

УДК 621.793.79

**Н. М. Чигринова**, д-р техн. наук, доц., **С. И. Ловыгин**, аспирант  
Белорусский национальный технический университет г. Минск, Республика Беларусь  
ОХП ИСЗП ГНУ «Институт порошковой металлургии» г. Минск, Республика Беларусь  
Тел./Факс: +375 17 2101117; E-mail: [chygrynova@yandex.ru](mailto:chygrynova@yandex.ru)

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ УВЕЛИЧЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

*В статье приведены результаты исследований кинетики массопереноса при формировании покрытий увеличенной толщины способом электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием на разных стадиях их формирования. 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.*

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, ультразвуковое воздействие, массоперенос, оплавление, увеличенная толщина, покрытие.

N. M. Chigrinova, S. I. Lovygin

### INFLUENCE OF ULTRASOUND IMPACT ON THE FORMATION OF ELECTROSPARKED COATINGS OF INCREASED THICKNESS

*The paper presents the results of studies of mass transfer kinetics in the formation of coatings of increased thickness by the method of electric spark alloying with additional ultrasonic action at different stages of their formation. It has been shown that the application of ultrasonic action for the application of coatings of increased thickness (the method of application - reflow) is justified in coating reflow operations. It is established that in order to obtain high-quality thick-layer coatings, it is necessary to ensure erosion of the anode material mainly in the liquid-drop phase.*

**Keywords:** electrospark alloying, ultrasonic action, mass transfer, melting, increased thickness, coating.

#### 1. Введение

В последние годы вопросы экономии энергетических ресурсов и сокращения трудозатрат для производства единицы продукции, новой или восстановленной, выходят на первое место в деятельности каждого машиностроительного или ремонтного предприятия. В этих условиях, для восстановления утраченных в процессе эксплуатации служебных свойств деталей машин и механизмов, улучшения эксплуатационных характеристик, повышения ресурса применяют методы с использованием концентрированных потоков энергии, к числу которых относится электроискровое легирование (ЭИЛ). Метод ЭИЛ позволяет наносить покрытия на обрабатываемую поверхность компактным электродом из любого токопроводящего материала, обладает малой энергоемкостью. Сформированные электроискровые покрытия обладают высокой прочностью сцепления с материалом основы. Одним из недостатков метода является малая толщина наносимого покрытия, 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 площади способом 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 использовалась установка «БИГ-5» с частотой вибрации электрода 600 Гц [3]. Получаемые согласно приведенной технологии слои отличаются сильно выраженной неравномерностью рельефа поверхности, неомогенным фазовым составом и анизотропией свойств.

В связи с этим весьма актуальным представляется решение задачи существенного улучшения структуры и рельефа поверхности формируемых методом ЭИЛ покрытий с обеспечением более стабильного уровня их служебных возможностей.

С этой целью авторы применили интегральный метод обработки стальной поверхности, заключающийся в последовательном применении электромеханических импульсов различной частоты за счет использования типовых установок электроискрового легирования и дополнительного ультразвукового воздействия (УЗВ) на уже сформированное при ЭИЛ покрытие [4]. При упрочнении электропроводящих материалов предлагаемым методом обеспечивается адгезия покрытия с металлом на уровне его механической прочности, повышение качества обрабатываемой поверхности изделия за счет уменьшения ее шероховатости и снижения уровня остаточных напряжений в покрытии и металлической основе под ним, увеличение срока безремонтной эксплуатации упрочненного изделия.

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 равнотолщинный и однородный слой более мелких (благодаря ультразвуку), капель материала анода [4].

Основной задачей данного исследования является определение влияния ультразвукового воздействия на процесс формирования комбинированного покрытия увеличенной толщины и сплошности с применением аддитивной технологии, содержащей следующие этапы нанесения покрытия: ЭИЛ, оплавление, УЗВ.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Исследования выполняли с использованием установки «БИГ-5» и специально разработанного ультразвукового устройства, состоящего из генератора, блока питания и ультразвукового преобразователя (рис. 1).

Нанесение покрытий производилось с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой следования 100 Гц. Оплавление покрытий осуществляли комбинированным способом – рабочие импульсы с энергией 10 Дж частотой следования 50 Гц получали от установки «БИГ-5», а частота колебаний электрода-анода 22 кГц задавалась генератором ультразвукового устройства.

В качестве образцов-катодов использовались пластинки размером 30х30х4 из конструкционной стали - сталь 45. Легирующие аноды изготавливали из стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73) диаметром 3,4 мм.

Для определения изменения массы образцов-катодов использовали гравиметрический метод, с помощью которого фиксировали поминутное изменение массы катода при помощи весов аналитических марки АДВ-200 с погрешностью  $\pm 2 \times 10^{-4}$  г. Толщина образцов-катодов измерялась микрометром МК 0-25 с точностью до 0,01 мм.

Топография поверхности образцов изучалась с помощью стереоскопического панкратического микроскопа «Альтаи СМ 0745». В процессе работы была проведена многоцикловая электроискровая обработка стальных образцов стальным катодом Р6М5.

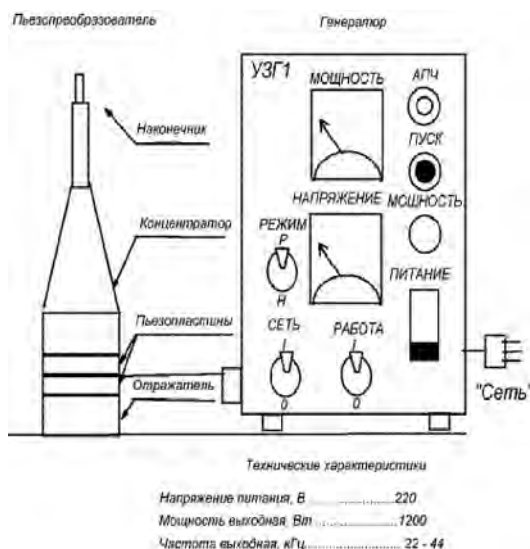


Рисунок 1. Блок-схема ультразвукового устройства

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, высокие теплопроводность и электроэрозионная стойкость. Для выполнения операции оплавления в ходе работ были выбраны электроды из меди М1.

Исследования проводились в два этапа: 1 – формирование покрытий методом ЭИЛ с последующим оплавлением, 2 – покрытие создается аддитивным методом в три этапа: ЭИЛ, оплавление, УЗВ.

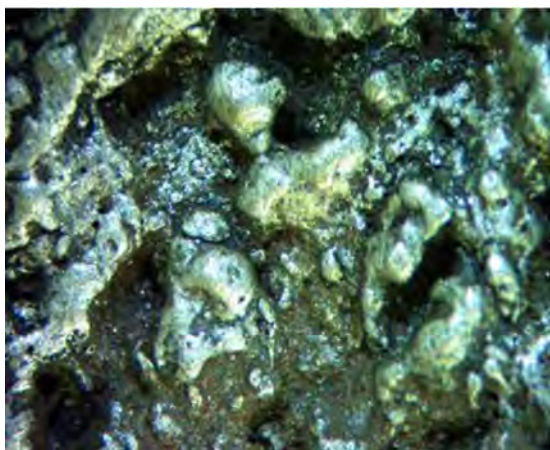


Рисунок 2. Топография поверхности катода (частота вибровозбудителя 600 Гц)  $\times 10$

В результате применения аддитивного метода, содержащего только этапы ЭИЛ и оплавления, толщина созданного покрытия достигла 5,4 мм (рис. 2). Полученный слой имеет крупнокапельную структуру с размером элементов до 500 мкм. При этом установлено, что степень уменьшения высоты выступов покрытия (3,2 %) существенно больше, чем снижение их массы (0,14 %). Это свидетельствует о перераспределении объемов материала в созданной слое, что подтверждается заметным снижением бугристости поверхности и увеличением ее контактной сплошности.

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

Анализ полученных данных показал, что средняя величина возрастания массы стального катода составила 16,7523 г.

При ЭИЛ-обработке стального катода с применением УЗВ было установлено, что несмотря на значительное количество циклов обработки – до 14, длительностью 1 минута каждый, тенденция прироста массы и толщины образцов сохраняется. По видимому, энергетические режимы мощностью 4,3 Дж и 10 Дж, обеспечивающие жидко-капельный характер массопереноса, а также ультразвуковое воздействие

Таблица 1. Увеличение массы и толщины катода при его обработке методом ЭИЛ + оплавление (образец №1)

№ операции	Условия ЭИЛ (частота колебаний анода – 600Гц)		Масса катода, г				Толщина катода, мм		
	Режим покрытия/оплавления	Энергия импульса, Дж	Время обработки	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

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 значений растягивающих (остаточных) напряжений, образующихся в легированном слое покрытия в процессе электроискрового легирования, и отодвигает порог хрупкого разрушения материала, что создает благоприятные условия для последующего монотонного и непрерывного роста толщины электроискровых покрытий [5]. При нанесении покрытия на стальной образец аналогичного состава электродом-анодом из стали Р6М5 с применением УЗВ с частотой вибровозбудителя 22 кГц сформированное покрытие имеет размеры элементов структуры до 10 мкм и толщину 1,05 мм (рис.3).

Сравнение топографии поверхностей покрытий, полученных согласно предложенным алгоритмам, содержащим либо два этапа: ЭИЛ и оплавление (рис.2), либо три этапа – ЭИЛ, оплавление и УЗВ (рис.3) демонстрирует очевидное преимущество последнего, т.к. рельеф поверхности заметно однородней, высота

выступов и впадин очевидно меньше, что предполагает и более стабильное поведение образца с таким покрытием в служебных условиях. Результаты многоциклового обработки стального катода из стали 45 электродом – анодом из стали Р6М5 после тройной обработки приведены в таблице 2.

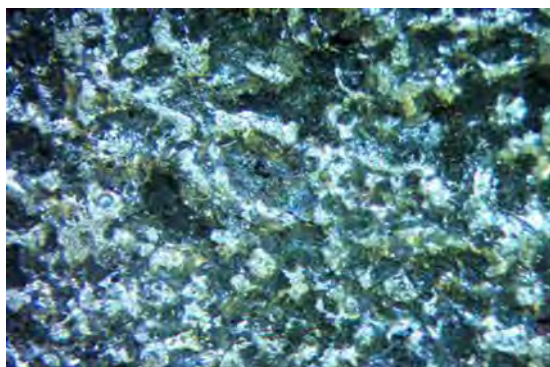


Рисунок 3. Топография поверхности катода (частота вибровозбудителя 22 кГц) x10

В данном случае зафиксировано среднее значение увеличения массы катода до 2,8243 г.

Графики удельного прироста массы и толщины катодов (образец №1 и образец №2) представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Как видно из графиков, прирост массы образца №1 происходит непрерывно, однако разброс величин удельного (г/мин) увеличения массы катода весьма значителен.

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

№ операции	Условия ЭИЛ (частота колебаний анода – 600Гц)			Масса катода, г			Толщина катода, мм		
	Режим покрытия/оплавление	Энергия импульса, Дж	Время обработки	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

Это связано с крупнокапельным характером массопереноса на режимах с энергией импульсов 4,3Дж и частотой их следования 100Гц и 10Дж и 50Гц.

Такой же непрерывный характер прироста массы катода наблюдается и в случае обработки образца № 2, однако разброс величин удельного (г/мин) увеличения массы катода незначителен и колеблется в пределах 0,14 – 0,17 г/мин (в среднем). Аналогичная картина отмечается в росте толщины легированного слоя.

Характер поверхности покрытия, сформированного в процессе ЭИЛ - обработки

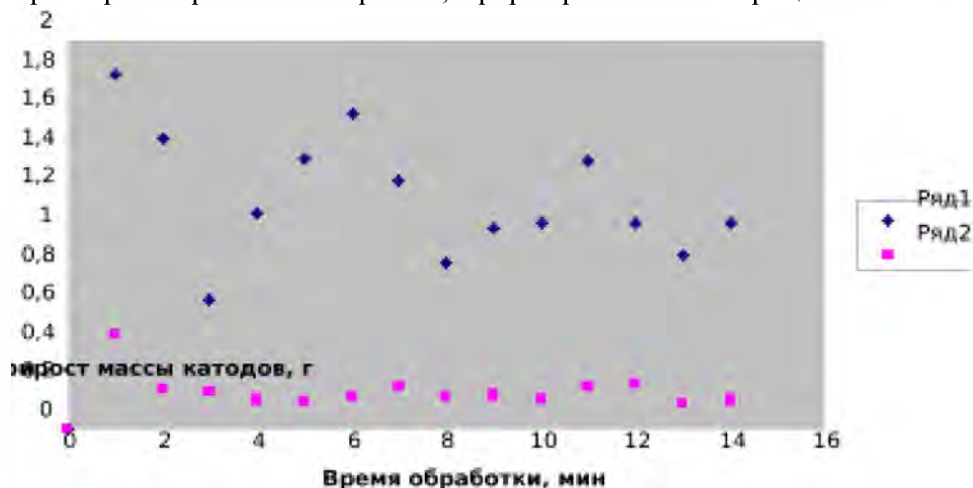


Рисунок 4. Удельный прирост массы катодов в зависимости от частоты вибрации электрода-анода

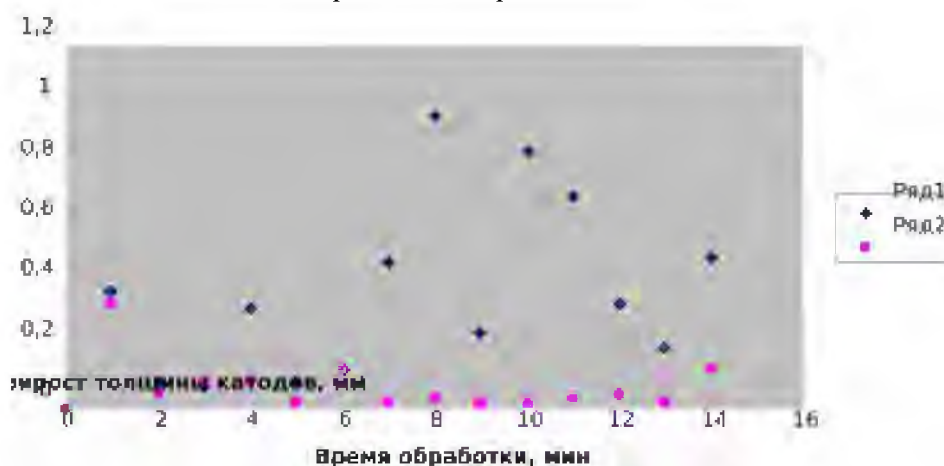


Рисунок 5. Удельный прирост массы катодов зависимости от частоты вибрации электрода-анода

с последующим оплавлением на образце №1 (рис.2), – бугристый, с неравномерной толщиной. В нем имеется большое количество пор, поэтому прирост массы и толщины покрытия не находятся в прямой зависимости.

Вид поверхности покрытия, сформированного в процессе ЭИЛ - обработки с последующим оплавлением и ультразвуковым воздействием на образце №2 (рис.3) значительно более однородный, слабее профилированный с более равномерной толщиной по всей площади обработки, без явно выраженных механических и меньшим количеством структурных дефектов. Это свидетельствует о том, что при частоте вибрации электрода-анода в 22 кГц происходит измельчение элементов материала покрытия до величин, на порядок меньших, чем при использовании стандартной технологии с частотой колебаний электрода-анода в 600 Гц на установке «БИГ-5».

### Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили заключить следующее:

1. Для формирования качественных толстослойных покрытий с применением технологии электроискрового легирования необходимо совмещать данный типовой метод с двумя последующими приемами: оплавлением поверхности покрытия и его последующим ультразвуковым выглаживанием.

2. При необходимости увеличить толщину формируемого при ЭИЛ покрытия этап ультразвукового воздействия на всегда целесообразен, поскольку длительность рабочего импульса ЭИЛ, во время которого электрод (анод) находится в пробивном промежутке, обеспечивающем перенос материала с анода на катод, значительно уменьшается и рост толщины покрытия замедляется.

3. Безусловно оправдано применение УЗВ на этапе выглаживания дефектов оплавленного слоя покрытия, полученного методом ЭИЛ.

4. Получение качественных толстослойных покрытий в применении предложенной аддитивной технологии возможно в случае эрозии материала анода преимущественно в жидко-капельной фазе.

5. Содержание в продуктах эрозии легирующего анода парогазовой составляющей, способствующей распылению жидко-капельной фазы в межэлектродное пространство, должно быть сведено к минимуму.

6. Использование в операциях оплавления УЗВ - преобразователя с частотой вибрации электрода-анода 22 кГц позволяет производить оплавление и измельчение выступов ЭИЛ - покрытия до величин на порядок меньших, чем при использовании вибровозбудителя со стандартной частотой колебаний в 600 Гц. При этом отмечено возрастание сплошности покрытия, связанное с более активным транспортом частиц оплавленного материала выступов во впадины покрытия.

### 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. Иванов, В. И. Формирование поверхностного слоя низкоуглеродистой стали при электроискровой обработке / В. И. Иванов, Ф. Х. Бурумкулов, А. Д. Верхотуров, П. С. Гордиенко, Л. А. Коневцов // Сварочное производство. – 2012. – №11. – С. 36-40.

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. Ловыгин, С. И. 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 / С. И. Ловыгин // ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Композиционные материалы», Отчет о научно-исследовательской работе. – Минск, 2016. – 27 с.

Поступила в редколлегию 20.02.2017 г.