

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ УВЕЛИЧЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

С. И. Ловыгин<sup>1</sup>, Н. М. Чигринова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОХП «Институт сварки и защитных покрытий», ул. Платонова, 126, 220005, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 20.07.2017 г.

*В статье приведены результаты исследований процесса формирования электроискровых покрытий увеличенной толщины с дополнительным ультразвуковым воздействием. Показано, что применение ультразвукового воздействия при нанесении покрытий увеличенной толщины (метод нанесения – оплавления) оправдано в операциях оплавления покрытия. Установлено, что для получения качественных толстослойных покрытий необходимо обеспечить эрозию материала анода преимущественно в жидко-капельной фазе.*

**Введение.** Одним из способов восстановления утраченных в процессе эксплуатации служебных свойств деталей машин и механизмов, улучшения эксплуатационных характеристик и повышения ресурса является электроискровая обработка изношенных рабочих поверхностей – электроискровое легирование (ЭИЛ). Метод ЭИЛ позволяет наносить покрытия на обрабатываемую поверхность компактным электродом из любого токопроводящего материала, имеет малую энергоемкость. Сформированные электроискровые покрытия обладают высокой прочностью сцепления с материалом основы. Одним из недостатков метода является малая толщина наносимого покрытия, поскольку при действии искровых разрядов в поверхностных слоях образуются крайне неравновесные фазы, возникают большие внутренние напряжения, соизмеримые с допускаемыми, их накопление может приводить к хрупкому разрушению, что сужает сферу его применения [1, 2].

В настоящее время проблема увеличения толщины электроискровых покрытий находит свое решение. В ФГБНУ ГОСНИТИ (Россия) были получены толстослойные покрытия повышенной сплошности в результате применения чередующихся циклов нанесения грубых покрытий с высокой неровностью профиля поверхности и циклов оплавления до выравнивания профиля поверхности с уменьшением высоты этих неровностей не менее чем на 50 %. При

этом оплавление неровностей профиля осуществлялось с использованием электродных материалов с повышенными теплопроводностью и эрозионной стойкостью по отношению к электродному материалу, формирующему покрытие. Для проведения экспериментальных работ применялась установка «БИГ-5» с частотой вибрации электрода 600 Гц [3].

Цель данной работы – определение влияния **ультразвукового воздействия** на процесс формирования электроискровых покрытий увеличенной толщины и сплошности. Использование ультразвука активизирует поверхности анода и катода, интенсифицируя тем самым диффузионные потоки и стабилизируя их, уплотняет и выравнивает поверхность, на которой в процессе ультразвукового легирования формируется более равномерный и однородный слой более мелких (благодаря ультразвуку) капель материала анода [4].

**Методика исследования.** Исследования осуществляли с использованием установки «Alier-55», являющейся аналогом установки «БИГ-5» и ультразвукового устройства, разработанного в секторе электрофизических покрытий ОХП ИСЗП, состоящего из генератора, блока питания и ультразвукового преобразователя (рис. 1).

Для определения эффективности влияния ультразвукового воздействия на процесс формирования покрытий увеличенной толщины были выбраны следующие энергетические режимы установки «Alier-55»:

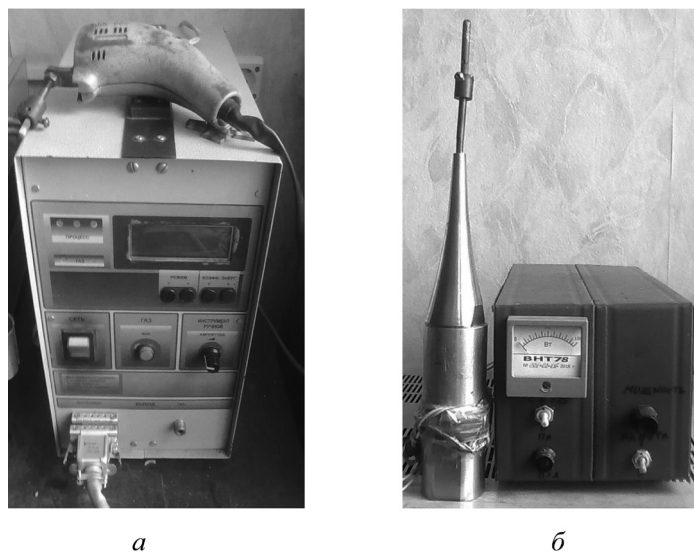


Рис. 1. Установки для электроискрового легирования: а – установка «Alier-55»; б – УЗ-устройство

нанесение покрытий без применения УЗВ производилось с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц, так как для получения качественных толстослойных покрытий необходимо обеспечить эрозию материала анода преимущественно в капельно-жидкой фазе и по возможности уменьшить содержание в продуктах эрозии паровой фазы, распыляющей капельно-жидкую [5], промежуточные операции оплавления покрытия производились с энергией импульсов 10 Дж при частоте следования 50 ГЦ. В обоих случаях частота колебаний электрода-анода составляла 600 Гц;

нанесение покрытий с применением УЗВ производилось с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц, промежуточные операции оплавления покрытия осуществлялись с энергией импульсов 10 Дж при частоте следования 50 ГЦ. В обоих случаях частота колебаний электрода-анода 22 кГц задавалась генератором ультразвукового устройства.

В качестве образцов-катодов применялись пластинки размером  $30 \times 30 \times 4$  из конструкционной стали – сталь 45.

В качестве легирующих анодов использовались электроды из стали Р6М5 ГОСТ 19265-73. Диаметр электрода-анода из прутка – 3,4 мм.

Для определения изменения массы образцов-катодов использовался гравиметрический метод. Измерение массы катода проводили через каждую минуту легирования при помощи весов аналитических марки АДВ-200 с погрешностью  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  г.

Определение изменения толщины образцов-катодов осуществлялось с использованием микрометра МК 0-25 с точностью до 0,01 мм.

Топография поверхности образцов определялась с помощью стереоскопического панкратического микроскопа «Альтами СМ 0745».

**Результаты исследований и их обсуждение.** Была проведена многоцикловая электроискровая обработка стальных образцов сталью Р6М5. При этом каждый цикл состоял из нанесения основного материала и оплавления сформированного слоя. Результатом каждого цикла являлся непрерывный прирост массы и толщины образцов.

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 [6]. Для выполнения операции оплавления в ходе работ по этапу были выбраны электроды из меди М1.

Несмотря на значительное количество циклов обработки, в данном случае – 14 циклов, длительностью 1 минута каждый, тенденция роста массы и толщины образцов сохранялась. По-видимому, энергетические режимы мощностью 4,3 и 10 Дж, обеспечивающие жидко-капельный характер массопереноса, а также *ультразвуковое воздействие* частотой 22 кГц, создают в процессе нанесения покрытия и оплавления вершин выступов термодинамические явления, сходные по характеру действия на материал катода, с местным отжигом. Это способствует уменьшению

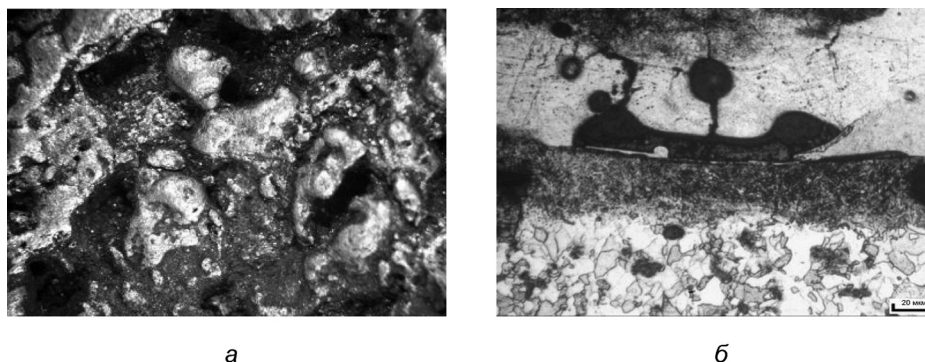


Рис. 2. Образец № 1 (частота вибровозбудителя 600 Гц): а – топография поверхности катода × 10; б – микрошлиф × 200

значений растягивающих (остаточных) напряжений, образующихся в легированном слое покрытия в процессе электроискрового легирования, и отодвигает порог хрупкого разрушения материала, что создает благоприятные условия для монотонного и непрерывного роста толщины электроискровых покрытий [7].

Степень снижения толщины слоев в операциях «оплавления» выступов формируемого покрытия (3,2 %) оказалась существенно выше, чем снижение их массы (0,14 %). Это свидетельствует о перераспределении объемов, что подтверждается заметным снижением бугристости и увеличением контактной сплошности.

При нанесении покрытия на стальной образец **без применения УЗВ** была достигнута толщина покрытия 5,4 мм. Топография поверхности катода и микрошлиф (сталь 45) после обработки электродом-анодом из стали Р6М5 с частотой

вибровозбудителя 600 Гц представлена на рис. 2. Сформированное покрытие имеет крупнокапельную структуру с размером элементов до 500 мкм, значительную слоистость покрытия, с дефектами в виде пустот и вздутий.

Результаты многоциклового обработки стального катода из стали 45 электродом-анодом из стали Р6М5 при частоте вибрации вибровозбудителя 600Гц, приведены в табл. 1.

Увеличение массы катода составило 16,7523 г, толщина покрытия – 5,4 мм.

При нанесении покрытия на стальной образец с применением УЗВ была достигнута толщина покрытия 1,05 мм. Топография поверхности катода и микрошлиф (сталь 45) после обработки электродом-анодом из стали Р6М5 с частотой вибровозбудителя 22 кГц представлена на рис. 3. Сформированное покрытие имеет структуру с размером элементов до 20 мкм.

Таблица 1. Увеличение массы и толщины катода (образец №1)

Номер операции	Условия электроискровой обработки (частота колебаний электрода-анода – 600 Гц)			Масса катода, г			Толщина катода, мм		
	Режим покр./опл.	Энергия импульса, Дж покр./опл.	Время обработки, с	До покрытия	После покрытия	После оплавления	До покрытия	После покрытия	После оплавления
1	6/7	4,3/10	60	28,8984	30,7427	30,7218	4,0	4,46	4,39
2			60	30,7218	32,2647	32,2227	4,39	4,53	4,48
3			60	32,2227	33,0020	32,8945	4,48	4,69	4,55
4			60	32,8945	34,0806	34,0012	4,55	4,95	4,88
5			60	34,0012	35,5931	35,3917	4,88	5,01	4,97
6			60	35,3917	37,0347	37,0219	4,97	5,15	5,1
7			60	37,0219	38,3307	38,3003	5,1	5,65	5,58
8			60	38,3003	39,1677	39,1564	5,58	6,65	6,55
9			60	39,1564	40,2508	40,1870	6,55	7,3	6,8
10			60	40,1870	41,3092	41,2510	6,8	7,9	7,65
11			60	41,2510	42,7053	42,6291	7,65	8,8	8,35
12			60	42,6291	43,7335	43,6864	8,35	9,3	8,7
13			60	43,6864	44,6544	44,5888	8,7	9,65	8,9
14			60	44,5888	45,7097	45,6507	8,9	10,0	9,4

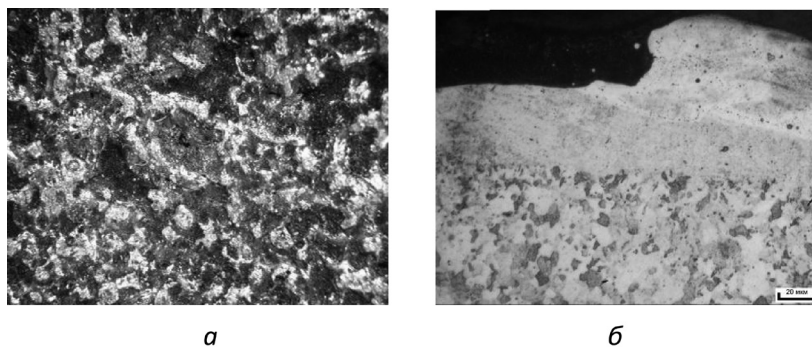


Рис. 3. Образец № 2 (частота вибровозбудителя 22 кГц): *а* – топография поверхности катода  $\times 10$ ; *б* – микрошлиф  $\times 200$

Результаты многоциклового обработки стального катода из стали 45 электродом-анодом из стали Р6М5 при частоте вибрации вибровозбудителя 22 кГц в операциях оплавления приведены в табл. 2.

Увеличение массы катода составило 2,8243 г, толщина покрытия – 1,05 мм. Графики удельного прироста массы и толщины катодов (образец № 1 и образец № 2) представлены на рис. 4. и 5. соответственно.

Таблица 2. Увеличение массы и толщины катода (образец №2)

Номер операции	Условия ЭИЛ (частота колебаний анода – 22 кГц)			Масса катода, г			Толщина катода, мм		
	Режим покр./опл.	Энергия импульса, Дж покр./опл	Время обработки, с	До покрытия	После покрытия	После оплавления	До покрытия	После покрытия	После оплавления
1	6/7	4,3/10	60	26,2406	26,7406	26,7313	4,0	4,48	4,35
2			60	26,7313	26,9633	26,9434	4,35	4,50	4,40
3			60	26,9434	27,1508	27,1396	4,40	4,65	4,49
4			60	27,1396	27,3004	27,2912	4,49	4,65	4,58
5			60	27,2912	27,4500	27,4339	4,58	4,72	4,60
6			60	27,4339	27,6104	27,5994	4,60	4,75	4,73
7			60	27,5994	27,8365	27,8178	4,73	4,80	4,75
8			60	27,8178	27,9929	27,9831	4,75	4,88	4,78
9			60	27,9831	28,1610	28,1597	4,78	4,90	4,80
10			60	28,1597	28,3222	28,3193	4,80	4,90	4,82
11			60	28,3193	28,5513	28,5407	4,82	4,91	4,85
12			60	28,5407	28,7862	28,7764	4,85	4,95	4,90
13			60	28,7764	28,9329	28,9107	4,90	5,05	4,92
14			60	28,9107	29,0770	29,0649	4,92	5,15	5,05

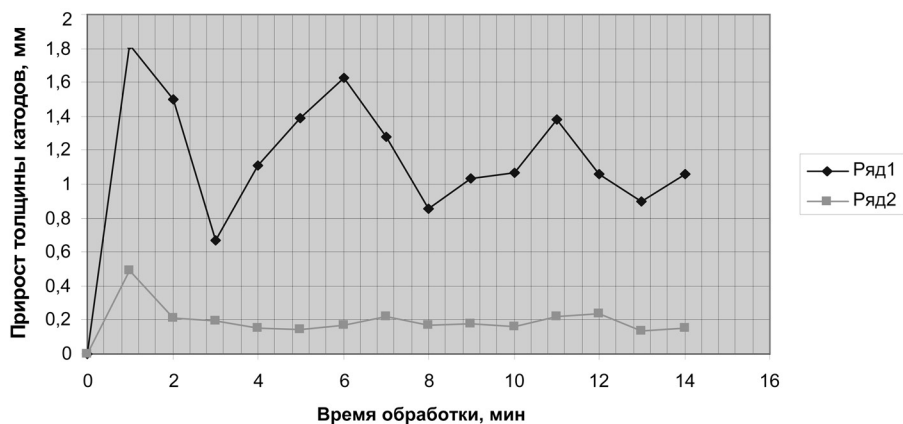


Рис. 4. Удельный прирост массы катода в зависимости от частоты вибрации электрода-анода

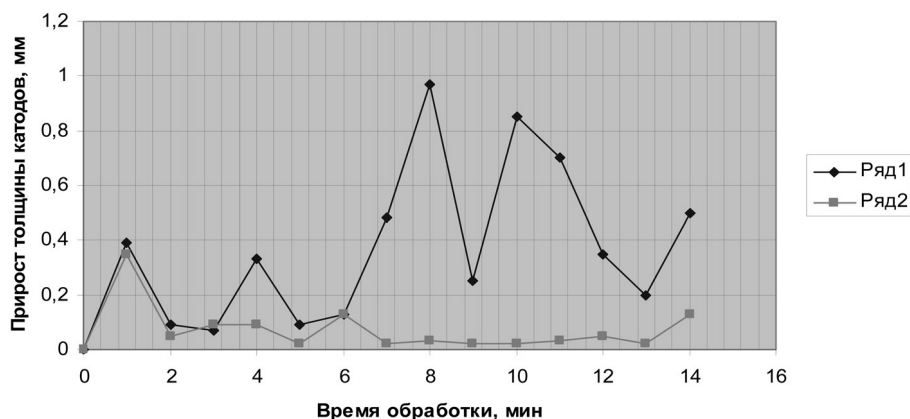


Рис. 5. Удельный прирост толщины катодов в зависимости от частоты вибрации электрода-анода

Как видно из графиков, рост массы катода (образец № 1) происходит непрерывно, однако разброс значений удельного (г/мин) увеличения массы катода весьма значителен. Это связано с крупнокапельным характером массопереноса на режиме № 6 с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц с частотой колебаний электрода-анода установки «Alier-55» равной 600 Гц. Рост массы катода (образец № 2) происходит также непрерывно, однако разброс значений удельного (г/мин) увеличения массы катода незначителен и колеблется в пределах 0,14–0,17 г/мин (в среднем), благодаря ультразвуковой частоте колебаний электрода-анода и связанного с этим большего диспергирования капель переносимого вещества анода на катод.

Необходимо отметить, что рост толщины покрытия без применения УЗВ происходит интенсивнее, чем в случае использования ультразвуковых колебаний электрода-анода. Однако характер поверхности сформированного покрытия образца № 1 (рис. 2) – бугристый, с неравномерным распределением по толщине, пористый, поэтому величины прироста массы и толщины не находятся в прямой зависимости.

Характер поверхности сформированного покрытия образца № 2 (рис. 3) – значительно менее бугристый, чем у образца № 1, с более равномерным распределением по толщине, без явно выраженных дефектов покрытия. Это свидетельствует о том, что при частоте вибрации электрода-анода в 22 кГц в операциях *оплавления* покрытия происходит измельчение материала его выступов до величин на порядок меньших, чем при использовании стандартной частоты колебаний электрода-анода в 600 Гц установки «Alier-55».

По результатам исследования предпочтительным представляется следующий вариант формирования электроискровых покрытий с использованием УЗВ:

в операциях нанесения основного покрытия применять мощные режимы установки «Alier-55», обеспечивающие крупнокапельный характер массопереноса;

в операциях оплавления промежуточных слоев покрытия использовать ультразвуковую частоту колебаний электрода из материалов с минимальной эрозионной способностью для большего диспергирования и выравнивания оплаваемого слоя.

**Выводы.** Установлено, что для получения качественных толстослойных покрытий необходимо обеспечить эрозию материала анода преимущественно в жидко-капельной фазе и по возможности уменьшить содержание в продуктах эрозии парогазовой фазы, которая способствует распылению жидко-капельной фазы в межэлектродное пространство. Такой тип эрозии анода в наших исследованиях соответствует режимам № 6 с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц установки «Alier-55».

По результатам использования ультразвукового преобразователя при формировании покрытия увеличенной толщины на образце № 2 установлено, что применение УЗВ (метод нанесения – *оплавления*) оправдано в операциях *оплавления покрытия*. В операциях *нанесения покрытия* применение УЗВ *не эффективно*, поскольку длительность рабочего импульса, во время которого электрод (анод) находится в пробивном промежутке, обеспечивающем перенос материала с анода на катод, значительно уменьшается, и рост толщины покрытия замедляется.

Определено, что степень снижения толщины слоев в операциях «оплавления» выступов формируемого покрытия (3,2 %) существенно выше, чем снижение их массы (0,14 %). Это свидетельствует о перераспределении объемов, что подтверждается заметным снижением бугристости и увеличением контактной сплошности.

Показано, что, несмотря на значительное количество циклов обработки (в данном случае 14), длительностью 1 минута каждый, тенденция роста массы и толщины электроискровых покрытий образцов сохраняется. По-видимому, энергетический режим мощностью 4,3 Дж, обеспечивающий жидко-капельный характер массопереноса, а также *ультразвуковое воздействие* частотой 22 кГц, создают в процессе нанесения покрытия и оплавления вершин выступов термодинамические явления, сходные по характеру действия на материал катода, с местным отжи-

гом. Это способствует уменьшению значений растягивающих (остаточных) напряжений, образующихся в легированном слое покрытия в процессе электроискрового легирования, и отодвигает порог хрупкого разрушения материала, что создает благоприятные условия для монотонного и непрерывного роста толщины электроискровых покрытий.

Установлено, что использование в операциях оплавления УЗВ-преобразователя с частотой вибрации электрода-анода 22 кГц позволяет производить *оплавление и измельчение* материала выступов покрытия до величин на порядок меньших, чем при применении вибровозбудителя со стандартной частотой колебаний в 600 Гц. При этом происходит более полное перемещение оплавленного материала выступов во впадины и сплошность покрытия возрастает.

### Литература

1. Гитлевич, А. Е. Об ограничении толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования / А. Е. Гитлевич, Н. Я. Перканский, Д. А. Игнатков // *Электронная обработка материалов*. – 1981. – № 3. – С. 25–29.
2. Золотых, Б. Н. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде / Б. Н. Золотых, И. П. Коробова, Э. М. Стрыгин // *Физические основы электроискровой обработки*. – М.: Наука, 1966. – С. 63–73.
3. Иванов, В. И. Об электроискровом способе нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности / В. И. Иванов, Ф. Х. Бурумкулов // *Электронная обработка материалов*. – 2014. – № 50(5). – С. 7–12.
4. Чигринова, Н. М. Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин, В. Е. Чигринов // *Наука и техника*. – 2016. – Т. 15, № 5. – С. 380–390.
5. Мицкевич, М. К. Электроискровой способ нанесения локальных толстостенных покрытий / М. К. Мицкевич, И. А. Бакуто // *Электронная обработка материалов*. – 1977. – № 4. – С. 28–31.
6. Чернышёв, К. А. Пути снижения износа электрода-инструмента при электроэрозионной обработке / К. А. Чернышёв // *Успехи современного естествознания*. – 2011. – № 7. – С. 233.
7. **Определение** влияния ультразвукового воздействия переменной интенсивности на формирование методом электроискрового легирования композиционных износостойких покрытий на основе твердых сплавов на рабочих поверхностях металлических объектов произвольных типоразмеров, конфигурации и назначения: отчет о НИР / Ин-т порошк. металлургии; С. И. Ловыгин. – Минск, 2016. – 27 с.

### ULTRASOUND ACTIVATION OF THE PROCESS OF FORMING ELECTRO-SPARK COATINGS OF INCREASED THICKNESS

S. I. Lovygin<sup>1</sup>, N. M. Chigrinova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SSE «Institute of Welding and Protective Coatings», Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*The study results of the forming process of electro-spark coatings of increased thickness with additional ultrasonic action have been presented in the article. It has been shown that ultrasonic activation when applying coatings of increased thickness (the method of application is fusion) is justified in coating fusion operations. It is established that to obtain high-quality thick-layer coatings, it is necessary to provide erosion of the anode material mainly in the liquid-drop phase.*