (режимы № 6 и № 7 её работы) [10]. Частота вибрации электрода-анода составляла 100 Гц при коэффициенте амплитуды равном 1,0 (как отмечается в [10], точное значение амплитуды трудно зафиксировать, т.к. она определяется многими трудно контролируемые параметрами).

Регистрация эмиссионных спектров из межэлектродной области проводили с помо-

щью портативного спектрометра CCS100/M (Thorlabs, Inc., США). Расчет параметров спектральных линий осуществляли в программном обеспечении спектрометра. При анализе атомного и ионного составов плазмы электроискрового разряда использовали базу данных NIST Atomic Spectra Database [11].

В общем случае, интенсивность спектральной эмиссионной линии можно определить из выражения [12]:

$$I = n_0 \frac{gA}{g_0} h\nu e^{-E/kT}, \quad (1)$$

где A – вероятность спонтанного излучения, c^{-1} ; g, g_0 – безразмерные статистические веса возбужденного и основного состояний, соответственно; E – энергия возбужденного состояния, Дж; T – температура излучающей частицы, К; k – постоянная Больцмана, Дж/К; ν – частота излучения, Гц; h – постоянная Планка, Дж·с; n_0 – концентрация атомов/ионов в невозбужденном состоянии, m^{-3} .

С учетом выражения (1), отношение интенсивностей двух спектральных линий I_1/I_2 (индексы 1 и 2 у соответствующей величины) можно найти по формуле:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left[-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right], \quad (2)$$

где λ – длина волны, соответствующая рассматриваемой спектральной линии. Определение температуры из спектров излучения плазмы межэлектродного промежутка ранее применялся при исследовании процесса электроискрового легирования [13].

Из выражения (2) можно определить температуру T исследуемого объема межэлектродного промежутка. Спектроскопические данные (A, g, E, λ) для эмиссионных линий, взятых для анализа температуры и состава электроискровой плазмы, представлены в таблице 1. Они выбраны на основании следующих критериев: относительно большой интенсивности; отсутствие перекрытия их профиля с другими линиями; большая разница в энергиях возбужденного состояния E . Их выполнение значительно уменьшает ошибку в определении параметров электроискровой плазмы (состав, температура и т.д.) спектрометрическим методом.

Таблица 1

Параметры анализируемых спектральных линий [1]

№	Линия	g	g_0	$A, 10^8 \text{ с}^{-1}$	$E, \text{ эВ}$	$\lambda, \text{ нм}$
1	Fe I	7	9	0,0283	3,2409	382,4443
2	Fe I	11	13	0,422	5,3084	495,7596
3	Cu I	4	6	0,02	3,8167	510,5541
4	Cu I	8	8	0,109	7,7370	529,2517
5	Cu II	9	11	1,55	16,8817	505,1792
6	Cu II	9	11	3,10	17,1178	495,3724

2. Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены фрагменты оптических спектров полученных из межэлектродного промежутка при электроискровой обработке стали 35ХГСЛ с использованием электрода-анода из чистого вольфрама WP.

Можно отметить, что для рассматриваемых энергий одиночного импульса электроискрового разряда в эмиссионном спектре присутствуют лишь спектральные линии атомарного железа (Fe I) – основного элемента материала катода. Эмиссионных линий соответствующих излучению ионов железа (Fe II и т. д.) не обнаружено. Отсутствуют также

спектральные линии от основного элемента анода – вольфрама.

Рассчитанные значения температуры (считалось, что плазма находится в условии локального термодинамического равновесия [12]) в области межэлектродного промежутка приведены в таблице 2. Можно отметить, что, в пределах ошибки эксперимента, температуры в межэлектродной области одинаковы для используемых энергий одиночных импульсов электроискрового разряда. При этом температуры, по порядку величины, удовлетворительно совпадают с имеющимися литературными данными [14] по исследованию электроискрового разряда.

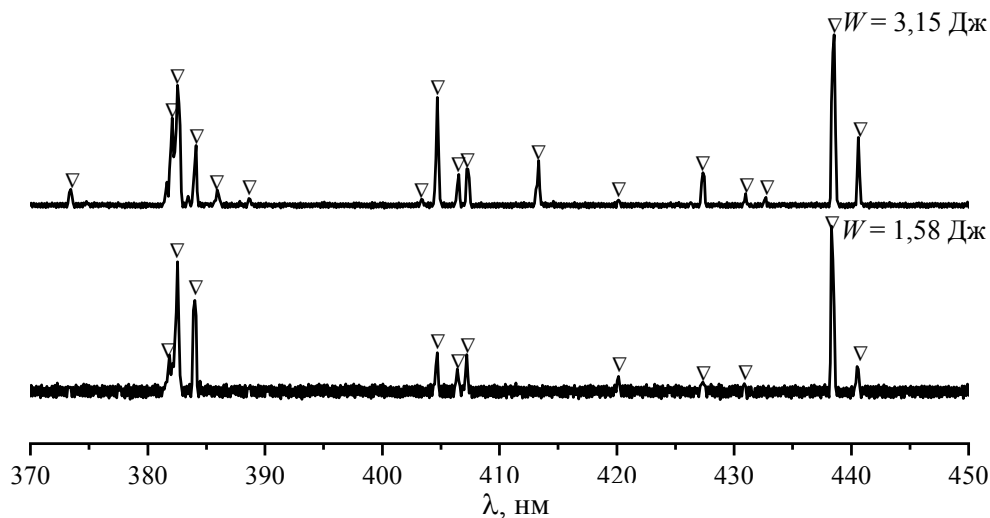


Рис. 1. Участок спектра от электроискрового разряда при обработке стали вольфрамовым электродом (▽ – линии излучения атомарного железа)

Таблица 2

Значения температур (в кельвинах) в межэлектродном промежутке при использовании анодов из вольфрама и оловянной бронзы

$W, \text{ Дж}$	Анодный материал	
	Вольфрам WP	Бронза ERCuSn-C
1,58	4100 ± 300	10200 ± 500
3,15	4200 ± 200	11000 ± 400

Полученные значения температур плазмы электроискрового разряда (~ 4000 К) при использовании электрода из WP выше температур плавления каждого из основных элементов материалов катода (1811 К – железа) и анода (3653 К – вольфрама) [15]. Но они ниже, чем температура испарения вольфрама (5828 К) и несколько выше соответствующей температуры для железа (3134 К). Данный факт приводит к тому, что образование паровой фазы тугоплавкого компонента затруднено. Вследствие этого, наблюдается отсутствие спектральных линий вольфрама в результирующем спектре излучения из области электроискрового разряда. В соответствии с этим, значительная часть энергии разряда идет на плавление компонентов анода и катода, а другая (меньшая) – на испарение материала подложки.

Также стоит отметить, что наличие потока высокоскоростных электронов с катода может приводить к появлению ионов железа вследствие ударной ионизации атомов [12, 16]. Кроме того, при данных температурах для металлов вполне возможно протекание процесса термической ионизации [12, 16]. При этом

протекают и процессы рекомбинации (её скорость увеличивается с понижением температуры), уменьшающие доли ионов в потоке атомарных и ионизированных частиц. Вследствие этого, отсутствие спектральных линий от ионизированного железа в регистрируемом спектре, скорее всего, связано с их очень малой интенсивностью.

Увеличение энергии разряда сопровождается ростом интенсивности спектральных линий. Данный факт свидетельствует о возрастании объема паровой фазы в общем массопереносе вещества через межэлектродный промежуток.

На рисунке 2 представлены участки эмиссионных спектров из межэлектродного промежутка при электроискровой обработке поверхности стали 35ХГСЛ электродом из оловянной бронзы ERcuSn-C. Отмечается присутствие лишь линий от элемента электрода-анода (меди), соответствующих атомарному (Cu I) и однократно ионизированному (Cu II) состояниям. Спектральных линий от элементов материала подложки (железа) и другого компонента бронзы (олово) не обнаружено.

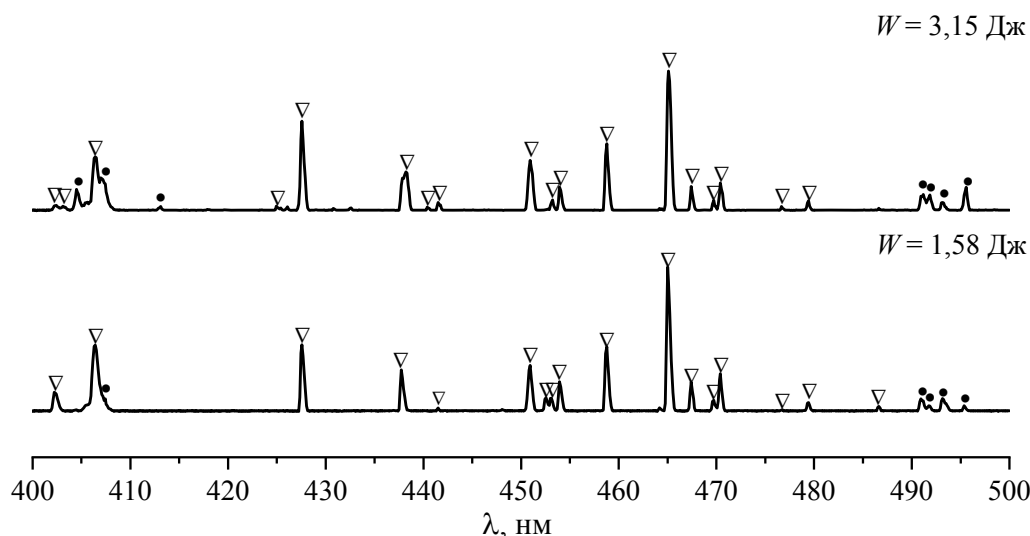


Рис. 2. Участок эмиссионного спектра от электроискрового разряда при легировании стали электродом из оловянной бронзы (▽, ● – линии излучения атомарной и однократно ионизированной меди, соответственно)

Определение температуры проводилось по паре спектральных линий от атомарной меди (спектроскопические параметры приведены в табл. 1). Можно отметить, что для используемых энергий импульса электроискрового разряда температуры межэлектродного промежутка близки и составляют величину

порядка 10000 К. Данные значения значительно превосходят соответствующие результаты (примерно в 2,5 раза), полученные при использовании вольфрамового электрода.

Отсутствие спектральных от железа или значительное преобладание линий от меди (малая интенсивность линий железа) частично

можно объяснить различием в температурах плавления и испарения (для меди – 1356 К и 2840 К, соответственно). Но эта разница невелика при полученных температурах в области межэлектродного промежутка. Данный факт, скорее всего, связан с особенностями массопереноса при электроискровом разряде, и в частности, с преимущественным переносом вещества на начальных стадиях развития разряда с анода на катод.

В данном типе установок процесс разрядки конденсатора начинается спустя некоторое время после контакта электродов посредством срабатывания коммутирующего устройства [1]. По мере удаления электродов поток электронов (вследствие малости межэлектродного промежутка и небольшой области контакта отдельных микро-выступов поверхности электродов) приводит к взрывной эмиссии с поверхностей анода и катода. Вследствие этого, происходит выброс в окружающее пространство металла преимущественно в виде жидкой фазы. При этом наблюдается полярный эффект, заключающийся в том, что эрозия материала с анода превышает соответствующую величину материала катода [4].

Из-за данного эффекта, на катоде образуется расплавленный слой материала анода (оловянная бронза), затрудняющий выход железа на поверхность. Его частичное перемещение возможно лишь на начальном этапе разряда при взаимодействии встречных потоков материалов катода и анода. В дальнейшем, контакт между анодным и катодным материалом происходит по диффузионному механизму между расплавленной бронзой и твердым железом с формированием диффузионной зоны и зоны термического влияния. Дальнейшее развитие электроискрового разряда сопровождается энергетическим воздействием лишь на расплав бронзы, находящийся на поверхности катода, с частичным его переводом в парообразное состояние. Образование ионов меди связано с протеканием процессов ударной и термической ионизаций [10, 13]. Повышение энергии разряда должно способствовать увеличению доли ионов в общем потоке атомов и ионов, вследствие уменьшения скорости рекомбинации. Данный факт подтверждается тем, что рост энергии одиночного

импульса электроискрового разряда приводит к увеличению интенсивности спектральных линий от ионизированной меди (Cu II). Оценка по формуле (1) показывает, что изменение энергии импульса от 1,58 Дж до 3,15 Дж приводит к росту отношения числа ионизированных к числу атомарных частиц меди примерно в 2–4 раза.

Отсутствие спектральных линий от олова в регистрируемом спектре обусловлено, скорее всего, их небольшой интенсивностью, связанного с малым содержанием в материале анода.

Заключение

Спектрометрическим методом определены температуры в межэлектродной области для различных энергий одиночного импульса электроискрового разряда (1,58 Дж и 3,15 Дж). При обработке анодом из вольфрама WP она составляет значение порядка 4000 К, а при использовании в качестве анодного материала бронзы ERCuSn-C – 10500 К.

При электроискровой обработке стали 35ХГСЛ анодом из чистого вольфрама WP спектр излучения из межэлектродного пространства представляет собой совокупность спектральных линий от атомарного железа (Fe I). Значения температур плазмы искры затрудняют образование паровой фазы тугоплавкого вольфрама.

При использовании анода из оловянной бронзы ERCuSn-C, в спектре излучения отмечаются спектральные линии соответствующие атомарному (Cu I) и однократно ионизированному (Cu II) состоянию меди. Образование ионов обусловлено термической и ударной ионизациями. Отсутствие спектральных линий от элемента катода (железа) обусловлено образованием жидкого слоя из материала анода (бронзы) на начальном этапе развития электроискрового разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурумкулов Ф. Х., Лезин П. П., Сенин П. В. и др. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). – Саранск: «Красный Октябрь», 2003.
2. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М. Электроискровое легирование

ние металлических поверхностей. – Кишинев: Штиинца, 1985.

3. *Верхотуров А. Д., Гордиенко П. С., Коневцов Л. А., Панин Е. С.* / Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 32–38.

4. *Палатник Л. С.* / Известия академии наук СССР. 1951. Т. 15. № 1. С. 121–125.

5. *Хасан И. Х., Панькин Н. А.* / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 10. С. 89–96.

6. *Пячин С. А., Маслов Б. Я., Химухин С. Н., Пугачевский М. А.* / Измерительная техника. 2003. № 8. С. 43–46.

7. *Кондратьев А. И., Муромцева Е. В., Химухин С. Н.* / Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 6. С. 26–30.

8. *Власенко В. Д., Иванов В. И., Аулов В. Ф.* / Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 2. С. 218–233.

9. *Шарифуллин С. Н., Ахметзянов А. С., Топоркова Т. В.* / Технический сервис машин. 2021. № 3 (144). С. 108–115.

10. *Юрченко В. И., Юрченко Е. В., Дикусар А. И.* / Электронная обработка материалов. 2019. № 5 (55). С. 1–9.

11. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., NIST ASD Team* (2022). NIST Atomic Spectra Database (version 5.10), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [Sat Feb 25 2023]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

12. *Семиохин И. А.* Элементарные процессы в низкотемпературной плазме. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988.

13. *Алексамян В. Д., Бобров Ю. К., Верхотуров А. Д. и др.* / Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1982. № 2. С. 9–10.

14. *Бураков В. С., Невар Е. А., Неделько М. И., Савостенко Н. А., Тарасенко Н. В.* / Журнал прикладной спектроскопии. 2009. Т. 76. № 6. С. 907–914.

15. *Дриц М. Е., Будберг П. Б., Бурханов Г. С., Дриц А. М., Пановко В. М.* Свойства элементов. – М.: Металлургия, 1985.

16. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992.

PACS: 07.60.-j, 32.30.-r, 52.80.-s

Optical spectroscopy of the interelectrode gap in the electrospark machining of steel with tungsten and tin bronze

N. A. Pan'kin and S. V. Ilyin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“National Research Ogarev Mordovia State University”
68 Bolshevik st., Saransk, 430005, Russia
E-mail: panjkinna@yandex.ru

Received 3.04.2023; revised 25.04.2023; accepted 2.05.2023

Optical atomic emission spectroscopy was used to study the region of the interelectrode gap in the electrospark treatment of 35KhGSL steel using anodes made of tungsten WP and tin bronze ERCuSn-C. When treated with a WP tungsten anode, the spark discharge plasma temperature is 4000 K. The emission spectrum consists of the spectral lines of atomic iron (Fe I). The low temperatures of the spark plasma hinder the formation of the vapor phase of refractory tungsten. When using the anode material of bronze ERCuSn-C, the temperature in the discharge region takes values of the order of 10000 K. In the emission spectrum, there are spectral lines of atomic (Cu I) and singly ionized (Cu II) copper. The formation of ions is associated with the occurrence of thermal and impact ionization of copper atoms. The absence of spectral lines from the cathode element (iron) is due to the formation, at the initial stage of the development of an electric spark discharge, of a liquid layer of the anode material (bronze) on the cathode surface.

Keywords: atomic emission spectroscopy, tungsten, tin bronze, interelectrode gap, temperature.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-100-106

REFERENCES

1. Burumkulov F. Kh., Lezin P. P., Senin P. V. et al., *Electrospark technologies for restoring and hardening machine parts and tools (theory and practice)*, Saransk, Red October, 2003.
2. Gitlevich A. E., Mikhailov V. V., Parkanskii N. Ya. and Revutskii V. M., *Electrospark alloying of metal surfaces*, Chisinau, Shtiintsa, 1985.
3. Verkhoturov A. D., Gordienko P. S., Konevtsov L. A. and Panin E. S., *Hardening technologies and coatings*, № 1, 32–38 (2009) [in Russian].
4. Palatnik L. S., *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR* **15** (1), 121–125 (1951) [in Russian].
5. Khasan I. Kh. and Pankin N. A., *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, № 10, 89–96 (2021) [in Russian].
6. Pyachin S. A., Maslov B. Ya., Khimukhin S. N. and Pugachevsky M. A., *Measuring equipment*, № 8, 43–46 (2003) [in Russian].
7. Kondratiev A. I., Muromtseva E. V. and Khimukhin S. N., *Hardening technologies and coatings*, № 6, 26–30 (2007) [in Russian].
8. Vlasenko V. D., Ivanov V. I. and Aulov V. F., *Engineering technologies and systems* **29** (2), 218–233 (2019) [in Russian].
9. Sharifullin S. N., Akhmetzyanov A. S. and Toporkova T. V., *Technical service of machines*, № 3, 108–115 (2021) [in Russian].
10. Yurchenko V. I., Yurchenko E. V. and Dikusar A. I., *Electronic processing of materials*, № 5, 1–9 (2019) [in Russian].
11. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team, (2022). NIST Atomic Spectra Database (version 5.10), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [Sat Feb 25 2023]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
12. Semiokhin I. A., *Elementary processes in low-temperature plasma*, Moscow, Publishing House of Moscow. unta, 1988.
13. Aleksanyan V. D., Bobrov Yu. K., Verkhoturov A. D. et al., *Electrophysical and electrochemical methods of processing*, № 2, 9–10 (1982) [in Russian].
14. Burakov V. S., Nevar E. A., Nedelko M. I., Savostenko N. A. and Tarasenko N. V., *Journal of Applied Spectroscopy* **76** (6) 907–914 (2009) [in Russian].
15. Drits M. E., Budberg P. B., Burkhanov G. S., Drits A. M. and Panovko V. M., *Element properties*, Moscow, Metallurgy, 1985.
16. Raiser Yu. P., *Physics of the gas discharge*, Moscow, Nauka, 1992.