

УДК (UDC) 621.7

ВЫБОР РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ ИЗ СПЕЧЕННОЙ БРОНЗЫ

SELECTION OF ELECTRIC SPARK PROCESSING MODES FOR ELECTRODES FROM SINTERED BRONZE

Романов И.В., Задорожний Р.Н.
Romanov I.V., Zadorozhny R.N.ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (Москва, Россия)
Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Метод электроискровой обработки отлично зарекомендовал себя в технологиях ремонта и восстановления деталей. Эксплуатационные свойства покрытий, полученных таким методом, зависят от микроструктуры, химического и фазового состава электродных материалов. Значительное улучшение эксплуатационных свойств, например, износостойкости, достигается формированием наноструктурированных покрытий при использовании электродов с определенным содержанием легирующих наноматериалов. Получать такие материалы с наименьшими затратами возможно электроэрозионным диспергированием отходов машиностроительных производств. В данной статье рассмотрены электроды, полученные спеканием бронзового порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования. Такие материалы являются новыми для процесса электроискровой обработки, поэтому важно изучить и подобрать оптимальные режимы нанесения, так как качественной характеристикой процесса является показатель переноса материала электрода на деталь, который зависит от режимов обработки и параметров установки. Целью исследования является выбор режимов установки по электроискровой обработке для оптимального нанесения материала, а также изучение степени приращения покрытия при электроискровой обработке. Нанесение покрытия осуществлялось с помощью установки для электроискровой обработки модели «Вестрон» тип АИ-007, электродный материал был получен по технологии искрового плазменного спекания бронзового порошка, наплавка производилась на стальные образцы размером 14×14×40 мм. Покрытия наносились на образцы с равной площадью в три слоя при разных режимах обработки. Был определен наиболее оптимальный режим нанесения покрытия электродом из спеченной бронзы, полученной из отходов машиностроительных производств методом электроэрозионного диспергирования, что доказывает состоятельность такого способа получения электродных материалов.

Ключевые слова: электроискровая обработка, электрод, спеченная бронза, электроэрозионное диспергирование, медные сплавы, выбор режимов, перенос материала.

Abstract. The method of electrospark machining has proven itself well in the technology of repair and restoration of parts. The operational properties of coatings obtained by this method depend on the microstructure, chemical and phase composition of the electrode materials. A significant improvement in operational properties, for example, wear resistance, is achieved by the formation of nanostructured coatings using electrodes with a certain content of alloying nanomaterials. It is possible to obtain such materials at the lowest cost by electro-erosion dispersion of machine-building waste. This article discusses the electrodes obtained by sintering bronze powder obtained by the method of electroerosive dispersion. Such materials are new for the process of electrospark machining; therefore, it is important to study and select the optimal application modes, since a qualitative characteristic of the process is the indicator of the transfer of the electrode material to the part, which depends on the processing modes and installation parameters. The aim of the study is to select the modes of the installation for electrospark treatment for optimal deposition of the material, as well as to study the degree of coating increment during electrospark treatment. Coating was carried out using an installation for electrospark treatment mod. "Westron" type AI-007, electrode material was obtained by the technology of spark plasma sintering of bronze powder, surfacing was carried out on steel samples 14 × 14 × 40 mm in size, the work also used an Acculab ALC-210d4 analytical balance and an MG micrometer H25 GOST 6507-90. All coatings were applied to samples with an equal area in three layers under different processing conditions. After that, the increment in the thickness and mass of the electrode material on the sample surface was measured. Based on the results of the work, formulas were obtained and graphs were built. The most optimal mode of coating with an electrode made of sintered bronze obtained from machine-building waste by the method of electroerosive dispersion was determined, which proves the consistency of this method of obtaining electrode materials.

Keywords: electrospark machining, electrode, sintered bronze, electroerosive dispersion, copper alloys, choice of modes, material transfer.

Дата принятия к публикации: 21.12.2020 † Date of acceptance for publication: 21.12.2020
Дата публикации: 25.03.2021 † Date of publication: 25.03.2021

Сведения об авторах:

Романов Илья Владимирович – младший научный сотрудник ЦКП «Нано-Центр», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, e-mail: gosniti1953@mail.ru.
ORCID: 0000-0001-5591-4692

Задорожний Роман Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ЦКП «Нано-Центр», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, e-mail: gosniti8@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-8007-0732

Authors' information:

Ilya V. Romanov – Junior Researcher of Center for Collective Use "Nano-Center" at Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: gosniti1953@mail.ru.
ORCID: 0000-0001-5591-4692

Roman N. Zadorozhny – Ph.D., Leading Researcher of Center for Collective Use «Nano-Center», Federal Scientific Agroengineering, e-mail: gosniti8@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-8007-0732

1. Введение

При восстановлении пар трения, посадочных мест и других поверхностей ответственных механизмов методом электроискровой обработки хорошо зарекомендовали себя электродные материалы из меди и сплавов на ее основе. Лучшие технологические параметры по массопереносу и приросту покрытия по толщине при электроискровой обработке наблюдались у бронзы марки БрКМцЗ-1 [1, 2]. В то же время, результаты по использованию электродных материалов при электроискровой обработке на основе спеченных мелкодисперсных и нанопорошковых материалов на основе меди в технической литературе практически отсутствуют или освещены не в полной мере. Известно, что применение дисперсных наполнителей позволяет обеспечить необходимые физико-механические характеристики композиций, тем самым позволяя расширить диапазон применения новейших материалов [3]. Одним из методов получения мелкодисперсных и наноразмерных порошковых материалов является электроэрозионное диспергирование. Выполняя функции рециклинга, процесс электроэрозионного диспергирования позволяет создать порошки из любых токопроводящих материалов, и тем самым образовывать заданные композиции [4, 5].

Произведя процесс спекания мелкодисперсных и наноразмерных порошковых материалов по технологии искрового плазменного спекания Spark Plasma Sintering получают монолитные изделия, пригодные для дальнейшего использования в качестве электродных материалов. Особенность такого

спекания заключается в том, что композитные материалы обрабатываются с высокой степенью плотности с высокой однородностью и особо прочными связями, возникающими между частицами – происходит искровое плазменное сваривание частиц (локальная температура составляет до 10000 °С) в вакууме [6].

Таким образом, изучение современных материалов, обладающих новыми и относительно малоизученными свойствами, полученных спеканием мелко- и нанодисперсных порошков из электроэрозионных материалов, является важной задачей исследований как перспективного электродного материала для электроискровой обработки. Выбор оптимального режима электроискровой обработки, непосредственно влияющего на перенос материала электрода и оказывающего влияние на формирование покрытия на поверхности детали так же актуален для электроискровой обработки.

2. Цель исследования

Цель исследования заключается в выборе оптимальных режимов электроискровой обработки стальных деталей электродом из спеченной бронзы, полученной методом электроэрозионного диспергирования из отходов машиностроительных производств, изучение степени приращения массы образца (покрытия) после электроискровой обработки поверхности при изменении технологических параметров обработки.

3. Материалы и методы

Электродный материал был получен по технологии искрового плазменного спекания из порошка бронзы, диспергируемого в дистиллированной в воде. В основе спекаемого порошка – отходы бронзы марки БрАЖ9-4, составляющие до 95 % от общего состава, остальное – примеси меди марки М1 и бронзы марки БрКМц3-1. Размеры частиц по-

рошкового материала 0,071 мм и менее. Спекание осуществлялось при температуре 910 °С в течение 5 мин и давлении 40 МПа в вакууме при постепенном увеличении температуры и давления с последующим постепенным их снижением. После спекания брикет из бронзы разрезался на элементы размером 6×6×30 мм. Элементный состав электрода представлен в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав электрода

Элементы									
Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
4,42± 0,30	0,353± 0,047	0,109± 0,004	0,132± 0,007	1,41± 0,01	0,158± 0,007	82,57± 0,27	10,21± 0,05	0,134± 0,006	0,284± 0,011

В качестве образцов для наплавки использовались стальные образцы из стали 40 размером 14×14×40 мм (рис. 1).

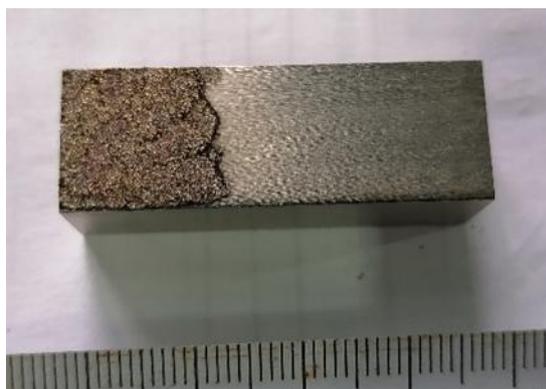


Рис. 1. Стальной образец (сталь 40), обработанный электроискровой обработкой электродом из спеченной бронзы

В работе использовалась установка для электроискровой обработки мод. «Вестрон» тип АИ-007 (рис. 2), весы аналитические Acculab ALC-210d4 (предел взвешивания – 210 г, дискретность - 0,0001 г, класс – I специальный), микрометр МГ Н25 ГОСТ 6507-90.

4. Результаты и обсуждение

Покрyтия из спеченной бронзы наносились на образцы в соответствии с режимами, представленными в табл. 2 при времени за-



Рис. 2. Общий вид установки для электроискровой обработки поверхности деталей «Вестрон» тип АИ-007

держки разрядного импульса равного 0,7 мкс ±10% = const. Количество партий образцов три – в соответствии с частотой импульсов (100, 150, 300 Гц), выдаваемых установкой и которые являются постоянными для каждой партии образцов.

На каждую площадку образца размером 14×14 мм наносилось 3 слоя покрытия. Время обработки при нанесении каждого слоя соответствовало: $t_1 = \tau$, $t_2 = 2\tau$, $t_3 = 2\tau$ с. Время обработки τ определялось как время нанесения сплошного покрытия, полученного электроискровой обработкой на площадке заданного размера для каждого режима обработки. Таким образом, суммарное время

Таблица 2

Режимы опытной электроискровой обработки стальных образцов электродами из спеченной электроэрозионной бронзы

Емкость, мкФ	Рабочее напряжение U на накопительных конденсаторах ($B \pm 20\%$) и рабочий ток I ($A \pm 30\%$) по режимам напряжения					
	1		2		3	
	U	I	U	I	U	I
180	165	7,0	165	9,0	215	9,0
240	150	8,5	165	11	210	12
300	135	9,5	160	13	205	13
360	120	12	155	15	200	14

обработки площадки на одном режиме при полном цикле обработки составило $t_{\Sigma} = 5\tau$ с [7].

Для установления достоверной оценки при подборе оптимальных режимов нанесения покрытий электроискровой обработкой был проведен многофакторный эксперимент. Анализ получаемой модели выявляет параметры оптимизации исследуемых факторов, тем самым позволяет проконтролировать принятую оценку погрешности косвенных измерений при проведении экспериментальных исследований. В то же время, ввиду дискретности параметров, задаваемых установкой электроискровой обработки, осуществить на практике выполнение данной математической модели проблематично. По

этой причине, были проведены серии прямых экспериментов, которые позволили дать оценку наносимым покрытиям [11].

Результаты опытной электроискровой обработки стальных образцов электродами из спеченной электроэрозионной бронзы позволили провести оценку и степень влияния на перенос материала электрода, приращение образца по массе в граммах Δm и по толщине в миллиметрах Δt в зависимости от изменения характеристик $f_{разр}$ (частота импульсов, Гц), $U_{разр}$ (напряжение разряда, В), $C_{разр}$ (емкость заряда, мкФ) (рис. 3-8).

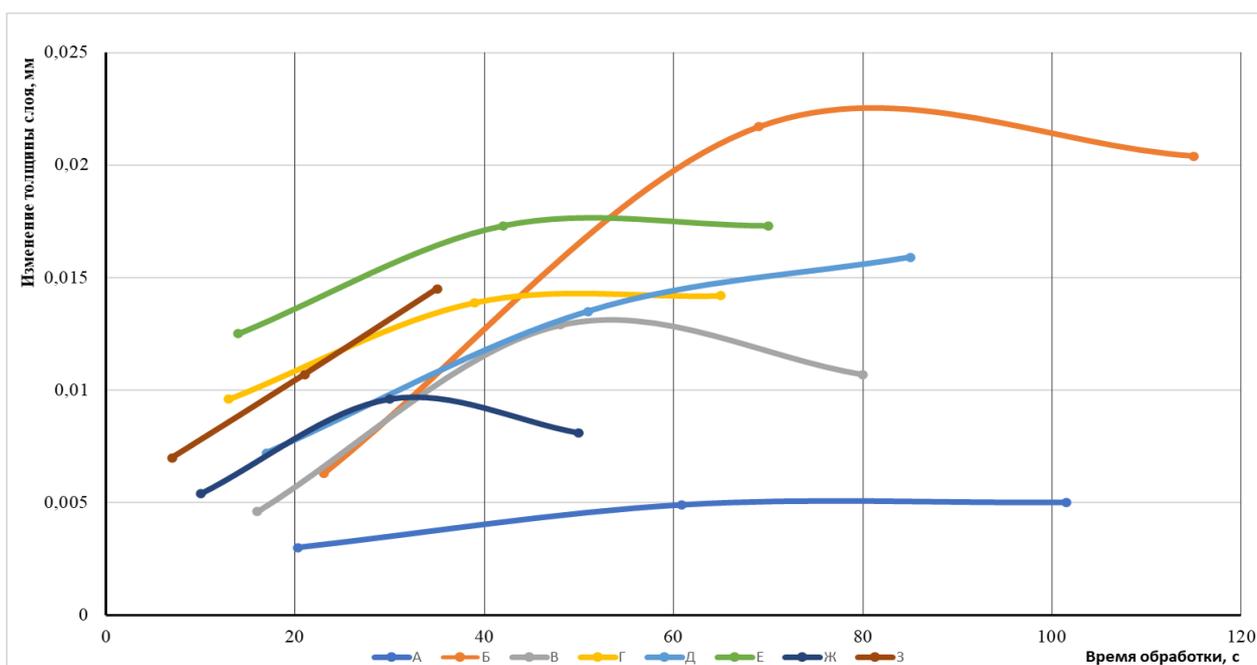


Рис. 3. Изменение толщины покрытия при $f_{разр} = 100$ Гц (const)

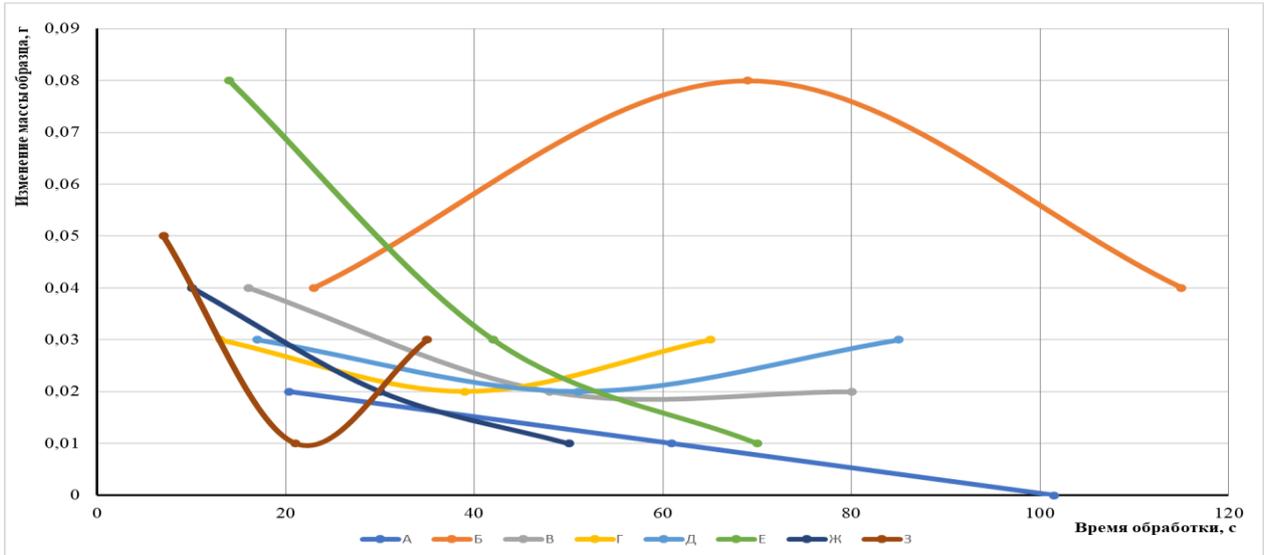


Рис. 4. Изменение массы образца при $f_{разр} = 100 \text{ Гц (const)}$

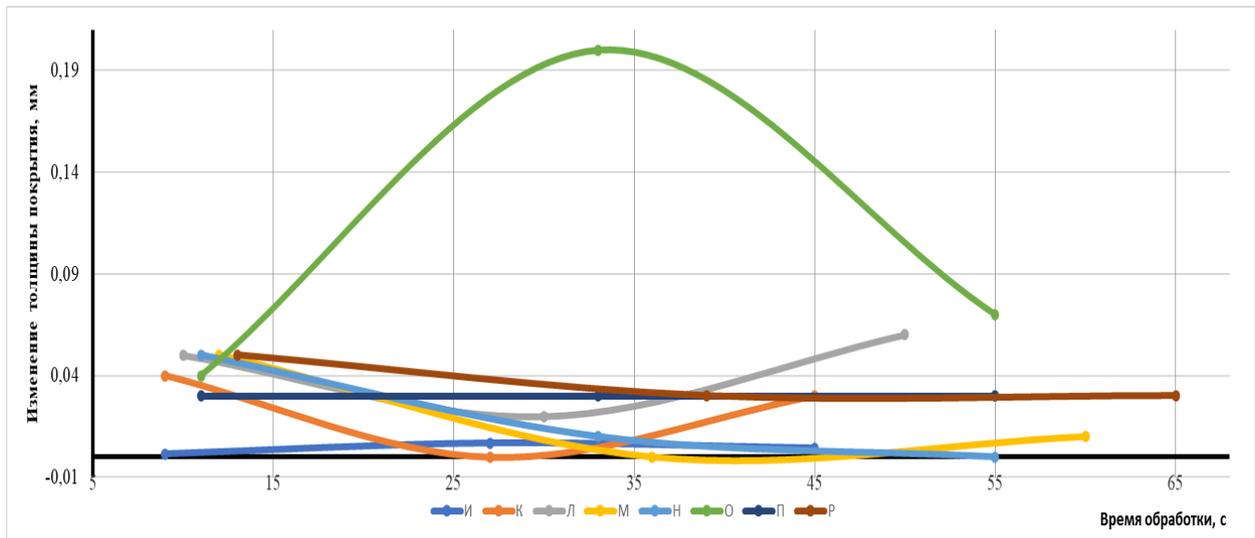


Рис. 5. Изменение толщины покрытия при $f_{разр} = 150 \text{ Гц (const)}$

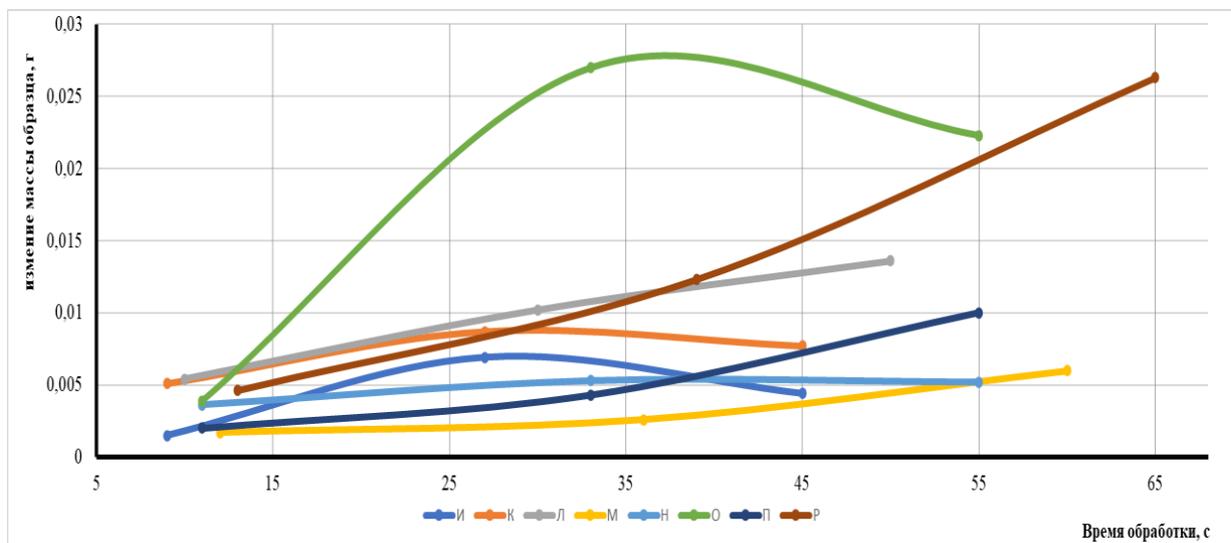


Рис. 6. Изменение массы образца при $f_{разр} = 150 \text{ Гц (const)}$

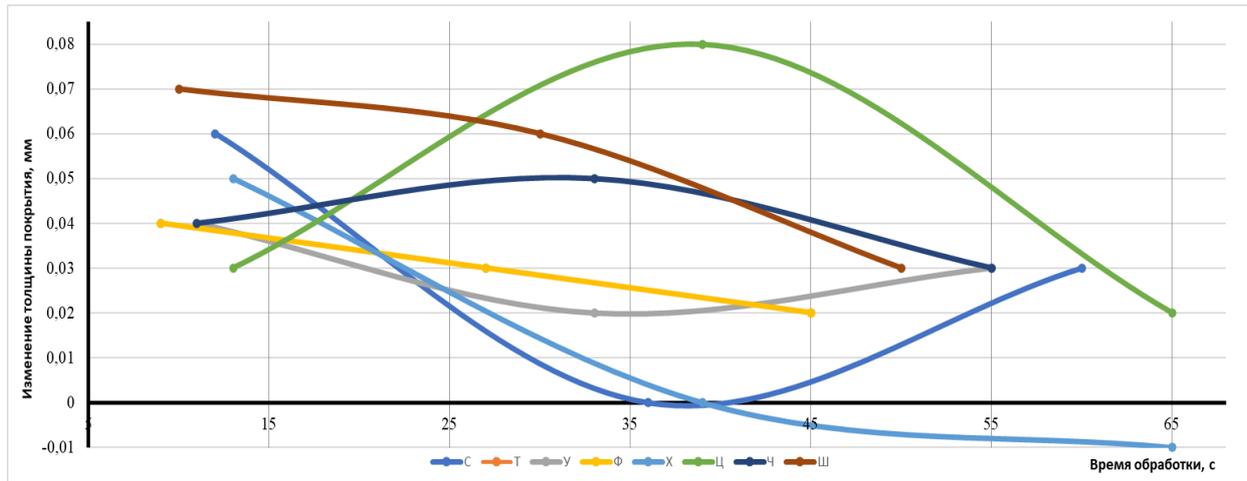


Рис. 7. Изменение толщины покрытия при $f_{разр} = 300 \text{ Гц} (const)$

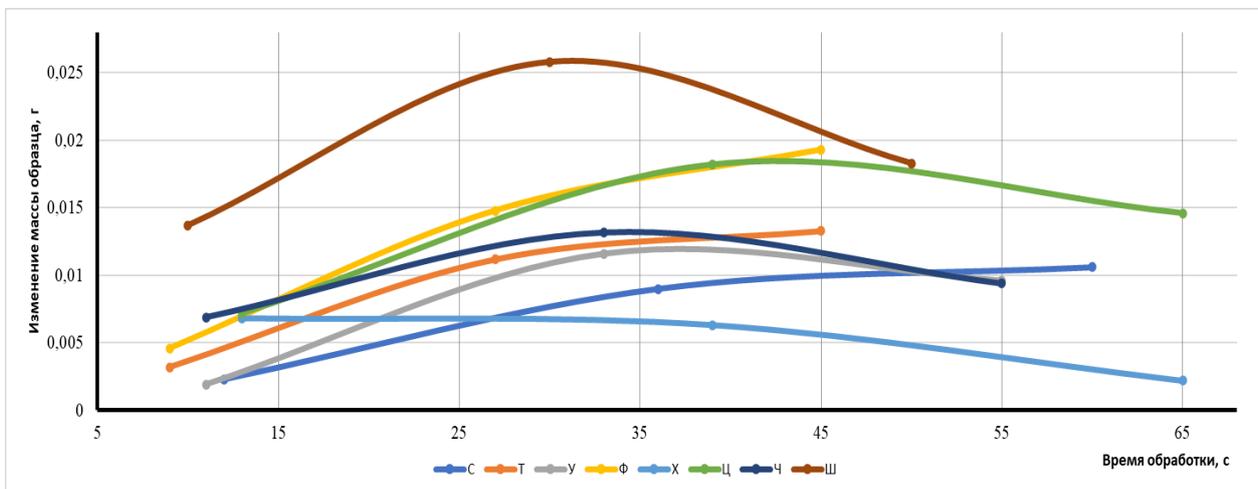
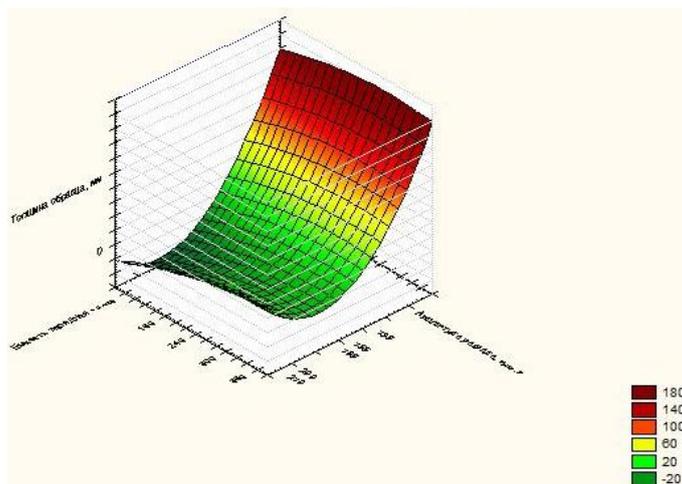
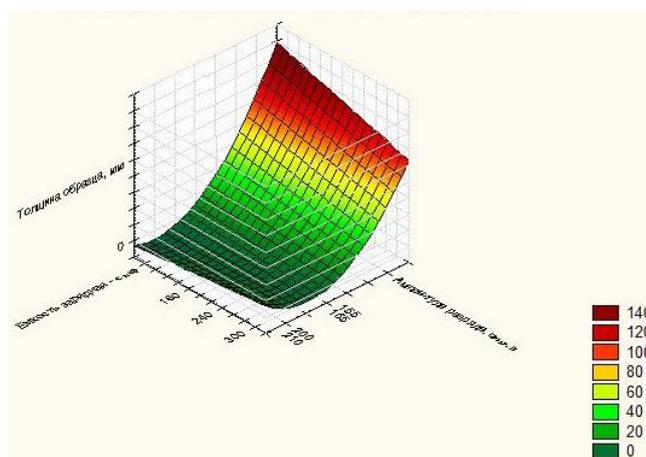
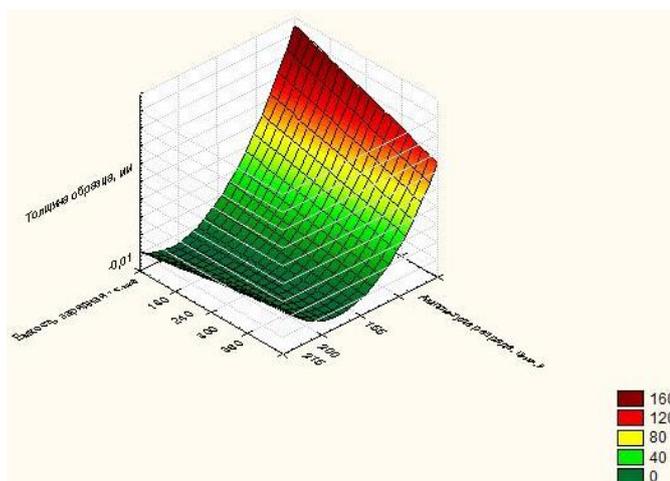


Рис. 8. Изменение массы образца при $f_{разр} = 300 \text{ Гц} (const)$

Обработав полученные данные при помощи пакета программ статистической обработки данных Statistica 6.1 для каждого из исследуемого параметра Δm и Δt в зависимости от изменения характеристик $f_{разр}$, $U_{разр}$ и $C_{разр}$, были составлены уравнения регрессии. По результатам испытаний построены поверхности отклика $U_{разр} - C_{разр} - \Delta m$ и $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$ при $f_{разр}$ 100; 150 и 300 Гц. Поверхности отклика в рамках одних частот показали идентичное строение. Поверхности отклика и $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$ при $f_{разр}$ 100; 150 и 300 Гц представлены на рис. 9-11.

При сравнительном анализе поверхностей отклика при частотах импульса $f_{разр}$ 100, 150 и 300 Гц заметна схожесть поверхностей. Видно, что максимальные значения

приращения по массе и толщине покрытия на стальных образцах наблюдались при малых значениях амплитуды разряда $U_{разр}$. Увеличение амплитуды разрядов способствует монотонному снижению массы и толщины покрытия, в интервале 180...200 В при частотах импульса 150 и 300 Гц прироста толщины покрытия и массы образца не наблюдается и имеют нулевые значения. При частоте импульсов 100 Гц присутствуют отрицательные значения прироста массы и толщины, т.е. наблюдается эрозия покрытия. Однако увеличение зарядной емкости при частоте импульсов $f_{разр}$ 100 Гц способствует некоторому увеличению массы и толщины покрытия, в то время как при частотах импульса $f_{разр}$ 150 и 300 Гц наблюдается снижение данных параметров.

Рис. 9. Поверхность отклика $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$ при $f_{разр} = 100 \text{ Гц}$ Рис. 10. Поверхность отклика $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$ при $f_{разр} = 150 \text{ Гц}$ Рис. 11. Поверхность отклика $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$ при $f_{разр} = 300 \text{ Гц}$

Исходя из вышеизложенного, наилучшие показатели по массопереносу и толщине полученного покрытия наблюдаются:

- при частоте импульса $f_{разр}$ 100 Гц, амплитуде разряда $U_{разр}$ от 1 до 180 В и емкости заряда $C_{разр}$ от 240 до 360 мкФ;

- при частоте импульса $f_{разр}$ 150 Гц, амплитуде разряда $U_{разр}$ от 1 до 140 В и емкости заряда $C_{разр}$ от 1 до 250 мкФ;

- при частоте импульса $f_{разр}$ 300 Гц, амплитуде разряда $U_{разр}$ от 1 до 150 В и емкости заряда $C_{разр}$ от 1 до 240 мкФ.

Ввиду дискретности параметров, задаваемых установкой электроискровой обработки производить наплавку при частотах импульса 150 и 300 Гц выявленных оптимальных параметрах, не представляется возможным. Таким образом, оптимальным режимом для электроискровой наплавки стальных образцов электродами из спеченной электроэрозионной бронзы является режим со следующими параметрами: частота импульса $f_{разр} = 100$ Гц, амплитуда разряда $U_{разр}$ от 1 до 180 В и емкость заряда $C_{разр}$ от 240 до 360 мкФ. В данные параметры укладывается условный режим «Д», имеющий значения амплитуды раз-

ряда $U_{разр} = 160$ В, емкости заряда $C_{разр} = 300$ мкФ, частоты импульса $f_{разр} = 100$ Гц, рабочего тока $I_p = 13$ А.

5. Выводы

В результате проведенных исследований по выбору режимов электроискровой обработки на установке мод. «Вестрон» тип АИ-007 стальных образцов электродами из спеченной бронзы, полученной методом электроэрозионного диспергирования из отходов машиностроительных производств, определено следующее: наиболее постоянно и без потерь осуществлялся процесс переноса материала на поверхность образца на условном режиме «Д» при $U_{разр} = 160$ В, $C_{разр} = 300$ мкФ, $f_{разр} = 100$ Гц, $I_p = 13$ А. Такой режим электроискровой обработки обеспечивает требуемое качество и толщину покрытия при восстановлении неподвижных соединений.

Список литературы

1. Иванов В.И. Электроискровое легирование при производстве, обслуживании и ремонте техники: перспективы // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 133-139.
2. Иванов В.И. Об использовании и развитии метода электроискрового легирования в России // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 196-207.
3. Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Прядко Л.Ф., Коневцов Л.А. Электродные материалы при ЭИЛ: влияние на эрозию и свойства легированного слоя и критерии оценки эффективности // Технический сервис машин. 2018. Т. 131. С. 209-222.
4. Агеева Е.В., Зубарев М.В. Установка для получения порошковых материалов, пригодных для технологических процессов восстановления и упрочнения деталей // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 129. С. 169-173.
5. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. Возможность переработки медных отходов в порошки электроэрозионным диспергированием // Технические науки – от теории к практике.

References

1. Ivanov V.I. Electrospark alloying in the production, maintenance and repair of equipment: prospects. *Trudy GOSNITI*, 2016, Vol. 122, pp. 133-139. (In Russian).
2. Ivanov V.I. On the use and development of the method of electrospark alloying in Russia. *Trudy GOSNITI*, 2018, Vol. 130, pp. 196-207. (In Russian).
3. Verhoturov A.D., Ivanov V.I., Pryadko L.F., Konevcov L.A. Electrode materials for ESA: influence on erosion and properties of the alloyed layer and criteria for evaluating efficiency. *Tekhnicheskij servis mashin*, 2018, Vol. 131, pp. 209-222. (In Russian).
4. Ageeva E.V., Zubarev M.V. Installation for obtaining powder materials suitable for technological processes of restoration and strengthening of parts. *Trudy GOSNITI*, 2017, Vol. 129, pp. 169-173. (In Russian).
5. Ageev E.V., Ageeva E.V., Hor'yakova N.M., Malyuhov V.S. Possibility of processing copper waste into powders by electroerosive dispersion. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*, 2014, No.32, pp. 50-55. (In Russian).

2014. №32. С. 50-55.

6. Сяменчик Т.А., Матренин С.В. Получение опытных образцов из нанодисперсных порошков методом искрового плазменного спекания // Современные проблемы машиностроения: Сб. научн. тр. VII Междуна. научно-техн. конф. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2013. С. 131-135.

7. Иванов В.И., Костюков А.Ю. Электроискровое нанесение покрытий // РИТМ машиностроения. 2016. № 10. С. 36-43.

8. Кудряшова Е.Ю., Шемберев И.А., Задорожний Р.Н. Наноструктурирование поверхностного слоя методом электроискрового легирования // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 113-121.

9. Задорожний Р.Н., Кудряшова Е.Ю., Решиков Е.О. Структура поверхностного слоя малоуглеродистой стали после электроискровой обработки // Молодежь и XXI век-2019: Мат. IX Междунар. молодежной научн. конф. 2019. С. 108-111.

10. Романов И.В., Задорожний Р.Н., Мартиросян А.Т. Исследование гранулометрического состава, формы и морфологии частиц бронзового порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сб. тр. Междунар. научно-техн. конф., посв. 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. М. 2019. С. 265-268.

11. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Математическое моделирование структурно-энергетического состояния поверхности при электроискровом легировании // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 42-47.

6. Syamenchik T.A., Matrenin S.V. Production of prototypes from nanodispersed powders by the method of spark plasma sintering. In: *Sovremennye problemy mashinostroeniya. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnyj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii.* Tomsk, Natsionalnyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskij universitet, 2013, pp. 131-135. (In Russian).

7. Ivanov V.I., Kostyukov A.YU. Electrospark coating. *RITM mashinostroeniya*, 2016, No.10, pp. 36-43. (In Russian).

8. Kudryashova E.YU., SHemberev I.A., Zadorozhnyj R.N. Nanostructuring of the surface layer by electrospark alloying. *Tekhnicheskij servis mashin*, 2020, No.1 (138), pp. 113-121. (In Russian).

9. Zadorozhnyj R.N., Kudryashova E.YU., Reshchikov E.O. Structure of the surface layer of mild steel after electrospark treatment. In: *Molodezh i XXI vek-2019: Materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii*, 2019, pp. 108-111. (In Russian).

10. Romanov I.V., Zadorozhnyj R.N., Martirosyan A.T. Investigation of the particle size distribution, shape and morphology of particles of bronze powder obtained by the method of electroerosive dispersion. V sbornike: *Innovacionnye tekhnologii renovacii v mashinostroenii.* In: *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 150-letiyu fakulteta «Mashinostroitelnye tekhnologii» i kafedry «Tekhnologii obrabotki materialov» MGTU im. N.E. Baumana.* Moscow, 2019, pp. 265-268. (In Russian).

11. Korotaev D.N., Ivanova E.V. Mathematical modeling of the structural and energy state of the surface during electrospark alloying. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2017, Vol. 7, No.3(24), pp. 42-47. (In Russian).