

## Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании

Докт. техн. наук Н. М. Чигринова<sup>1</sup>, асп. С. И. Ловыгин<sup>2</sup>, В. Е. Чигринов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2</sup>ОХП ИСЗП ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016

Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Приведены результаты исследований кинетики массопереноса и динамика формирования покрытий интегральным способом электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием на разных стадиях их формирования. В настоящее время для нанесения защитно-упрочняющих покрытий в пределах допустимых толщин и характеристик в основном применяется классический метод электроискрового легирования с использованием твердосплавных анодов и частотой импульсного переменного напряжения на катушке вибровозбудителя от 20 до 1600 Гц. Главной особенностью применения ультразвукового воздействия (частота 22–44 кГц) в процессе электроискрового легирования является возможность дальнейшего наращивания толщины формируемых покрытий даже после достижения порога хрупкого разрушения материала покрытия. Методика проводимой работы базировалась на комплексных гравиметрических, металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях формируемых покрытий на основе композиций, изготовленных методом высокоэнергетического горячего прессования, и системы «тугоплавкий карбид (WC) – связка» в виде сплава на основе никеля из серии «колмоной» системы Ni – Ni<sub>3</sub>B, легированной добавками меди и кремния. Первоначальная обработка поверхности в диапазоне ультразвуковых частот 22–44 кГц способствует заметному возрастанию скорости массопереноса, которая определяется прежде всего химическим составом и термодинамической устойчивостью анодов. Это объясняется активацией поверхности в процессе ее предварительного деформирования с ультразвуковой частотой с созданием дополнительных условий для возникновения искрового разряда. Завершающая ультразвуковая обработка улучшает качество покрытия вследствие его дополнительной проковки, приводя к увеличению однородности его структуры и повышению ее плотности.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, ультразвуковое воздействие, порог, хрупкое разрушение, активация, однородность

**Для цитирования:** 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

## Role of Ultrasound in Mechanisms of Anode-Cathode Interactions during Electrospray Alloying

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

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>Separate Self-Financing Unit, Institute for Welding and Protective Coatings, State Scientific Institution “Institute of Powder Metallurgy” National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper reveals results of investigations on mass transfer kinetics and dynamics of coating formation while using integral electrospray alloying method with additional ultrasonic exposure at different stages of formation. Nowadays, a classical method for electrospray alloying with hard-alloy anodes and impulse AC voltage frequency on the vibration exciter

### Адрес для переписки

Чигринова Наталья Михайловна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 67,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-81  
tiro@bntu.by

### Address for correspondence

Chigrinova Nataliya M.  
Belarusian National Technical University  
67 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-81  
tiro@bntu.by

coil from 20 to 1600 Hz has been mainly used for application of protective and strengthening coatings within permissible thickness and characteristics. The key aspect of ultrasonic exposure application (frequency 22–44 kHz) during electrospark alloying is the possibility to increase further thickness of coatings to be formed even after reaching a brittle fracture threshold of the coating material. Methodology of the executed research activity has been based on integrated studies (gravimetric, metallographic, X-ray diffraction and electron microscopic) of coatings which are to be formed through compositions produced while using method of high-energy hot compaction and a “refractory carbide (WC) and a binding material” system in the form of alloy based on nickel from the series of “colmonoy” Ni – Ni<sub>3</sub>B system which is alloyed with additions of copper and silicon. The initial surface treatment within ultrasonic frequency range (22–44 kHz) contributes to a noticeable increase in the mass transfer rate, which is primarily determined by chemical composition and thermodynamic stability of anodes. It is due to surface activation in the process of its preliminary deformation at ultrasonic frequency which creates additional conditions for striking of a spark. The final ultrasonic treatment improves coating quality due to its additional forging that leads to an increase of its structure homogeneity and density.

**Keywords:** electrospark alloying, ultrasonic exposure, threshold, brittle fracture, activation, homogeneity

**For citation:** Chigrinova N. M., Lovygin S. I., Chigrinov V. E. (2016) Role of Ultrasound in Mechanisms of Anode-Cathode Interactions during Electrospark Alloying. *Science & Technique*. 15 (5), 380–390 (in Russian)

## Введение

Перспективным направлением обеспечения функциональности и конкурентоспособности с увеличением ресурса большинства изделий машиностроения и металлообработки, эксплуатируемых в условиях повышенных знакопеременных нагрузок и рабочих скоростей, термостатирования и агрессивных сред, является их поверхностное упрочнение с созданием функционально-адаптированных покрытий. Выбор методов формирования указанных покрытий определяется условиями эксплуатации упрочняемого изделия и исходным состоянием его рабочих поверхностей. Одна из малоэнергоёмких и практически универсальных недорогих технологий обработки любых токопроводящих материалов – электроискровое легирование (ЭИЛ) [1]. Развитие технологии ЭИЛ, получившей мощный импульс в конце 50 – начале 60-х гг. XX в., к 70-м гг. практически прекратилось. Сдерживающими факторами стали малая производительность процесса, невозможность получения бездефектных, с минимальным уровнем напряжений покрытий, обладающих требуемой геометрией поверхности. Поэтому среди исследований метода появилось множество вариантов комбинации типовой технологии ЭИЛ с другими способами обработки поверхностей.

Перспективный вариант – комбинация ЭИЛ с последующей лазерной обработкой упрочнённой поверхности [2], ЭИЛ с последующей механической обработкой, ЭИЛ в сочетании с термической и финишной механическими обработками для достижения заданной шероховатости и качества поверхностного слоя, ЭИЛ с

последующей пластической деформацией сформированного покрытия. Необходимо отметить, что большинство технологий поверхностной обработки при создании функционально-адаптированных покрытий имеют близкую физико-химическую природу с процессами металлизации материалов, для которых характерны следующие основные стадии:

а) исходная деструкция расходного вещества – сольватация (электрод, электролит) и электротермомеханическая (эрозионная) деструкция поверхности анода или катода;

б) массоперенос исходного материала на поверхность металлической основы (изучаемого объекта);

в) закрепление на поверхности основы в виде функционального покрытия необходимой конфигурации с той или иной интенсивностью, глубиной и динамикой диффузионных процессов между основой и слоем.

В связи с этим выбор материалов легирующих электродов и их структурное состояние, определяемое методом их получения, играют определяющую роль в процессах формирования работоспособных покрытий, улучшающих свойства обработанной поверхности. Авторы [3, 4], рассматривающие ЭИЛ как определённый вид поверхностной термической обработки, утверждают, что при легировании в качестве электрода может быть использован любой материал на металлической основе. Данная позиция продуктивна, однако требует дополнительных мер по снижению пористости, неравнотолщинности, шероховатости и уровня остаточных напряжений в формируемых из разнородных материалов покрытиях.

При упрочнении материала в процессе ЭИЛ, например тугоплавкими соединениями, отличающимися высокими твердостью и хрупкостью, основными факторами, определяющими эффективность упрочнения, являются дисперсность и агрегатное состояние продуктов эрозии материала анода и их способность закрепляться на подложке. Авторы [5] отмечают, что не удается обнаружить корреляцию между эрозионными свойствами тугоплавких соединений и их физическими и механическими характеристиками. Однако ими установлено, что чем выше степень пластичности соединений, тем выше эффективность упрочнения. Последнее обусловлено тем, что для хрупких тугоплавких соединений продукты эрозии могут иметь размер до 4 мм, они не разогреваются при переходе через искровой промежуток и не закрепляются на подложке. В связи с этим тугоплавкие соединения характеризуются высокой эрозионной стойкостью: коэффициент переноса электродного материала не превышает 30 %, на обрабатываемой поверхности формируется покрытие толщиной не более 10–30 мкм, твердость которого близка к твердости электродного материала 15–25 ГПа.

Применение стандартных твердых сплавов в качестве легирующих анодов позволяет максимально эффективно использовать преимущества компонентов – пластичность металлической связи и высокую твердость тугоплавкого соединения. При этом толщина защитного покрытия достигает 50–100 мкм, его сплошность также возрастает, но твердость не превышает 15–25 ГПа. Поэтому сегодня стандартные твердые сплавы на основе карбида вольфрама используются как электродные материалы в процессах электроэрозионного упрочнения. Однако надо иметь в виду, что эти сплавы являются материалами инструментального назначения, т. е. материалами с высоким сопротивлением разрушению при внешнем температурном и механическом воздействии. Это ограничивает эффективность процессов электроэрозионного упрочнения.

При рассмотрении физико-химических критериев разработки электродных материалов для ЭИЛ внимания заслуживает направление, связанное с повышением эрозионной активности и управлением интенсивностью процесса массопереноса материала анода на катод [6].

### Исследование процесса формирования покрытий

Для выяснения роли перечисленных факторов в процессе формирования работоспособных качественных покрытий методом электроискрового легирования изучали поведение электродов из порошковых сплавов на основе никеля («колмоной»), полученных методом распыления расплавов. Выбор порошковых материалов для легирующих анодов определяется несколькими соображениями: возможностью получения более толстых покрытий, что связано с их высокой эрозионной способностью; невысокой стоимостью вследствие применения при их изготовлении широко распространенного метода порошковой металлургии; возможностью получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами. Но при этом механизм крупнокапельного переноса материала таких анодов на обрабатываемую поверхность в процессе ЭИЛ изучен недостаточно и поиск путей улучшения качества этих покрытий со стабилизацией их рельефа – задача, требующая решения.

В исходном состоянии порошки указанного сплава имеют глобулярную форму, доэвтектическую структуру с первичной фазой твердого раствора на основе никеля и эвтектики (твердый раствор на основе никеля + боросилицид никеля). Электроды для электроискрового легирования получали методами порошковой металлургии (размол, смешивание, введение пластификатора, прессование и спекание) с оптимальной пористостью изготовленных электродов 10 % (рис. 1).

Порошки сплава «колмоной» на основе никеля системы Ni–Cu–B–Si получали методом выплавки с последующим распылением их расплава, что гарантирует равномерное распределение легирующих элементов, высокую чистоту по количеству вредных элементов в газообразном виде (кислород, вода, азот), которые являются причиной охрупчивания сплавов. Смесь ««колмоной» – карбид вольфрама» получали путем размол-смешивания в течение 4 ч [5]. Макро- и микроструктурное состояние литого сплава ««колмоной» + 10 % WC» приведено на рис. 2.

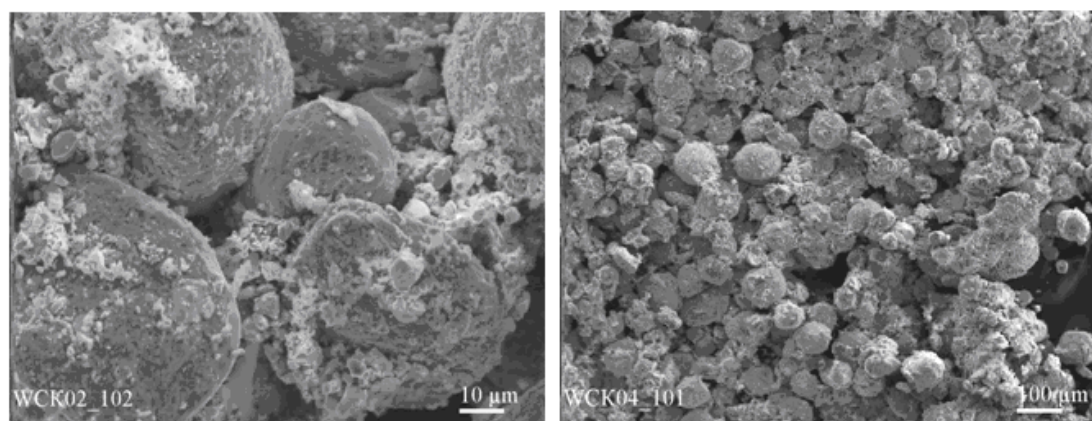


Рис. 1. Внешний вид композиции «колмоной» + 10 % WC»

Fig. 1. External view of “colmonoy” composition + 10 % WC”

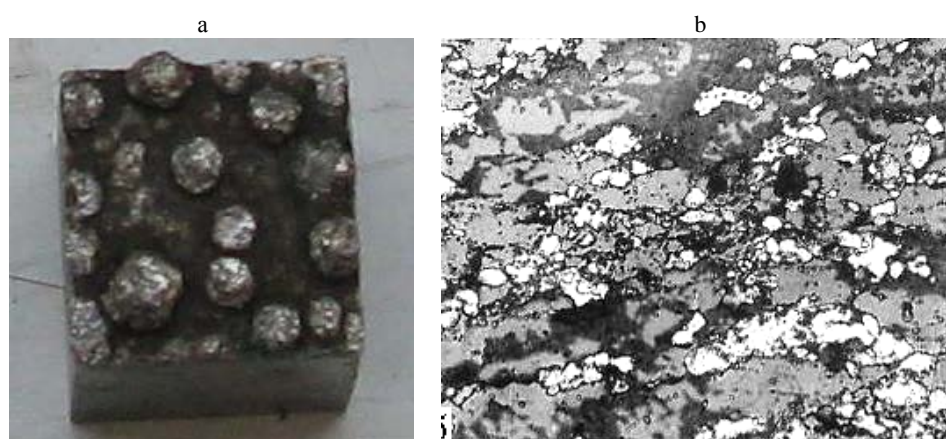


Рис. 2. Макро- (a) и микроструктура (b) сплава «колмоной» + 10 % WC», ×250

Fig. 2. Macro- (a) and microstructure (b) of “colmonoy” alloy + 10 % WC”, ×250

На дифрактограмме (рис. 3), определяющей химический состав полученной композиции с большим количеством карбидов, максимальный пик соответствует композиции «колмоной».

Исследование механизмов массопереноса полученных анодов на поверхность металлической основы из стали 45 и характера закрепления на ней создаваемого покрытия необходимых конфигурации и качества производили на образцах размерами 10×10×10 мм. Время легирования было одинаковым для всех образцов. В экспериментах для сравнения применялись стандартный метод ЭИЛ и интегральная технология электроискровой обработки, состоящая в последовательном трехступенчатом легировании с использованием на первоначальной и последней стадиях создания покрытия ульт-

развукового воздействия УЗО + ЭИЛ + УЗМ (где УЗО – ультразвуковая обработка; УЗМ – ультразвуковая металлизация).

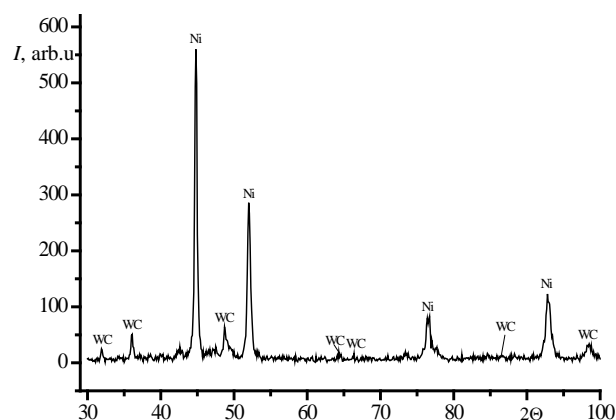


Рис. 3. Дифрактограмма легирующей композиции

Fig. 3. X-ray diffractogram of alloying composition

Именно этот метод, как было установлено на предыдущих этапах исследований, отличается наиболее высокой стабильностью изменения электрических характеристик процесса во времени, определяющей более стабильную эрозию легирующих анодов при смене режима легирования. При этом гарантированно обеспечивается устойчивая динамика диффузионных анодно-катодных взаимодействий, приводящих в совокупности к получению равнотолщинного, имеющего высокую адгезию покрытия с минимальным количеством структурных несовершенств [7].

При исследовании процесса нанесения покрытия методом ЭИЛ изучаемыми электродами подтвержден вывод о том, что при стандартном электроискровом легировании катода с высокой энергией плазмы и низкочастотным механическим ударом (600 Гц) во всем диапазоне электрических режимов отмечается нестабильность процесса обработки, выраженная в заметных колебаниях уровня электрических параметров, приводящего к хаотичному массопереносу, определяемому неравномерной и спонтанной эрозией легирующего анода (рис. 4).

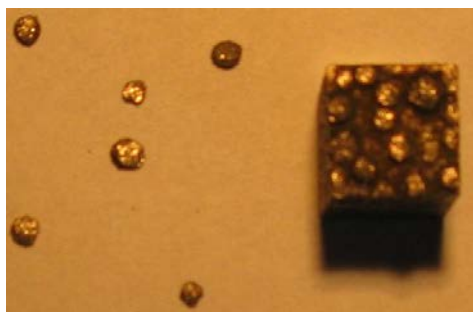


Рис. 4. Фрагменты разрушающегося легированного слоя (анод: «колмоной» + 10 % WC)

Fig. 4. Fragments of collapsing alloyed layer (anode: "colmonoy" + 10 % WC)

Такой крупнокапельный массоперенос материала анода на упрочняемую поверхность способствует получению весьма неравнотолщинных, с высокой шероховатостью покрытий. Вообще, считается, что формирование неравномерного рельефа упрочняемой поверхности при типовом ЭИЛ напрямую зависит от приведенной энергии импульсов: чем больше приведенная энергия, тем рельеф грубее, а шероховатость выше. При данном подходе не учитыва-

ются сложность и стохастичность процесса ЭИЛ, определяемого множеством взаимовлияющих факторов. Поэтому шероховатость поверхности, образованная электроискровой обработкой, близка к нерегулярной. Шероховатость зависит от энергии единичного импульса, так как единичный импульс определяет размеры капли расплавленного металла, а следовательно, и высоту микронеровностей. Установлено [8], что в результате электроискровой обработки показатель  $R_a$  шероховатости полученного слоя может варьироваться от 3,2 до 12,5 мкм и более. Такой микрорельеф поверхности непригоден для многих высокотехнологичных и качественных узлов и механизмов. Типовой технологический процесс получения высококачественного покрытия методом ЭИЛ изображен на рис. 5 [6].

Важным аспектом является то, что массоперенос материала легирующего электрода происходит преимущественно в местах, наиболее выступающих над средней линией профиля (4-, 5- и 6-й шаги). Указанную неоднородность полученной структуры покрытия, а значит, и анизотропию его свойств можно объяснить следующими особенностями процесса: через возникающий при касании анода и катода в процессе ЭИЛ канал сквозной проводимости пучок электронов фокусированно ударяется о твердую металлическую поверхность анода. Энергия движения остановленных электронов выделяется в его поверхностных слоях. Энергия от специального источника питания импульсно подводится к разрядному промежутку, поэтому плотность тока в канале значительно превосходит критические значения. Вследствие этого металл анода локально разогревается, расплавляется и частично испаряется. Капля расплавленного металла отделяется от анода и, опережая его, движется к катоду. В процессе отделения от анода летящая капля успевает нагреться до высокой температуры, закипает и взрывается. Цепь тока прерывается, фокусирующее действие электромагнитного поля исчезает, и образовавшиеся частицы летят широким фронтом. Поскольку перегретая капля и частицы находятся в газовой среде, возможно образование химических соединений, вследствие чего отделившиеся от анода частицы могут отличаться от материала анода. Достигнув катода, расплавленные частицы анода свариваются с ним и частично внедряются в его поверхность.



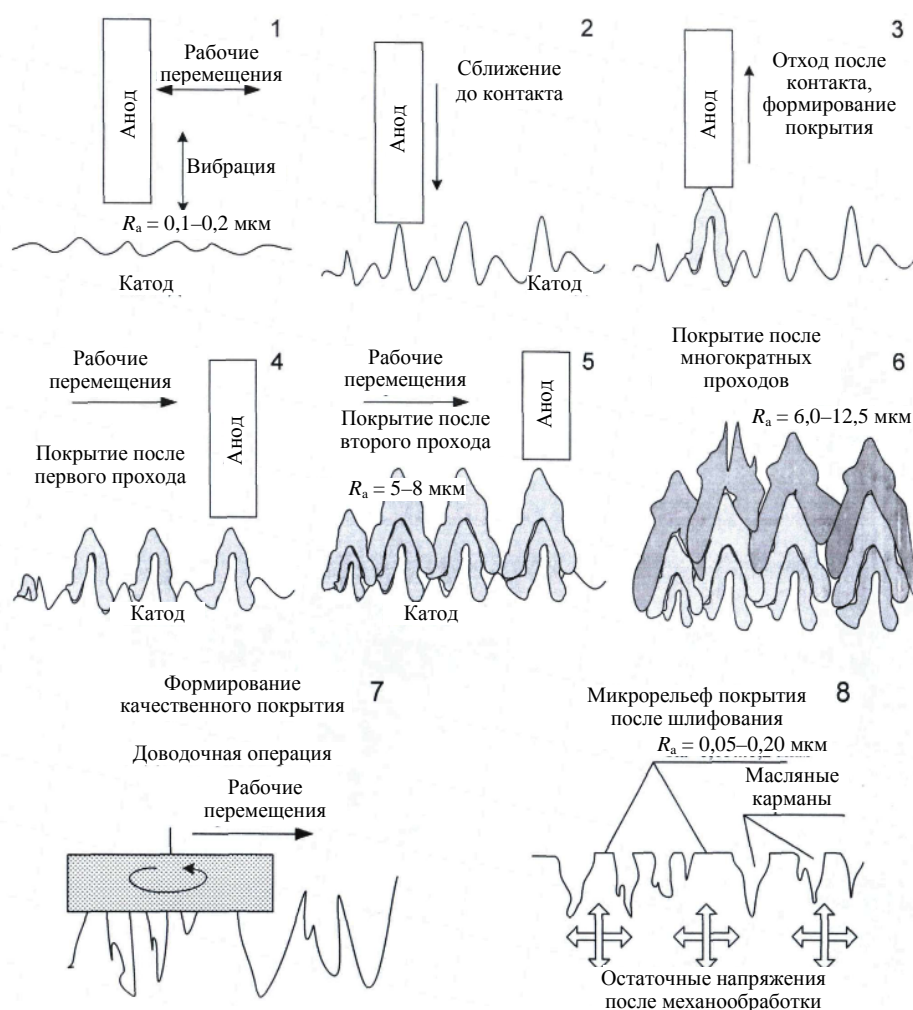


Рис. 5. Формирование профиля поверхности покрытия после типового электроискрового легирования стального катода

Fig. 5. Formation of coating surface profile after typical electrospark alloying of steel cathode

Движущийся за частицами электрод-анод механически ударяет о катод, перемешивая частицы анода. При этом протекают процессы диффузии и химических реакций. Механический удар по раскаленной массе металла проковывает полученное покрытие, увеличивая его однородность и плотность. Так как процесс носит локальный характер, имеет место и сверхскоростная закалка. После этого электрод-анод отходит от катода, а на поверхности последнего остается прочно соединенный с ним слой материала анода. Поскольку материал порошкового анода представляет собой сплав, который при воздействии на него энергией электроразрядной плазмы в период легирования эродирует весьма неравномерно, то при механическом биении о поверхность катода разновеликие отрываю-

щиеся капли анода (рис. 4), оседая на упрочняемую поверхность и кристаллизуясь, формируют неравномерные по толщине покрытия со случайным рельефом поверхности. При этом чем крупнее капля, что характерно для систем «тугоплавкое соединение – металл», чем толще создаваемое покрытие, тем больше различия в коэффициентах теплопроводности и теплоотвода между осевшей каплей материала анода и поверхностью катода, что вызывает появление трещин (рис. 6).

Сделать процесс электроискрового легирования более совершенным позволяет применение дополнительного ультразвукового воздействия. В настоящее время разработано множество устройств для электроискрового легирования с одновременным ультразвуковым воздействи-

ем. Ультразвуковая колебательная система способствует более стабильному течению пластической деформации, существенному упрочнению поверхностного слоя детали, увеличению микротвердости, а также снятию остаточных макро- и микронапряжений, сглаживанию неровности поверхности. В результате создается поверхностный слой с регулярным характером микрорельефа, однородной микроструктурой и сниженной шероховатостью. Авторы [6] в результате исследования указывают, что применение ультразвуковой обработки после предварительной операции шлифования снижает высоту микронеровностей от 3,2–6,2 до 1,3–3,7 мкм.

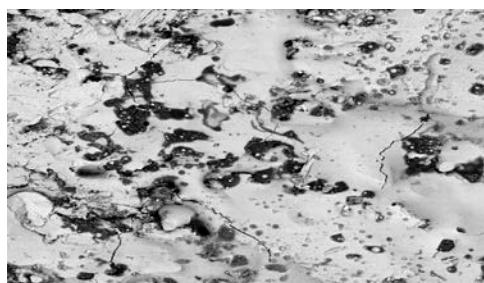


Рис. 6. Разветвленная сеть микротрещин на поверхности покрытия, полученного стандартным методом электроискрового легирования,  $\times 1500$

Fig. 6. Extensive network of microcracks on coating surface produced by typical electrospark alloying method,  $\times 1500$

Идея авторов данной статьи о применении ультразвука в процессе формирования более качественных покрытий заключается не в одновременном, а в последовательном ультразвуковом воздействии на поверхность катода. Именно такая обработка на первоначальном этапе обеспечивает гарантированное сглаживание неоднородностей в рельефе поверхности, обуславливая более стабильный массоперенос материала анода вследствие исключения на обрабатываемой поверхности зон, заметно выступающих над средней линией профиля. Это, в свою очередь, способствует более равномерному протеканию диффузионных процессов в анодно-катодной зоне при ЭИЛ. Кроме того, ранее выдвигалась гипотеза о том, что использование ультразвука для обработки поверхности катода до начала формирования собственно покрытия позволит уйти от основного недостатка стандартного метода ЭИЛ – ограниченности толщины покрытий, обусловленной тем,

что при увеличении времени легирования происходит накопление внутренних напряжений в легированном слое, которые релаксируют в определенный момент с последующим хрупким разрушением поверхностного слоя [9]. По мнению авторов данной статьи, использование ультразвука на первоначальной стадии интегральной обработки активирует поверхности анода и катода, интенсифицируя тем самым диффузионные потоки, стабилизируя их и обеспечивая устойчивые анодно-катодные взаимодействия. Кроме того, ультразвук уплотняет и выравнивает поверхность, а на ней в процессе ультразвукового легирования формируется равнотолщинный и однородный слой более мелких (благодаря ультразвуку) капель анода, на котором уже в процессе ЭИЛ покрытие из таких же по составу капель будет «вырастать» значительно быстрее. Цель завершающей ультразвуковой обработки – снижение уровня остаточных напряжений в покрытии, его доуплотнение, повышение однородности рельефа поверхности, снижение ее шероховатости.

В подтверждение выдвинутой гипотезы дополнительно к ранее проведенным исследованиям [6] изучалось влияние ультразвукового воздействия на разных стадиях формирования электроискровых покрытий с целью определения перспектив увеличения их массы и толщины покрытий после достижения порога хрупкого разрушения материала. При этом диапазон энергомеханических параметров интегральной обработки выбирали с учетом сделанных ранее выводов, что именно частота и интенсивность ультразвукового воздействия оказывают определяющее влияние на структурное и напряженное состояния легирующего анода и обрабатываемого катода, а величина электрических режимов – на характер и эрозионную способность материалов анодов и соответственно динамику их массопереноса, на интенсивность анодно-катодных взаимодействий.

Предварительную ультразвуковую обработку поверхности катода производили на установке ультразвукового электроискрового легирования УИЛ-2 с максимально возможной частотой 20,4–23,6 кГц, а модификацию поверхности уже сформированного покрытия – с применением специально разработанного и созданного авторами макетного образца ульт-

тразвукового устройства (рис. 7), работающего в диапазоне частот от 15 до 150 кГц, с выбранными для экспериментов частотами 22 и 44 кГц (напряжение питания 220 В; выходная мощность 1200 Вт; выходная частота 22–44 кГц).

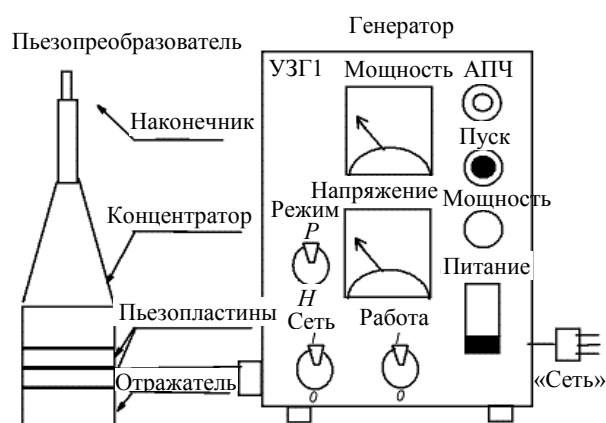


Рис. 7. Блок-схема ультразвукового устройства

Fig. 7. Block diagram of ultrasound device

Применение созданного ультразвукового устройства для модификации сформированного в процессе типового ЭИЛ покрытия (рис. 8а) позволило существенно улучшить его качество: топография упрочненной поверхности отличается минимальным количеством структурных несовершенств и регулярным рельефом с отклонениями от равнотолщинности не более 2–5 мкм (рис. 8б), что легко объясняется действием ультразвука на вещество [7].

Большую равнотолщинность покрытия, полученного в процессе трехступенчатого легирования УЗО + ЭИЛ + УЗМ, можно объяснить

активацией поверхности катода при ее предварительном деформировании с ультразвуковой частотой, обуславливающим создание дополнительных условий для возникновения искрового разряда. В результате этого осуществляется более интенсивный массоперенос, а также проковка высокочастотным механическим ударом электрода (анода) поверхности стальной основы (катода) при ультразвуковой модификации наносимого покрытия, которая значительно увеличивает его однородность и плотность [10]. По мнению авторов статьи, наложение таких колебаний способствует большему диспергированию капель расплава, переносимых с легирующего электрода на упрочняемую поверхность.

Поскольку рост покрытия при электроискровом легировании связан с эрозией легирующего электрода, то с целью оптимизации процесса эрозии порошковых анодов решалась задача расчета объема материала анода, эродирующего при ЭИЛ на стальной катод. Для этого ранее была создана физико-математическая модель, определяющая оптимальный размер капли анода, оседающей на поверхности катода в процесс анодно-катодных взаимодействий при легировании [11]. Экспериментально такую оценку выполняли посредством изучения кинетики массопереноса порошковых анодов во времени с использованием гравиметрического метода для определения привеса катода. Измерение массы стального катода проводили при помощи аналитических весов марки АДВ-200 с погрешностью  $\pm(2 \cdot 10^{-4})$  г через каждую минуту легирования.

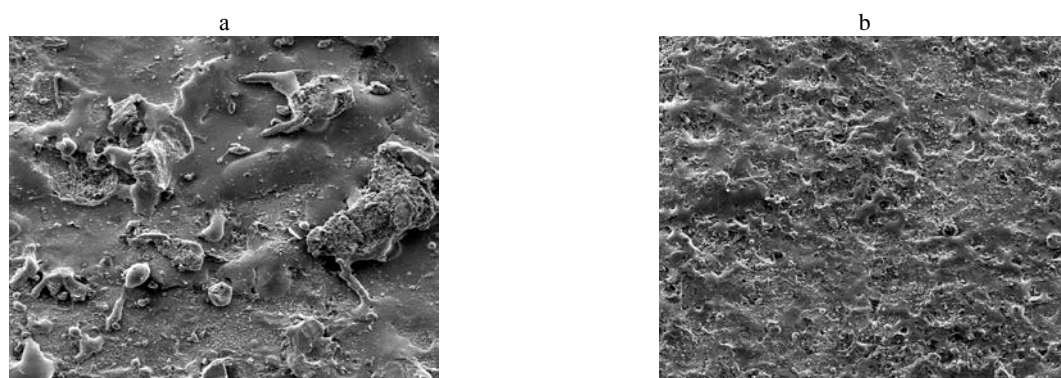


Рис. 8. Топография поверхности покрытий, полученных типовым электроискровым легированием (а) и интегральным методом УЗО + ЭИЛ + УЗМ (б),  $\times 1500$

Fig. 8. Topography of coatings surface produced by typical electrospark alloying (a) and integral ultrasonic treatment [UST] + electrospark alloying [ESA] + ultrasonic metallization [USM] (b) methods,  $\times 1500$



После серии измерений строили графики зависимости массы катода от продолжительности ЭИЛ. Прямое измерение массы позволяет говорить о направлении массопереноса и его эффективности. Режимы легирования подбирали исходя из оптимальных условий: максимального приращения массы, отсутствия интенсивного окисления и схватывания электродов. Обработку продолжали до формирования сплошного покрытия на поверхности катода, длительность ее зависела от материала, выбранного в качестве анода. Эффективность легирования оценивали по кинетическим зависимостям изменения массы катода от времени легирования и по качеству поверхности сформированного покрытия.

Графики изменения привеса массы катода от времени его легирования порошковыми анодами на основе сплава «колмоной», содержащими разное количество карбида вольфрама, приведены на рис. 9. Как видно из полученных зависимостей, при легировании стали 45 порошковым анодом из сплава «колмоной» + 10 % WC» порог хрупкого разрушения формируемого покрытия наступил на 11-й минуте легирования. На 15-й минуте легирования было произведено ультразвуковое воздействие на формируемое покрытие в течение 2 мин с частотой 22 кГц. В результате процесс прироста массы катода, а значит, и толщины формируемого покрытия возобновился и продолжался до 25-й минуты.

Анализ кривой привеса массы катода при его легировании порошковым анодом состава

«колмоной» + 80 % WC» показал возрастание продолжительности легирования с постоянным увеличением привеса. Порог хрупкого разрушения наступал на 26-, 34- и 43-й минутах легирования. На 26-, 34- и 43-й минутах легирования производили ультразвуковое воздействие на формируемое покрытие в течение 2 мин с частотой 22 кГц, после чего вновь наблюдали прирост массы катода с 26-й по 32-ю минуту, с 34-й по 41-ю минуту и с 43-й по 57-ю минуту легирования.

Исходя из полученных экспериментальных данных по динамике массопереноса, можно сделать вывод, что прирост массы катода зависит от содержания более твердых и хрупких фаз в составе порошковых анодов, в данном случае – от концентрации карбида вольфрама WC. Большой прирост массы катода отмечен при легировании анодами с содержанием 10 % WC, наименьший – с содержанием 80 % WC.

Объяснить это можно тем, что в процессе крупнокапельной эрозии таких порошковых анодов капли хрупкой, наименее термодинамически устойчивой фазы WC, неравномерно дробясь и хаотично оседая на поверхности катода, привариваются к ней и формируют грубый неоднородный рельеф, проковать который, снизить уровень остаточных растягивающих напряжений в покрытии с помощью ультразвука и обеспечить активацию процессов взаимодействия в анодно-катодной области для дальнейшего нарастания слоя более затруднительно, чем в случае «спокойного» рельефа.

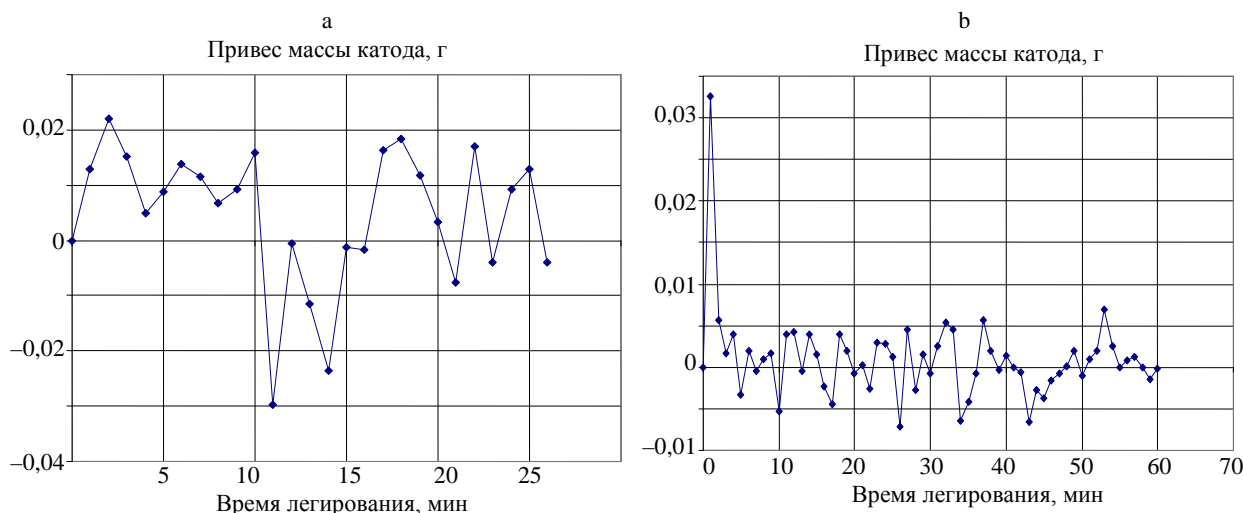


Рис. 9. Зависимость привеса массы катода от времени его легирования порошковыми анодами для сплавов: а – «колмоной» + 10 % WC»; б – «колмоной» + 80 % WC»

Fig. 9. Alloying time dependence of cathode weight increment by powder anodes for alloys: а – “colmonoy” + 10 % WC”; б – “colmonoy” + 80 % WC”

## ВЫВОДЫ

1. В процессе проведенного исследования подтверждено, что основные недостатки стандартной технологии электроискрового легирования с высокой энергией плазмы и низкочастотным механическим ударом – неустойчивость процесса, хаотичный массоперенос, обусловливаемый неравномерной и спонтанной эрозией легирующего анода, низкое качество покрытия – нивелируются в случае применения дополнительного ультразвукового воздействия на материал, особенно при использовании в качестве анодов сложнокомпонентных электродных систем.

2. При изучении роли ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий установлены широкие перспективы и высокая эффективность интегральной технологии УЗО + ЭИЛ + УЗМ, особенно для применения порошковых легирующих композиций, имеющих низкий порог хрупкого разрушения и обычно эродирующих крупнокапельным путем, приводя к формированию покрытий с грубым, неоднородным рельефом поверхности.

3. В случае использования интегральной технологии отмечена возможность дальнейшего наращивания толщины формируемых покрытий даже после достижения порога хрупкого разрушения материала покрытия. Определено, что ультразвуковое воздействие с частотой 22 кГц на формируемое покрытие по достижении последним порога хрупкого разрушения снижает величину остаточных (растягивающих) напряжений в поверхностном слое, что позволяет продолжить процесс наращивания толщины покрытия. При этом показано, что первоначальная обработка поверхности в изучаемом диапазоне ультразвуковых частот (15–44 кГц) способствует заметному возрастанию скорости массопереноса при электроискровом легировании независимо от уровня вольт-амперных характеристик и типа металлической основы и определяется прежде всего химическим составом и термодинамической устойчивостью анодов.

4. При изучении влияния частоты и интенсивности электромеханического воздействия

на кинетику массопереноса легирующего анода систем «тугоплавкое соединение – металл», полученных методами порошковой металлургии, определено, что покрытия с минимальным количеством несовершенств и регулярным рельефом с отклонениями от равнотолщинности не более 2–5 мкм получаются в процессе трехступенчатого легирования УЗО + ЭИЛ + УЗМ. Более активно нарастание массы катода происходит после ультразвуковой обработки его поверхности с частотой 44 кГц. В этом случае созданная поверхность имеет очень тонкий рельеф с существенно меньшей шероховатостью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С. 12–16.
2. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 154 с.
3. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич [и др.]. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
4. Самсонов, Г. В. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхогуров. Киев: Наук. думка, 1986. 50 с.
5. Разработка технологии получения многокомпонентных электродов систем «карбид – металл». Определение оптимальных режимов смешивания, прессования и спекания: отчет о НИР (этап 1) / Институт проблем материаловедения НАН Украины; рук. темы А. В. Паустовский. Киев, 2013. 19 с. Ф54.2/013; 1-8-13.
6. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов: теория и практика / Ф. Х. Бурумкулов [и др.]. Саранск: МГУ имени Н. П. Огарева, 2003. 504 с.
7. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электро-механическим воздействием / Н. М. Чигринова. Минск, 2010. 310 с.
8. Рахимьянов, Х. М. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании / Х. М. Рахимьянов, Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 2. С. 3–9.
9. Коротаев, Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием / Д. Н. Коротаев. Омск: СибАДИ, 2009. 255 с.

10. Самсонов, Г. В. Закономерности электроискрового разрушения тугоплавких металлов с углеродом, бором / Г. В. Самсонов, А. Н. Лемешко // Электронная обработка материалов. 1969. № 6. С. 3–6.
11. Чигринова, Н. М. Микроплазменное легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н. М. Чигринова, А. А. Кулешов, В. В. Нелаев // Электронная обработка материалов. 2010. № 2. С. 27–36.

Поступила 26.11.2015

Подписана в печать 29.02.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

#### REFERENCES

1. Lazarenko N. I., Lazarenko B. R. (1977) Electric Spark Alloying of Metal Surfaces. *Elektronnaia Obrabotka Materialov* [Electronic Processing of Materials], (3), 12–16 (in Russian).
2. Spiridonov N. V., Kobayakov O. S., Kupriyanov I. L. (1988) *Plasma and Laser Hardening Methods*. Minsk, Vysheysheya Shkola. 154 (in Russian).
3. Gitlevich A. E., Mikhailov V. V., Parkansky N. Ya., Revutsky V. M. (1985) *Electrospark Alloying of Metal Surfaces*. Kishinev, Publishing House “Shtiintsa”. 196 (in Russian).
4. Samsonov G. V., Verkhuturov A. D. (1986) *Electrospark Alloying of Metal Surfaces*. Kiev, Naukova Dumka. 50 (in Russian).
5. Paustovskiy A. V. [Project Coordinator] (2013). Development of Technology for Obtaining Multicomponent Electrodes of Carbide-Metal System. Determination of Optimal Blending, Pressing and Sintering Modes: Research Report (Stage 1). Kiev, Institute for Problems of Materials Science, National Academy of Science of Ukraine. 19. Ф54.2/013; 1-8-13 (in Russian, unpublished).
6. Burumkulov F. Kh., Lezin P. P., Senin P. V., Ivanov V. I., Velichko S. A., Ionov P. A. (2003) *Electrospark Technologies for Restoration and Strengthening of Machine Parts and Tools (Theory and Practice)*. Saransk: Ogarev Mordovia State University [Ogarev MSU]. 504 (in Russian).
7. Chigrinova N. M. (2010) Intensification of Microplasma-spark Hardening and Restoration Processes for Metal Products of Increased Accuracy by Electromechanical Action. Minsk. 310 (in Russian).
8. Rakhimyanov Kh. M., Semyonova Yu. S. (2010) Modeling of Process for Formation of Regular Microrelief at Ultrasonic Plastic Deformation. *Uprochniaiushchie Tekhnologii i Pokrytiia* [Hardening Technologies and Coatings], (2), 3–9 (in Russian).
9. Korotayev D. N. (2009) *Technological Possibilities for Formation of Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway Academy [SibADI]. 255 (in Russian).
10. Samsonov G. V., Lemeshko A. N. (1969) Regularities of Electric Destruction in Refractory Metals with Carbon and Boron. *Elektronnaia Obrabotka Materialov* [Electronic Processing of Materials], (6), 3–6 (in Russian).
11. Chigrinova N. M., Kuleshov A. A., Nelaev V. V. (2010) Microplasma-Spark Alloying with Ultrasonic Surface Modification. *Elektronnaia Obrabotka Materialov* [Electronic Processing of Materials], (2), 27–36 (in Russian).

Received: 26.11.2015

Accepted: 29.02.2016

Published online: 26.09.2016