

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ЧАСТОТЫ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

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

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ОХП ИСЗП ГНУ «Институт порошковой металлургии» г. Минск, Беларусь

Поступила 11.09.2016 г.

*Изучались кинетика массопереноса и динамика формирования покрытий интегральным способом электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием на разных стадиях их формирования. Легирующими электродами являлись композиции, изготовленные методом высокоэнергетического горячего прессования (ВГП), на основе системы тугоплавкий карбид (WC) – связка в виде сплава на основе никеля из серии «колмоной», Ni–Ni<sub>3</sub>B, легированный добавками меди и кремния.*

Технологии поверхностной обработки при создании функционально-адаптированных покрытий имеют близкую физико-химическую природу с большинством процессов 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 ней 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 получения работоспособных покрытий, улучшающих свойства обработанной поверхности.

Для выяснения роли перечисленных факторов в процессе формирования работоспособных качественных покрытий методом электроискрового легирования изучалось поведение электродов из порошковых сплавов на основе никеля («колмоной»), полученных методом распыления расплавов.

В исходном состоянии порошки указанного сплава имеют глобулярную форму, доэвтектическую структуру с первой 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 размола-смешивания в течение четырех часов [1]. Макро- и микроструктурное состояние литого сплава «колмоной» + 10 % WC» приведено на рис. 2.

Исследование механизмов массопереноса полученных анодов на поверхность металлической основы из стали 45 и характера закрепления на ней создаваемого покрытия необходимых конфигураций и качества производилось на образцах размером 10×10×10 мм. Время легирова-

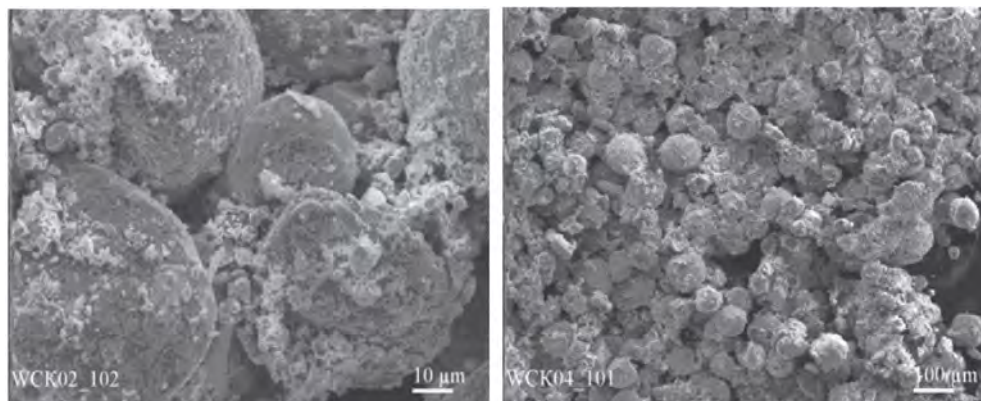
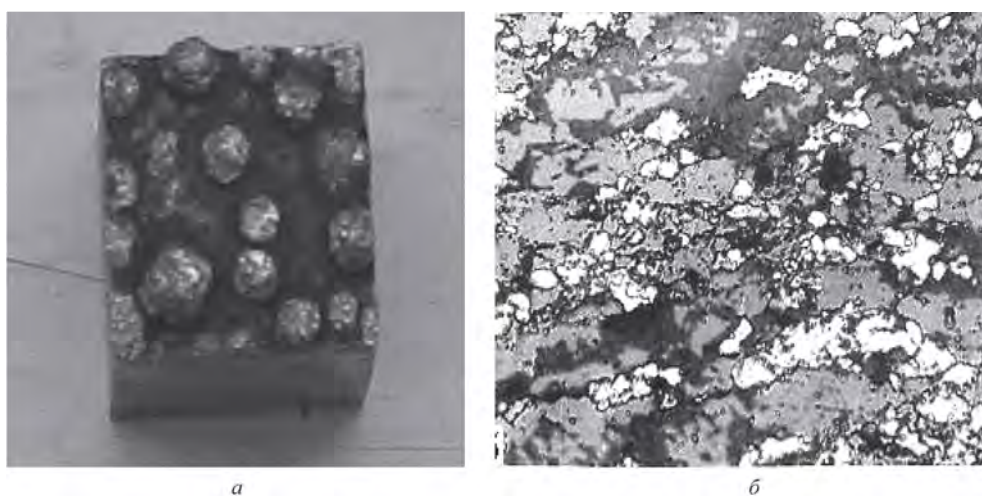


Рис. 1. Внешний вид композиции «колмоной» + 10 % WC

Рис. 2 Макро- и микроструктура сплава «колмоной» +10 % WC,  $\times 250$ : *a* – макроструктура; *б* – микроструктура

ния одинаково для всех образцов. В экспериментах для сравнения применялись типовой метод ЭИЛ и интегральная технология электроискровой обработки, состоящая в последовательном трехступенчатом легировании, но с применением на двух стадиях ультразвуковой обработки (УЗВ+ЭИЛ+УЗМ) [2].

При использовании типового метода ЭИЛ нанесение основного покрытия осуществлялось на установке электроискровой обработки «Alier55» с выбранной частотой 600 Гц. В процессе легирования стального катода порошковыми анодами была отмечена существенная нестабильность процесса, выраженная в заметных колебаниях уровня электрических параметров, приводящего к хаотичному массопереносу, определяемому неравномерной и спонтанной крупнокапельной эрозией легирующего анода (рис. 2, *a*).

Считается, что формирование неравномерного рельефа упрочняемой поверхности при ЭИЛ напрямую зависит от приведенной энергии им-

пульсов: чем больше приведенная энергия, тем рельеф грубее, а шероховатость выше [3]. При данном подходе не учитывается сложность и стохастичность процесса ЭИЛ, определяемого множеством взаимовлияющих факторов, и поэтому шероховатость поверхности, образованная электроискровой обработкой, близка к нерегулярной. Так как 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 отрывающиеся капли анода (рис. 2, *a*), 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, но и тем больше различия в коэффициентах теплопроводности и теплоотвода меж-

ду осевшей каплей материала анода и поверхностью катода, что вызывает появление трещин (рис. 3).

Сделать покрытие, формируемое в процессе типового ЭИЛ, более совершенным позволяет применение дополнительного ультразвукового воздействия [3, 4].

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 [4]. Именно такая обработка обеспечивает гарантированное сглаживание неоднородностей в рельефе поверхности, более стабильный массоперенос материала анода, более устойчивое протекание диффузионных процессов в анодно-катодной зоне. Кроме того, ранее [4] была выдвинута гипотеза, 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 [5, 6].

В подтверждение выдвинутой гипотезы дополнительно к ранее проведенным исследованиям [2] изучалось влияние ультразвукового воздействия на формируемые порошковыми композициями электроискровые покрытия с целью определения возможности увеличения массы

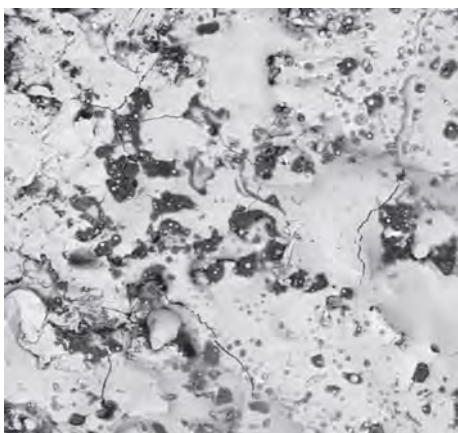


Рис. 3. Разветвленная сеть микротрещин на поверхности покрытия, полученного стандартным методом ЭИЛ,  $\times 1500$

и толщины покрытий *после* достижения порога хрупкого разрушения материала. Практически это осуществлялось в помощью разработанного и созданного ультразвукового устройства, состоящего из генератора, блока питания и ультразвукового преобразователя, работающего в диапазоне частот от 15 до 150 кГц.

Экспериментально эта оценка производилась посредством изучения кинетики массопереноса порошковых анодов во времени с использованием гравиметрического метода для определения привеса катода. Измерение массы стального катода проводили при помощи весов аналитических марки АДВ-200 с погрешностью  $\pm 2 \times 10^{-4}$  г через каждую минуту легирования. После серии измерений строились 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. Обработка продолжалась 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.

На рис. 4 представлены графики изменения привеса массы катода от времени его легирования порошковыми анодами на основе сплава «колмоной», содержащими разное количество карбида вольфрама.

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 минуте легирования было произведено УЗ-воздействие на формируемое покрытие в течение 2-х минут 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 разруше-

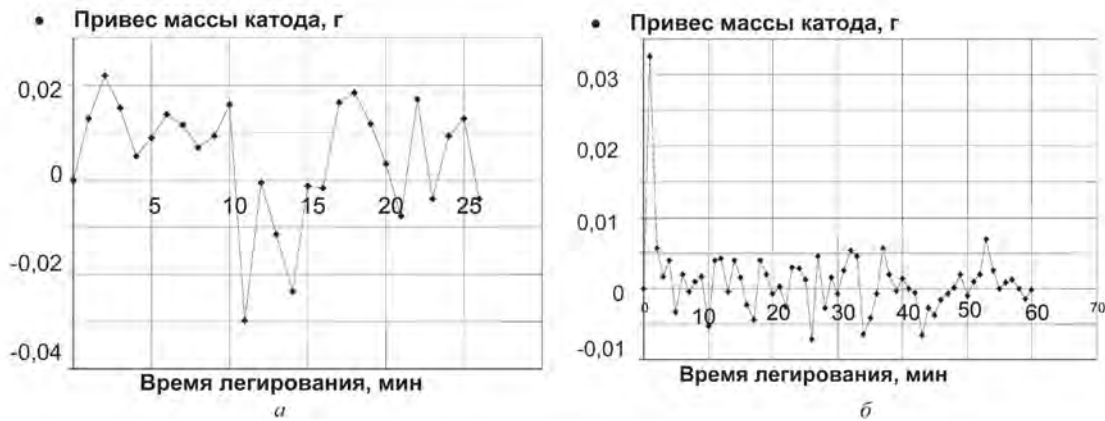


Рис. 4. Зависимость привеса массы катода от времени его легирования порошковыми анодами:  
*a* – сплав «колмоной» + 10 % WC; *б* – сплав «колмоной» + 80 % WC

ния наступал на 26, 34 и 43-й мин легирования. На 26, 34 и 43-й мин легирования производилось УЗ-воздействие на формируемое покрытие в течение 2 мин с частотой 22 кГц, после чего вновь наблюдался прирост массы катода с 26-й по 32-ю мин, с 34-й по 41-ю мин и с 43-й по 57-ю мин 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 дробятся и хаотично оседают 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 более «спокойного» рельефа.

Интегральная технология электроискровой обработки, состоящая в последовательном трехступенчатом легировании (УЗВ+ЭИЛ+УЗМ), как было установлено на предыдущих этапах исследований, отличается наиболее высокой стабильностью изменения электрических характеристик

процесса во времени, устойчивой эрозией легирующего анода 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 [2].

Диапазон энергомеханических параметров интегральной обработки выбирался с учетом сделанных ранее выводов, что именно частота и интенсивность УЗ-воздействия оказывают определяющее влияние на структурное и напряженное состояние легирующего анода и обрабатываемого катода, а величина электрических режимов – на характер и эрозионную способность материалов анодов и, соответственно, динамику их массопереноса. Предварительное ультразвуковое воздействие (УЗВ) на поверхность катода осуществлялось при помощи установки ультразвукового искрового легирования УИЛ-2 с максимально возможной частотой 20,4–23,6 кГц, а модификация поверхности уже сформированного покрытия – с применением специально разработанного и созданного авторами макетного образца УЗ-устройства, работающего в диапазоне частот от 15 до 150 кГц, с выбранной для экспериментов частотой 44 кГц [7].

Применение созданного ультразвукового устройства для модификации сформированного в процессе типового ЭИЛ покрытия (рис. 4, *a*) позволило существенно улучшить его качество: топография упрочненной поверхности отличается минимальным количеством структурных несовершенств и регулярным рельефом с откло-

нениями от равномерности не более 2–5 мкм (рис. 5, б), что легко объясняется действием ультразвука на вещество [3].

Микроструктура поверхности катода, полученная легированием электродом «колмоной» + 10 % WC, представлена на рис. 6.

Более стабильный характер покрытия, полученный в процессе трехступенчатого легирова-

ния УЗО+ЭИЛ+УЗМ, можно объяснить активацией поверхности катода в процессе ее предварительного деформирования с ультразвуковой частотой, обуславливающего создание дополнительных условий для возникновения искрового разряда, в результате чего осуществляется более интенсивный массоперенос, а также проковка высокочастотным механическим ударом

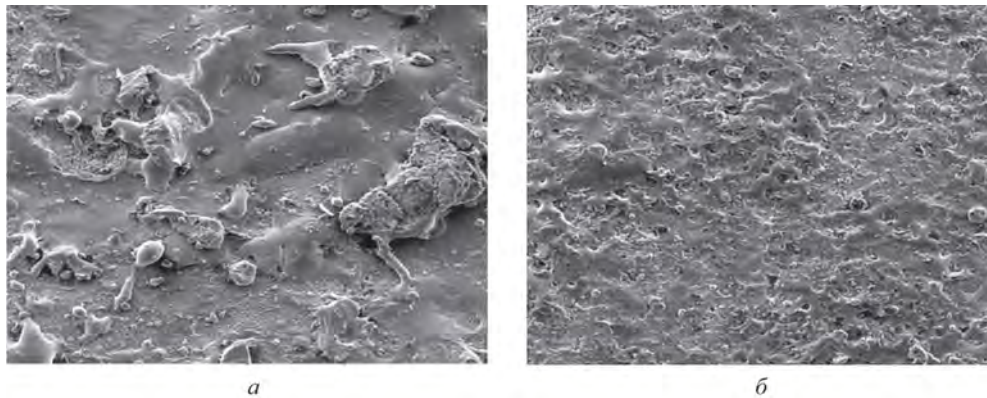


Рис. 5. Топография поверхности покрытий, полученных типовым и интегральным методами ЭИЛ,  $\times 1500$ : а – типовой метод ЭИЛ; б – интегральный метод ЭИЛ (УЗВ+ЭИЛ+УЗМ)

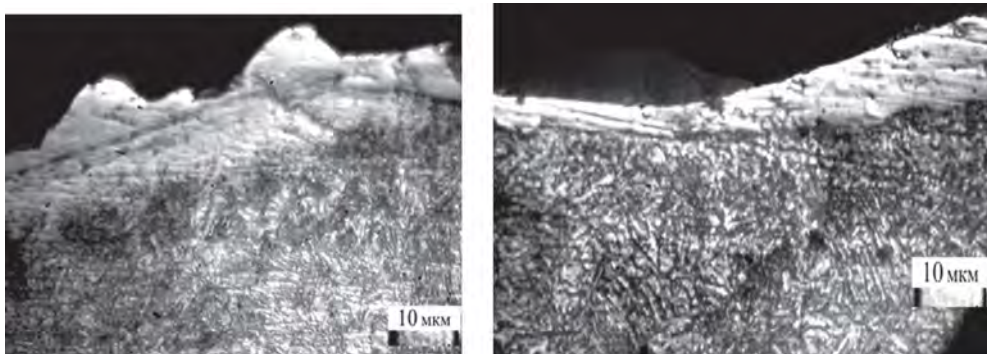


Рис. 6. Микроструктура поверхностей катода, полученная легированием электродом «колмоной» + 10 % WC –  $\times 100$ : а – типовой метод ЭИЛ; б – интегральный метод ЭИЛ (УЗВ+ЭИЛ+УЗМ)

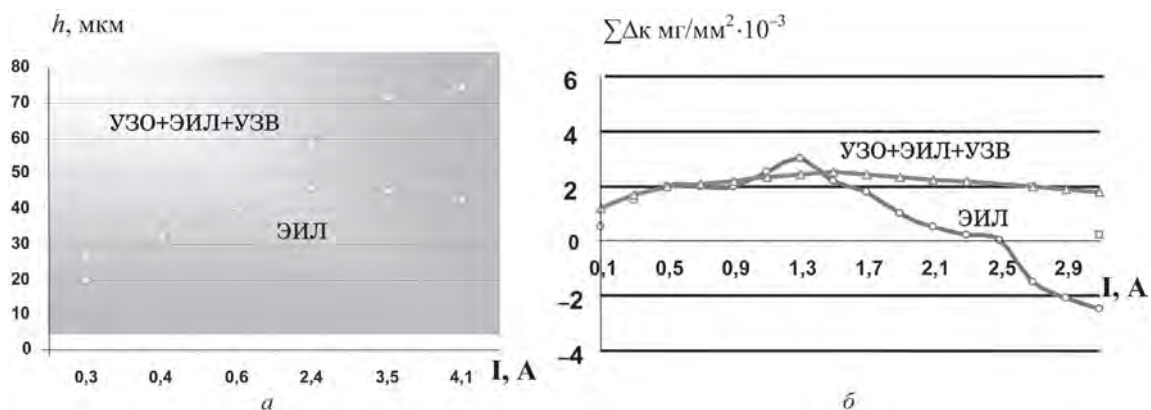


Рис. 7. Влияние электрохимического воздействия разной интенсивности на толщину покрытия и динамику массопереноса: а – рост толщины покрытия; б – динамика массопереноса

электрода (анода) поверхности стальной основы (катода) при ультразвуковой модификации наносимого покрытия, которая значительно увеличивает его однородность и плотность [8]. По видимому, наложение таких колебаний способствует большему диспергированию капель расплава, переносимых с легирующего электрода на упрочняемую деталь.

На более ранних стадиях исследования было выявлено, что уровень энергетического воздействия на систему металл–покрытие увеличивается за счет появления в анодно-катодной области при ультразвуковой обработке дополнительного количества (до 40 %) высокочастотных импульсов тока и напряжения. Это позволяет расширить диапазон рабочих токов процесса ЭИЛ, обеспечивающих формирование покрытий увеличенной в 1,3–2,2 раза толщины со сниженной шероховатостью (рис. 7, а) за счет ускоренного на 80–120 % и устойчивого массопереноса (рис. 7, б) [2].

**Заключение.** В процессе проведенного исследования подтверждено, что основные недостатки стандартной технологии ЭИЛ с высокой энергией плазмы и низкочастотным механическим ударом – нестабильность процесса, хаотичный массоперенос, обусловливаемый неравномерной и спонтанной эрозией легирующего анода, низкое качество покрытия нивелируются в случае применения дополнительного ультразвукового воздействия на материал.

В результате использования интегральной технологии отмечена возможность дальнейшего наращивания толщины формируемых покрытий даже *после* достижения порога хрупкого разрушения материала покрытия. Определено, что ультразвуковое воздействие с частотой 22–44 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.

## Литература

1. Паустовский, А. В. Разработка технологии получения многокомпонентных электродов систем карбид–металл. Определение оптимальных режимов смешивания, прессования и спекания / А. В. Паустовский // Отчет о научно-исследовательской работе. – Киев, 2013. – 19 с.
2. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук / Н. М. Чигринова. – Минск, 2010. – 310 с.
3. Сливин, А. Н. Исследование процесса поверхностной ультразвуковой обработки металлов. Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях / А. Н. Сливин, В. А. Нестеров, С. С. Хмелев. – Бийск: изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2010.
4. Способ электроискровой обработки с виброударным упрочнением металлической поверхности с задаваемыми амплитудой и частотой: пат. № 8228 / Н. М. Чигринова. – Оpubл. 5.02.2012.
5. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф. Х. Бурумкулов [и др.]. – Саранск: МГУ им. Н. П. Огарева, 2003. – 504 с.
6. Кортаев, Д. Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием / Д. Н. Кортаев. – Омск: СибАДИ, 2009. – 255 с.
7. Способ и устройство контроля и управления кинетикой нарастания покрытий по продолжительности микроплазменных воздействий: пат. ВУ № 2601 / Н. М. Чигринова, А. В. Дроздов. – Оpubл. 15.12.2005.
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.

## INFLUENCE OF THE ELECTRIC SPARK TREATMENT MODES WITH ULTRASONIC EXPOSURE OF VARIABLE INTENSITY AND FREQUENCY ON COATING PROPERTIES

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

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

*The kinetics of a mass transfer and dynamics of coating formation have been studied using an integrated way of an electro-spark alloying with additional ultrasonic exposure at different stages of their formation. The alloying electrodes were the compositions made by the method of the high-energy hot pressing (HEHP) on the base of refractory carbide system (WC) – a binder in the form of the nickel-based alloy of «colmonoy» Ni–Ni<sub>3</sub>B series, alloyed by additives of copper and silicon.*