

Об электроискровом способе нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности

В. И. Иванов, **Ф. Х. Бурумкулов**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский технологический институт
ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» (ФГБНУ ГОСНИТИ),
1-й Институтский проезд, д. 1, г. Москва, 109428, Россия, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Рассматривается актуальная проблема увеличения толщины электроискровых покрытий повышенной контактной сплошности. Приводятся результаты экспериментальных работ по формированию на стальной поверхности толстослойных покрытий повышенной сплошности с использованием электродов из сплава Х20Н80, стали ШХ15 и бронзы БрКМц3-1. В основу обработки положено чередование операций «нанесение – оплавление», выполняемых электроискровой обработкой.

Ключевые слова: электроискровая обработка, технология, покрытие, поверхность, рельеф, выступ, толщина, контактная сплошность, прирост массы, установка.

УДК 621.9.048.4

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно существенными недостатками электроискровой обработки (ЭИО) в газовой среде считаются малая толщина наносимого покрытия и высокая шероховатость поверхности, что ограничивает применение данного метода. На это обращали внимание еще в 50–60-х годах прошлого века создатели ЭИО Б.Р. и Н.И. Лазаренко.

Существуют разные мнения о причинах ограниченной толщины электроискровых (ЭИ) покрытий. К ним, в частности, относят превышение сверхкритических значений остаточных растягивающих напряжений в покрытии, образование на его поверхности дефектного окисленного слоя и др. Известны и применяются на практике ряд технических решений, позволяющих увеличить толщину покрытий до 2–3 раз. Это работа в вакууме, в защитных средах, активация поверхности механическим путем, удаление механической обработкой верхнего дефектного слоя покрытия, чередование процесса ЭИО на условно жестких и мягких электрических режимах, механизированное нанесение покрытий со строго нормированными технологическими параметрами и т.п. [1–7 и др.].

Однако перечисленные решения не универсальны, часто связаны с усложнением условий обработки, необходимостью применения других методов обработки и дополнительного оборудования, порой ограничены формой поверхности обработки, материалом обрабатываемой детали и др. И, как правило, они характеризуются низкой контактной сплошностью поверхности покрытия, то есть малой опорной поверхностью. Последнее резко ограничивает практическое применение ЭИО в машиностроении и ремонтном

производстве. Поэтому увеличение толщины ЭИ покрытий с одновременным повышением контактной сплошности является актуальной проблемой.

Цель работы – разработка универсального способа нанесения толстослойных (более 1 мм) ЭИ покрытий с повышенной (не менее 75%) контактной сплошностью, определяемой по относительной длине опорной поверхности [8].

Гипотеза

Работа основана на гипотезе о возможности преодоления размерного барьера и увеличения толщины ЭИ покрытий путем применения только ЭИО в несколько циклов, включающих **операции обработки для повышения контактной сплошности поверхности** после предыдущего цикла.

Поясним это графически.

Три варианта одинаковых фрагментов рельефа поверхности, образованной ЭИО (рис. 1), подвергнуты различным видам последующей обработки: механической (а), например шлифование; ЭИО электродом, одноименным с операцией нанесения (б) и ЭИО с оплавлением и осадкой (в). Реализуя известные приемы частичного удаления верхнего слоя покрытия на величину $(0,5-1,0)H_{e\max}$ (где $H_{e\max}$ – максимальная высота выступов), обеспечиваем механической обработкой (рис. 1а) или ЭИО (рис. 1б) повышение контактного пятна единичного выступа до значений $l_{\text{мех}}$ и $l_{\text{эио}}$ и соответственно контактной сплошности всей поверхности. Таким образом, создаем условия для дальнейшего роста толщины слоя при последующей ЭИО. Но видно, что рост этих конусообразных выступов также ограничен, так как не заполняется наносимым материалом пространство между выступами.

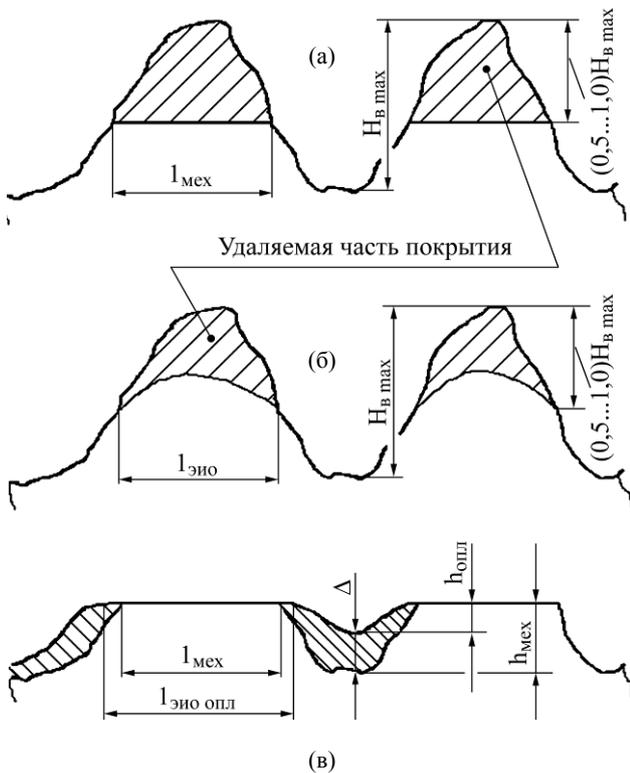


Рис. 1. Характер изменения рельефа поверхности электроискрового покрытия в результате последующей обработки: (а) – механической; (б) – электроискровой на режиме меньшей мощности; (в) – электроискровой с оплавлением и осадкой.

Указанное препятствие преодолевается при условии частичного или полного заполнения впадин между выступами. Это реализуется, например, при оплавлении с осадкой (в дальнейшем – оплавление) выступов или их пластической деформации. В рассматриваемом примере (рис. 1в) методом ЭИО производим оплавление покрытия до того же уровня, что и в примерах – рис. 1а,б. Видим результат: свободное пространство между выступами сокращается – см. заштрихованные области. Из сравнения этих вариантов следует, что в последнем случае, то есть при ЭИО с оплавлением, глубина лунок поверхности уменьшается в сравнении с первыми двумя вариантами на величину

$$\Delta = h_{\text{мех}} - h_{\text{опл}}. \quad (1)$$

Это обеспечивает увеличение опорной поверхности (контактной плоскости), то есть $l_{\text{эио опл}} > l_{\text{мех}}$.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для проведения экспериментальных работ по ЭИО с целью проверки описанной выше гипотезы выбрана универсальная установка нового поколения «БИГ-5» с широким диапазоном электрических режимов (табл. 1), работающая в ручном режиме.

Нанесение покрытий производилось на электрическом режиме с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц, а оплавление – 10 Дж и 50 Гц соответственно.

При выборе *основных электродов* (анод) для получения качественных ЭИ покрытий повышенной толщины руководствовались накопленным предыдущим опытом [1–7 и др.], а также известным положением о необходимости применения электродных материалов, создающих с материалом основы (катод) неограниченные твердые растворы. Дополнительно учитывалось также условие, что материал электрода должен обладать пониженной склонностью к окислоразованию.

Согласно указанному, выбраны нихром (Х20Н80), сталь ШХ15 и бронза БрКМц3-1, значительно отличающиеся по химическому составу и свойствам, что создает основу для применения покрытий в широкой области (табл. 2).

Сочетание выбранных электрических режимов обработки и электродных материалов обеспечивало жидко-капельный характер переноса их на катод.

Основные требования к материалу *электрода для выполнения операции оплавления*, обеспечивающие эффективность обработки и минимальное влияние на химический состав формируемого покрытия, – это высокие теплопроводность и электроэрозионная стойкость. Последняя зависит от теплофизических свойств металла. Согласно исследованиям Б.Н. Золотых [12, см. табл. 4, с. 47], металлы по исчисленной величине эрозии катода и анода располагаются в следующем порядке: Sn, Cd, Pb, Zn, Al, Ag, Cu, Ni, Co, Fe, Mo, W. Наибольшая эрозия – у олова, наименьшая – у вольфрама. В этом же порядке располагаются указанные металлы по температуре плавления: у олова – 231,9°C, у вольфрама – 3357°C. К материалам с высокой эрозионной стойкостью относится также графит, его температура плавления составляет 3540°C.

По теплопроводности (λ , ккал/(м·час·°C)) материалы из приведенного ряда располагаются в следующем порядке: Ag (360), Cu (335), Al (180), C (150), W (145), Mo (121) и т.д. [13]. Исходя из указанного, наиболее целесообразны в общем случае для выполнения функции оплавления следующие материалы электродов: вольфрам, медь, графит.

Для выполнения операции оплавления нами были выбраны электроды из меди М1.

Экспериментальные работы включали следующее:

1) ЭИО образцов из конструкционной стали Ст.10 размерами $\varnothing 60 \times 7$ мм. При этом обработка образцов производилась по разным технологиче-

Таблица 1. Основные технические характеристики установки «БИГ-5»

	Параметры	Значения параметра
	Потребляемая мощность, кВА	0,5
	Напряжение питающей сети, В ($\pm 10\%$) при частоте (50 ± 1) Гц	220
	Частота вибрации электрода, Гц	600
	Энергия импульсов, Дж	0,11–10
	Частота импульсов, Гц	5–1600
	Количество электрических режимов	70

Таблица 2. Химический состав, некоторые свойства и области применения материалов

Характеристики	X20H80 [9]	ШХ15 [10]	БрКМц3-1 [11]
Химический состав	C – $\leq 0,10$; Si – $0,9–1,5$; Mn $\leq 0,7$; S $\leq 0,020$; P $\leq 0,03$; Cr – $20,0–23,0$; Ni – остальное; Ti $\leq 0,30$; Al $\leq 0,20$; Fe $\leq 1,5$	C – $0,95–1,05$; Si – $0,17–0,37$; Mn – $0,20–0,40$; S $\leq 0,020$; P $\leq 0,027$; Cr – $1,30–1,65$; Ni $\leq 0,30$; Cu $\leq 0,25$	Cu – $96,0$; Si – $3,0$; Mn – $1,0$
Характерные свойства	Высокое электрическое сопротивление	Износостойкая, коррозионностойкая, высокое сопротивление сжатию	Коррозионностойкая, пригодна для сварки, жаропрочная, высокое сопротивление сжатию
Область применения	Изготовление ответственных деталей внутривакуумных приборов, соединителей в изделиях электронной техники, для прецизионных резисторов	Изготовление колец, шариков и роликов подшипников	Детали всех видов для химических аппаратов, пружины и пружинящие детали; детали для судостроения, а также сварных конструкций

ским вариантам на каждом из четырех отдельных секторах площадью $3,5 \text{ см}^2$;

2) определение изменения толщины Δh образца с использованием микрометра МК 0–25 мм с точностью до $0,01 \text{ мм}$;

3) определение изменения массы образцов катода Δm_k и электродов-анодов Δm_a с использованием аналитических весов с точностью до $0,0001 \text{ г}$;

4) определение контактной сплошности по величине относительной длины опорной поверхности t_p (в %) согласно ГОСТ 2789-73 с применением профилографа-профилометра модели «201».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведена многоцикловая ЭИО стальных образцов нихромом X20H80, сталью ШХ15 и бронзой БрКМц3-1. При этом каждый цикл состоял из нанесения основного материала и оплавления сформированного слоя медью. Результаты обработки приведены в табл. 3.

Как видно из таблицы, в результате первых операций H с использованием нихрома, стали и бронзы, выполненных при соответствующих значениях удельного времени τ 12, 17, 17 с/см², получены покрытия, нанесенная толщина кото-

рых составляет 1,61, 2,05 и 1,88 мм. Во всех трех случаях поверхность имеет бугристый вид (рис. 2, операции 1). Очевидно, дальнейшая обработка без изменения технологии ЭИО не улучшит существенно характеристик покрытий, то есть толщины и шероховатости.

Следующей операцией (О), выполненной медью по нанесенным покрытиям, удалена часть слоев последних. Это отразилось в уменьшении соответственно на 5, 6 и 7% значений прироста массы после 1-й операции, а также в снижении толщины нанесенного слоя. При этом степень снижения толщины слоев (соответственно 61, 45 и 69%) существенно выше, чем их массы. Последнее свидетельствует о перераспределении объемов, что подтверждается заметным снижением бугристости, увеличением контактной сплошности (рис. 2, операции 2).

Дальнейшая обработка связана с повторением циклов «нанесение – оплавление». Как видно из табл. 3, результатом каждого цикла является непрерывный прирост массы и толщины образца. Эта серия экспериментов была закончена после подтверждения выдвинутой гипотезы на примере указанных материалов электродов и получения зависимостей прироста массы образцов и их толщины от числа циклов, то есть времени обработки (рис. 3). На этом этапе с применением ука-

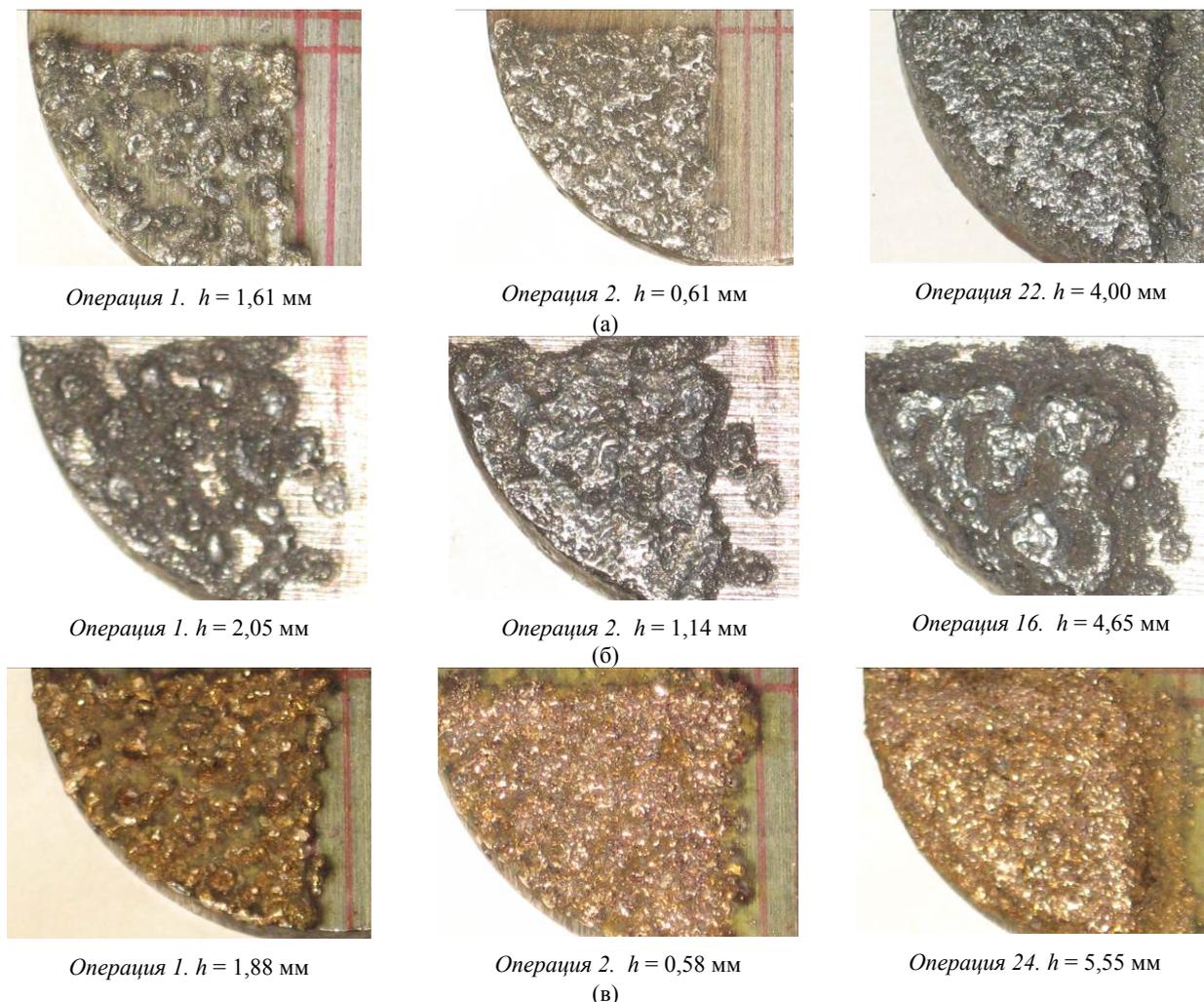


Рис. 2. Изменение поверхности при многоцикловой ЭИО комбинацией электродов: (а) – X20H80 – медь М1; (б) – сталь ШХ-15 – медь М1; (в) – бронза БрКМц 3-1 – медь М1.

занных электродов были достигнуты значения толщины повышенной сплошности – соответственно 4,00, 4,65 и 5,55 мм.

Из рис. 3 видно, что, несмотря на значительное количество выполненных циклов обработки, тенденция роста массы образцов и толщины покрытий сохраняется для выбранных электродных материалов, хотя их характеристики значительно различаются. Очевидно, продолжение обработки позволит получать покрытия больших толщин. Подтверждением этого может служить 10 мм ЭИ трехслойное покрытие «нихром – БрКМц3-1 – нихром» (рис. 4). Однако на практике рациональность этого зависит от экономических показателей использования такого технологического приема.

Проведение профилографирования поверхностей толстослойных покрытий показало, что относительная длина опорной поверхности на 5% уровне составляла не ниже 80%.

Экспериментально установлено, что этот принцип эффективен также для механизированной обработки и ручного режима.

Описанное техническое решение, защищенное евразийским патентом [14], более двух лет успешно применяется сотрудниками лаборатории № 11 ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии при выполнении работ, связанных с восстановлением ответственных деталей при устранении локальных дефектов значительной глубины, в частности коленчатых валов, блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания, штоков гидроцилиндров, деталей тестоделителей и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили действенность технического решения согласно гипотезе о возможности значительного увеличения толщины покрытий на основе использования только ЭИО, без создания специальных условий. Впервые получены толстослойные покрытия с высокой контактной сплошностью без применения других методов обработки. Предложенный способ ЭИО обладает значительной перспективой практического применения и требует дальнейших исследований.

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований по электроискровому нанесению толстослойных покрытий повышенной сплошности

№ цикла/ операции	Функция ЭИО (Н – нанесение, О – оплавление)	Прирост массы образца (в г) для наносимых материалов электродов			Прирост толщины образца (в мм) для наносимых материалов электродов*		
		X20H80	ШХ-15	БрКМц3-1	X20H80	ШХ-15	БрКМц3-1
1	2	3	4	5	6	7	8
Материал электрода для выполнения функции оплавления и осадки – Cu (медь)							
1/1	Н	0,8740	1,3060	1,4380	1,61	2,05	1,88
1/2	О	0,8300	1,2250	1,3370	0,61	1,14	0,58
2/3	Н	1,5950	2,2440	2,3500	1,86	2,10	2,13
1	2	3	4	5	6	7	8
2/4	О	1,4020	2,1560	2,2790	1,06	1,69	1,01
3/5	Н	1,8410	3,0960	3,1650	1,76	2,66	2,53
3/6	О	1,6880	3,0310	3,1060	1,01	2,75	1,21
4/7	Н	2,2860	3,8470	4,0490	2,26	2,78	3,23
4/8	О	2,0100	3,7550	3,9160	1,19	2,77	1,59
5/9	Н	2,6760	4,6590	5,4920	2,36	3,20	3,46
5/10	О	2,4490	4,5940	5,3560	1,45	3,16	2,33
6/11	Н	3,5900	5,3080	6,6440	2,96	3,85	3,98
6/12	О	3,2170	5,2260	6,4740	2,06	3,85	2,72
7/13	Н	4,6090	6,1360	7,4750	3,79	4,55	4,13
7/14	О	4,2138	6,0540	7,3290	2,51	4,30	3,06
8/15	Н	5,6340	7,1990	8,4900	4,68	5,08	4,53
8/16	О	5,0100	7,1200	8,3290	3,04	4,65	3,34
9/17	Н	6,1330		9,6800	4,10		4,88
9/18	О	5,8900		9,5350	3,14		3,67
10/19	Н	7,7450		11,1920	4,24		5,32
10/20	О	7,7970		11,0620	3,87		4,75
11/21	Н	8,3610		13,0430	4,96		5,93
11/22	О	8,1330		13,1920	4,00		4,99
12/23	Н			14,6700			6,65
12/24	О			14,4630			5,55
Суммарное (удельное) время обработки, мин (мин/см ²)		52 (14,9)	18 (5,2)	54 (15,4)	52 (15)	18 (5,2)	54 (15,4)

* Прирост толщины образца после операции оплавления измерялся при достижении контактной сплошности не менее 80%.

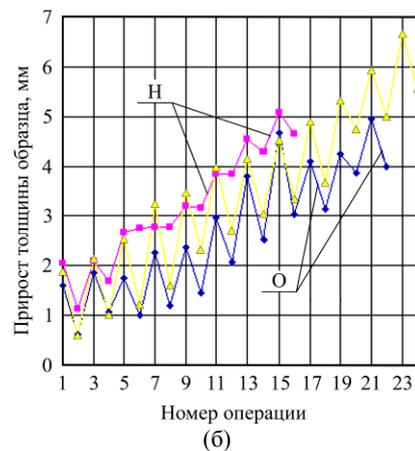
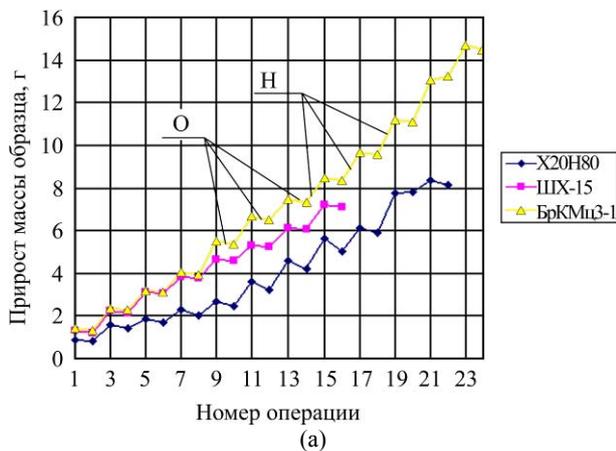


Рис. 3. Динамика формирования толстослойных покрытий повышенной сплошности: (а) – изменение прироста массы образца; (б) – изменение прироста толщины образца (Н – нанесение; О – оплавление с осадкой).



Рис. 4. Примеры толстослойных покрытий повышенной сплошности: 1 – бронза БрКМц3-1 – толщина 4,5 мм; 2 – нихром (X20H80) – толщина 4,7 мм; 3 – сталь 65Г – толщина 5,7 мм; 4 – нихром (3,9 мм) + БрКМц3-1 (+3,2 мм) + нихром (+3,1 мм) + Т15К6 (+0,1 мм) – общая толщина 10,3 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Физика электроискрового способа обработки материалов*. М.: ЦБТИ МЭП, 1946. 76 с.
2. Лазаренко Н.И. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. М.: Машиностроение, 1976. 44 с.
3. Верхотуров А.Д., Сычев В.С. О закономерностях формирования поверхности катода при электроискровом легировании металлических поверхностей переходными металлами. *ЭОМ*. 1971, (4), 21–27.
4. Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я., Игнатков Д.А. Об ограничении толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования. *ЭОМ*. 1981, (3), 25–29.
5. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Киев: Наукова думка, 1976. 220 с.
6. Мулин Ю.И. *Способ электроискрового упрочнения поверхностей стальных деталей*. Патент на изобретение № 2279337.
7. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)*. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
8. *Геометрические параметры и физико-механические свойства поверхностей, образованных при электроискровой обработке материалов в газовой среде*. Руководящий документ РД 10.003-2009. Бурумкулов Ф.Х., Сенин П.В., Величко С.А., Иванов В.И., Ионов П.А., Раков Н.В., Мартынов А.В. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. 44 с.
9. ГОСТ 10994-74. *Сплавы прецизионные. Марки*.
10. ГОСТ 801-78. *Сталь подшипниковая. Технические условия*.
11. ГОСТ 18175-78. *Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. Марки*.
12. Золотых Б.Н. *Физические основы электроискровой обработки материалов*. М.: Госиздат технической литературы, 1953. 107 с.
13. *Теплофизические свойства веществ*. Справочник под ред. проф. Н.Б. Варгафтика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 368 с.
14. *Электроискровой способ нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности*. В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов, В.А. Денисов Евразийский патент № 0177066.

Поступила 21.05.13

Summary

The article is devoted to the problem of increasing the thickness of the electrodeposited coatings of an increased contact continuity. The results of experiments on the formation of thick coatings of increased continuity on the steel surface, using electrodes of the H20N80 alloy, of steel SH15 and bronze BrKMts3-1, are given. The basis of the treatment is the alternation of “deposition – flowing” operations performed by the electrical discharge machining (EDM).

Keywords: electrical discharge machining, technology, coating, surface, shape, lip, thickness, continuity of contact, weight gain, installation.