

УДК 691.9.048.4

**Н. М. Чигринова**, д-р техн. наук, профессор, **В. Е. Чигринов**, зам. декана МТФ,  
**О. Н. Воронец**, аспирант  
Республика Беларусь, Минск, Белорусский национальный технический университет  
Тел. +375(17)293-95-81, E-mail: [chygrynova@yandex.ru](mailto:chygrynova@yandex.ru)  
Тел. +375(17)292-42-53, +375(17)293-95-81

## АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ

*Рассматриваются особенности влияния условий и режимов аддитивного электромеханического воздействия и составов композиционных легирующих анодов на характер их массопереноса на стальную основу путем оценки равномерности формируемых покрытий.*

**Ключевые слова:** электромеханическое воздействие, электроискровое легирование, ультразвуковая обработка, покрытие, аддитивная обработка, композиционные легирующие аноды.

**N. M. Chygrynova, V. E. Chygrynov**

### ADDITIVE TECHNOLOGY OF METALLIC SPRAY-TOUCHING-UP TO USING ELECTRIC-SCREENING AND ULTRASOUND IMPACT

*Discusses the features of the influence of the conditions and modes of Electromechanical additive effects and compositions of composite alloying anodes on the nature of their mass transfer to the steel base by assessing equal thickness of the formed coatings.*

**Keywords:** electromechanical impact, electric spark alloying, ultrasonic treatment, coating, additive processing, the composite alloy anode.

#### **Введение.**

Сегодня известно множество различных технологий, способных улучшить свойства и качество стандартных изделий, но большинство из них либо весьма трудо-, энергоемки и ресурсозатратны, либо не гарантируют получения ожидаемых результатов. Расширение эксплуатационных возможностей и повышение конкурентоспособности металлических изделий может быть достигнуто за счет импорта необходимых комплектующих, что экономически и технически часто неоправданно, посредством совершенствования или модифицирования стандартных материалов за счет формирования на их поверхности защитных или функционально-адаптированных покрытий, а также посредством инженерии поверхностей. Именно инженерия поверхностей представляется наиболее инновационным путем, т.к. позволяет одновременно решать несколько серьезных задач: создавать новые, не опробованные ранее технологические процессы и внедрять их в действующие производства, расширять ареал применимости модифицированных изделий за счет реализации ими более высокого уровня эксплуатационных характеристик, продлевать рабочий ресурс машин и механизмов, существенно сокращать затраты на разработку и создание новых, более дорогостоящих материалов.

Перспективными направлениями в создании и развитии таких инноваций является использование концентрированных источников энергии в таких технологиях, как электроискровые, газопламенные, плазменные, ионно-плазменные методы, лазерная обработка, воздействие на поверхность сильно-токовых электронных пучков и др., позволяющих продлевать ресурс новых и восстанавливать изношенные объекты,

создавая покрытия различного назначения. Вместе с тем широкое промышленное использование указанных методов сдерживается их относительно невысокой производительностью, стохастическим характером формирования покрытий, их ограниченной толщиной, нерегулярной структурой и неравнотолщинностью. Поэтому разработка экономичных и эффективных методов инженерии поверхности металлических объектов, сводящих к минимуму недостатки имеющихся технологий и сохраняющей их достоинства, простых для освоения в промышленном производстве является задачей актуальной, а ее решение имеет несомненную практическую ценность.

Для успешного функционирования изделий в условиях интенсивного абразивно-механического износа, знакопеременных нагрузок, агрессивных сред и высоких (более 1100 К) температур необходимо повышать их способность противостоять перечисленным воздействиям. Экономически целесообразным решением данной задачи является формирование на рабочих поверхностях изделий защитных покрытий.

Одним из наиболее эффективных методов создания покрытий различного назначения является интегральная технология электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием [1]. Физическая сущность типового процесса ЭИЛ заключается в возникновении импульсного электрического разряда при электрическом пробое диэлектрического промежутка, разделяющего электроды (катод – обрабатываемая деталь, анод – легирующий электрод), под действием электрического поля между электродами. Как следствие возникает электрическая эрозия взаимодействующих электродов. В зависимости от параметров электрической цепи количественное соотношение проэродировавшей массы металла изменяется. Количество «выброшенного» металла зависят от электроэрозионной стойкости материала электродов, времени воздействия и энергии единичного импульса.

При постоянной частоте следования импульсов удельная продолжительность легирования прямо пропорциональна количеству импульсов, приходящихся на эту площадь. В течение времени легирования анод равномерно "подает" одинаковые порции материала, а катод через некоторое время оказывается не в состоянии их принимать начнет удаляться и основной материал. Поэтому сформировать равнотолщинные покрытия типовым методом ЭИЛ весьма проблематично.

В данном исследовании рассматривается характер взаимодействия массопереноса, определяющего равнотолщинность формируемых покрытий на поверхности металлических объектов, под влиянием различных комбинаций импульсного электроискрового и ультразвукового воздействия при их обработке специальными композициями.

Цель данного исследования – стабилизация процессов взаимодействия и придание более однородного характера формируемой структуры.

### **Методика эксперимента и изучаемые материалы**

При разработке методик экспериментов учитывали физическую сущность и основные особенности метода электроискрового легирования, определяющие характер и интенсивность массопереноса, ответственного за равнотолщинность формируемых слоев, а также составы легирующих анодов на основе порошковых композиций. В этой связи были разработаны принципы управления процессом электроискрового легирования посредством применения на его разных стадиях дополнительного ультразвукового воздействия на обрабатываемую поверхность [1]. Указанное воздействие осуществлялось вибрирующим с ультразвуковой частотой легирующим

анодом, обуславливающим активацию обрабатываемого материала, сопровождаемую увеличением его внутренней энергии [1,2]. Это приводит к ускорению физико-химических взаимодействий, процессов массопереноса в системе анод – катод. При их виброударном высокочастотном контактировании на катоде-детали формируется тонкий приповерхностный слой пластически деформированного металла, скорость диффузии атомов легирующих элементов в котором увеличена, что интенсифицирует процесс насыщения ими поверхностного слоя и изменяет структурно-фазовое состояние формируемого покрытия. Вследствие снижения сопротивления металла пластическому течению под ультразвуковым воздействием [3] и многочисленных виброударов по поверхности процесс формирования покрытия методом ЭИЛ происходит более стабильно, с устойчивым и активным массопереносом, в результате чего полученное покрытие имеет большую толщину и более высокую равнотолщинность.

Самое активное участие в процессе образования топографии поверхности формируемого покрытия принимают проэродированные частицы анода, состав которых также вносит существенные коррективы в характер и интенсивность эрозии, а значит, и в изменение размерных параметров покрытий [4].

Особенности и закономерности поверхностных взаимодействий, ответственных за формирование структуры обработанного материала, определялись составом и свойствами применяемых для легирования специальных анодов и их комбинаций: твердыми сплавами групп ВК, ТК, КХН, обеспечивающими высокую износостойкость, антифрикционными материалами – бронзой, электрографитом, а также многокомпонентными материалами на основе Ni–Cr–Al, стабилизированными иттрием и тугоплавкими металлами, сочетающими требуемые свойства.

Химический состав этих электродных систем формировался с учетом создания гетерогенной структуры, состоящей из фаз с высокой твердостью (карбиды, интерметаллиды), и фаз, обладающих высокой пластичностью (твердые растворы на основе никеля, железа, кобальта). Исследовался массоперенос электродов, полученных методами литья и горячего импульсного прессования: 4А литой – тройной сплав Ni–Cr–Al со структурой двойной эвтектики  $\alpha + \gamma$ , легированный 2 масс.% алюминия, 4АС1 – тройной сплав Ni–Cr–Al в спеченном состоянии, содержащий две фазы:  $\gamma$ –твердый раствор на основе никеля с ГЦК-решеткой и  $\alpha$ –твердый раствор на основе хрома с ОЦК-решеткой, 4АС3 спеченный – тройной сплав Ni–Cr–Al из области эвтектики ( $\alpha$ –Cr+ $\beta$ -NiAl+ $\gamma$ -Ni), 4А –двойной сплав на основе  $\alpha$ -твердого раствора хрома и  $\beta$  – твердого раствора на основе интерметаллида, полученный горячим прессованием [5].

С учетом вышесказанного были разработаны методики создания равнотолщинных покрытий при их формировании указанными легирующими анодами при изменяющихся условиях энергетического воздействия. При этом изучали кинетику нарастания толщины покрытия и особенности стабилизации процессов массопереноса материалов указанных анодов при аддитивной обработке стальной основы: однократной обработкой – ЭИЛ с УЗВ; последовательным двойным нанесением слоев изучаемых материалов – обработка ЭИЛ+УЗВ, последовательным тройным нанесением УЗВ+ЭИЛ+УЗВ [6]. УЗ-воздействие осуществляли с помощью разработанного и созданного устройства ультразвукового легирования в диапазоне частот от 15 до 44 кГц.

Методически определение размерных характеристик покрытий, создаваемых при легировании стальной основы в течение фиксированного промежутка времени

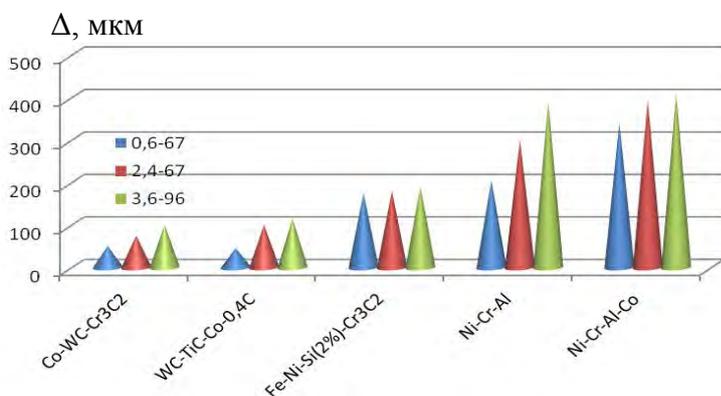
указанными анодами в условиях изменяющегося электрохимического воздействия в выполняли по стандартной методике с помощью толщиномера «Константа-5».

Равнотолщинность определяли посредством замеров после нанесения на поверхность обработанного образца равномерной сетки с величиной ячейки 5 мм.

**Экспериментальные исследования.**

Экспериментально изучалось изменение размерных параметров покрытий после аддитивной обработки поверхности стального катода указанными композициями с однократным ультразвуковым воздействием – ЭИЛ+УЗВ при изменяющейся частоте УЗ. В качестве размерной характеристики принята толщина и равнотолщинность формируемого слоя.

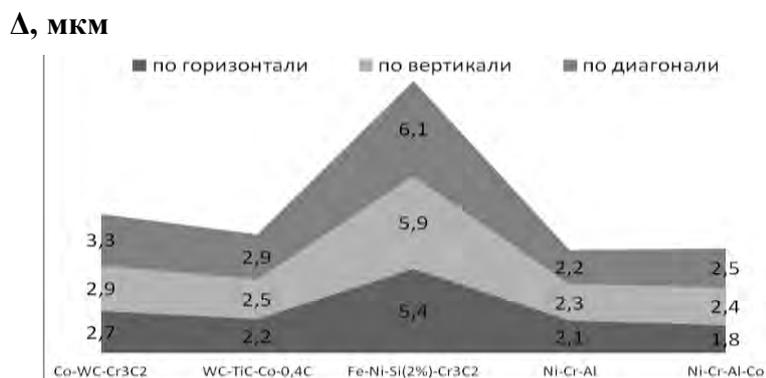
После математической обработки данных характер изменения толщины и равнотолщинности покрытий, полученных при легировании стального образца изучаемыми электродами при изменяющихся режимах электрохимического воздействия, представлен на рис. 1.



**Схема ЭИЛ+УЗВ, частота УЗВ 15 кГц**

Рисунок 1. Изменение толщины покрытий после легирования стальной основы изучаемыми анодами при изменяющихся режимах электрохимического воздействия

Анализ диаграммы показывает, что наименьший разброс по толщине наблюдается, если фиксировать изменение толщины по горизонтали поверхности полученных покрытий. При этом стабилизация процесса ЭИЛ+УЗВ наблюдается при легировании стальной основы интерметаллидными порошковыми композициями на основе никеля, хрома и алюминия и стандартным титано-вольфрамовым электродом (рис.2).



**Схема ЭИЛ+УЗВ, частота УЗВ 15 кГц**

Рисунок 2. Изменение равнотолщинности покрытий в разных направлениях, полученных после легирования стальной основы изучаемыми электродами

Об этом же также свидетельствует топография упрочненных согласно разработанным приемам поверхностей, полученных изучаемыми электродами по схеме

аддитивного воздействия ЭИЛ + УЗВ. Наиболее «спокойный» рельеф созданного покрытия отмечается при легировании стальной основы твердосплавным электродом (рис.3). Это можно объяснить более равномерным ходом вибратора созданного УЗ-устройства при легировании вследствие разработки специальной методики его перемещения. При этом состав твердосплавного электрода оказывает заметное влияние на кинетику массопереноса материала на металлическую основу (рис.4).

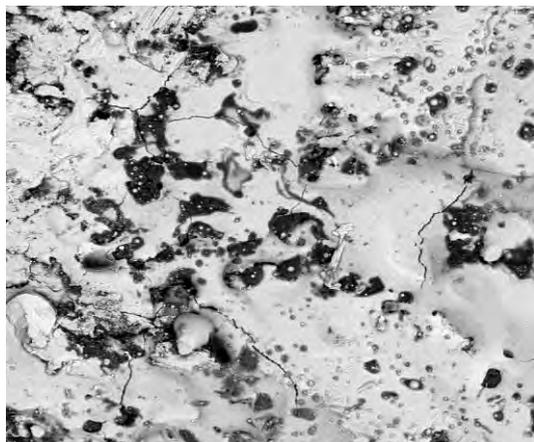


Рисунок 3. Топография поверхности покрытия, полученного методом ЭИЛ+УЗВ твердосплавным электродом Т15К6

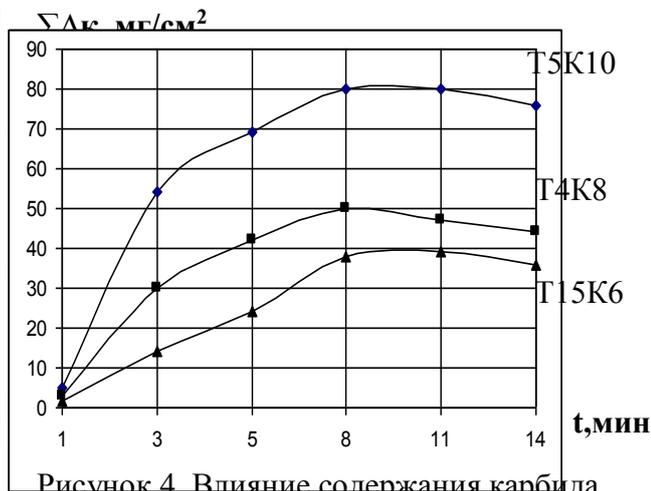
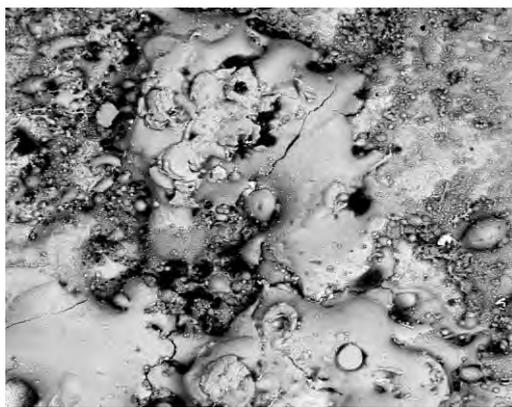
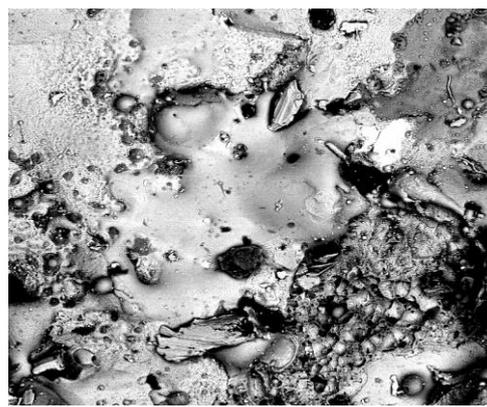


Рисунок 4. Влияние содержания карбида титана в составе анода на его массоперенос при электроискровом легировании стального катода Р6М5

Наиболее неравномерный, с наплывами и отдельными включениями, припеченными к поверхности покрытия, рельеф отмечается при ЭИЛ+УЗВ обработке стальной основы интерметаллидными и литыми электродами (рис.5).



а)



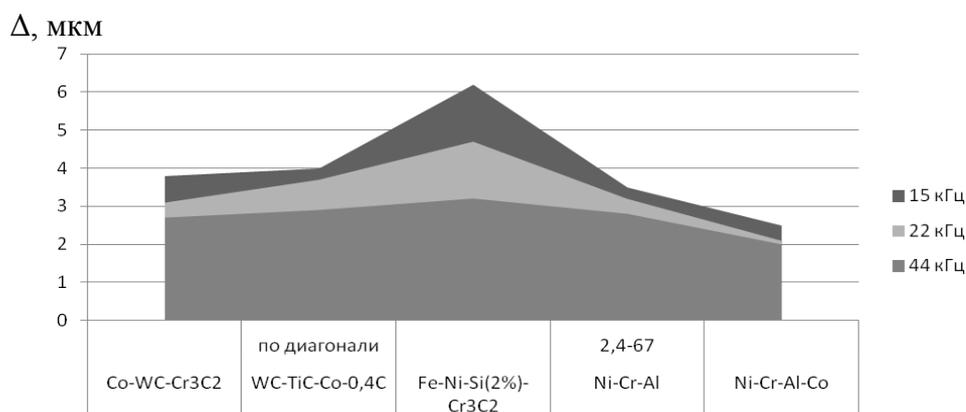
б)

Рисунок 5. Топография поверхности покрытий, полученных методом ЭИЛ +УЗВ интерметаллидным (а) и литым (б) композиционными электродами

При контроле качества измеряемых по диагонали стальной основы покрытий отмечены более заметные отклонения от равнотолщинности (рис.6). Но при этом

легирование композиционными электродами на основе стандартного твердого сплава T15K6 и интерметаллидной композиции Ni-Cr-Al-Co демонстрируют более плавные изменения топографии покрытий.

Наибольший разброс отмечается при диагональном измерении толщины покрытия (рис. 6).



**Схема ЭИЛ+УЗВ, режим ЭИЛ: I= 2,4 А, U=67 В**

Рисунок 6. Иллюстрация неравномерности рельефа поверхности покрытий, сформированных изучаемыми электродами при аддитивном ЭИЛ+УЗВ воздействии при УЗ-частоте 15 кГц

Установлено, что при использовании двойной обработки в изучаемом диапазоне электрических режимов ЭИЛ наибольшие отклонения от равнотолщинности наблюдаются при измерении толщины по диагонали всех сформированных покрытий. Измерение покрытий по горизонтали (по траектории следования электрода) продемонстрировало наибольшую равнотолщинность покрытий. После двойной обработки максимальный массоперенос материала легирующего анода, определяющего толщину формируемого покрытия, обеспечивается при работе в среднем диапазоне режимов ЭИЛ I=2,4 А и U= 67 В на частоте УЗ в 22 кГц.

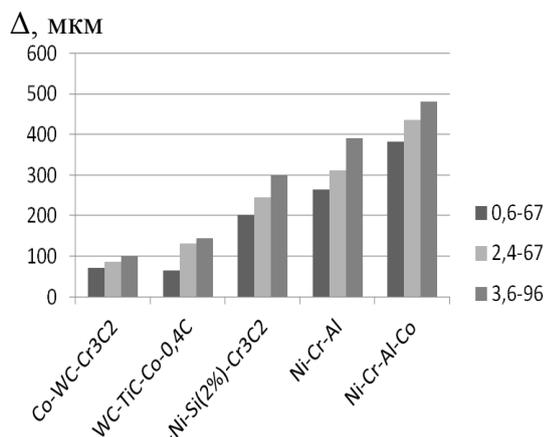
Обобщая полученные данные можно заключить, что при однократном ультразвуковом воздействии с частотой 15 кГц разница в величине потери массы на минимальном и максимальном режимах обработки составляет 33 %. При возрастании электрических параметров ЭИЛ толщины покрытий всех составов больше. Более интенсивный массоперенос происходит при использовании в качестве легирующих порошковых анодов более хрупких материалов.

Практически аналогичные закономерности формирования покрытий отмечены при аддитивной ЭИЛ+УЗВ обработке при частоте ультразвукового воздействия в 44 кГц.

Анализ полученных диаграмм позволил заключить, что наименьший разброс по толщине, т.е. наиболее равнотолщинное покрытие при использовании всех изучаемых анодов получают аддитивным методом с частотой УЗ-обработки в 44 кГц. Так, из представленных диаграмм видно, что повышение интенсивности ультразвукового воздействия от 15 кГц до 44 кГц обеспечивает сглаживание микронеровностей формируемого рельефа и покрытия имеют более равномерную толщину по всей

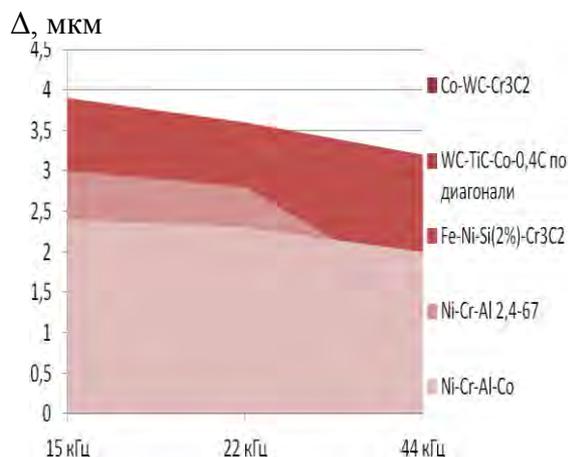
площади стальной основы. При этом в процессе ЭИЛ+УЗВ с частотой УЗ в 44 кГц наблюдается наиболее стабильный привес катода с реализацией его максимальной величины в диапазоне жестких режимов обработки ( $I=3,6$  А и  $U=96$  В).

Результаты математической обработки полученных данных проиллюстрированы рис. 7 и 8.



**Схема УЗВ+ЭИЛ+УЗВ,  
частота УЗВ 44 кГц**

Рисунок 7. Изменение толщины покрытий, полученных легированием стальной основы изучаемыми электродами при изменяющихся режимах электрохимического воздействия



**Схема УЗВ+ЭИЛ+УЗВ,  
режим ЭИЛ:  $I=2,4$  А,  $U=67$  В**

Рисунок 8. Изменение толщины покрытий, полученных в оптимальном диапазоне режимов ЭИЛ изучаемыми электродными режимами электрохимического воздействия

Хорошо согласуется с полученными ранее результатами вывод о том, что именно интенсивность УЗ-воздействия и частота ультразвуковой обработки оказывают доминирующее воздействие на кинетику и интенсивность массопереноса и формирующийся рельеф поверхности покрытий. Однако при этом прямой зависимости более равномерного нарастания толщины слоя при увеличении частоты УЗ не наблюдается. Так, установлено, что при использовании в качестве легирующих анодов хрупких интерметаллидных композиций УЗ-воздействие на самой высокой из изучаемых частот в 44 кГц более слабо влияет на изменение рельефа поверхности – отклонения от среднего уровня толщины покрытия самые высокие.

Такая же серия экспериментов была проведена при аддитивной обработке стальной основы тройным интегральным методом – УЗВ+ЭИЛ+УЗВ.

При этом установлено, что при использовании двойной аддитивной технологии ЭИЛ+УЗВ воздействие интенсивности ультразвуковой обработки (от 15 кГц до 44 кГц) на размерные характеристики создаваемых изучаемыми анодами покрытий выражено слабее, чем после обработки стальных образцов по тройной аддитивной схеме – УЗВ+ЭИЛ+УЗВ.

Тройная обработка УЗВ+ЭИЛ+УЗВ обеспечивает более стабильную, но существенно меньшую эрозию легирующего анода и более равномерный массоперенос во всем диапазоне режимов ЭИЛ и частот УЗ. При обработке поверхности стального

катода тройным аддитивным методом с частотой УЗ – воздействия в 15 кГц смена режимов ЭИЛ практически не сказывается на потере массы легирующего анода. Разница в величине потери массы на минимальном и максимальном режимах УЗВ+ЭИЛ+УЗВ при 22 кГц и 44 кГц заметно больше, чем при частоте УЗ в 15 кГц и самый активный массоперенос зафиксирован при обработке на жестких режимах ЭИЛ  $I=3,6$  А и  $U=96$  В.

### **Заключение.**

Результаты проведенных серий экспериментов по влиянию режимов интегральной аддитивной технологии, включающей электроискровое и ультразвуковое легирование, при смене частот и интенсивности ультразвукового воздействия и составов легирующих анодов, на размерные характеристики создаваемых покрытий показали стабилизирующую роль ультразвука в процессе формирования равнотолщинных слоев и более равномерного рельефа их поверхности. Наиболее оптимальное сочетание перечисленных параметров отмечается при использовании тройной аддитивной технологии: УЗВ+ЭИЛ+УЗВ; в диапазоне минимальных режимов легирования показатель потери массы легирующего анода независимо от его состава и метода получения уменьшается с увеличением частоты УЗ-воздействия. В диапазоне максимальных режимов – наблюдается обратная картина.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Чигринова, Н. М. Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании. / Н. М. Чигринова, В. Е. Чигринов, С. И. Ловыгин // Науч.-техн. журнал «Наука и техника». – Минск, 2016. – т. 15. – № 5(ВАК). – С. 380–390.
2. Белоцкий, А. В. Ультразвуковое упрочнение металлов / А. В. Белоцкий [и др.]. – Киев: Техника, 1989. – С. 3365–3371.
3. Chigrinova, N. Theoretical model of the engineering of metal surfaces by micro-plas-mosparc alloying with the alternative in tensity of the mechanical impact / N. Chigrinova // Surface engineering and Applied electrochemistry. - USA, 2010. - Vol.46. – № 1.– p. 21–26. – ISSN 1068 – 3755
4. Мазанко, В.Ф. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций: в 2 т. / В.Ф. Мазанко [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 1 т. – 339 с.
5. Чигринова, Н. М. Разработка и свойства электродных материалов для электроискровых покрытий при упрочнении и восстановлении деталей из конструкционных сталей / Н. М. Чигринова, А. В. Паустовский, Р. А. Алфинцева, Ю. Г. Ткаченко, С. Н. Кириленко, Д. З. Юрченко, В. С. Терещенко // 8 Международный симпозиум «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка» в рамках проведения 14 международной специализированной выставки «Порошковая металлургия - 2013, выставки «Сварка и резка - 2013, специализированного салона «Защита от коррозии. Покрытия-2013». – Минск, апрель 2013.– С.152–157.
6. Чигринова, Н. М. Влияние режимов электроискровой обработки с ультразвуковым воздействием переменной интенсивности и частоты на свойства покрытий / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин // Науч.-техн. журнал "Порошковая металлургия" (ВАК).– Минск, 2016.

Поступила в редколлегию 20.02.2017 г.