

9. Устройство для обнаружения и сигнализации при приближении к линии электропередач: положительный результат предварительной экспертизы по заявке на выдачу патента на изобретение: МПК G 01R 31/34 / В.Г. Андруш, Г.И. Белохвостов, В.В. Русских, А.А. Пинчук. - № а 20210180. Заявлен приоритет по дате: 21.06.2021.

10. Патент РФ №2473922, МПК G01R 31/34//БИ. – №3, 31.10.2011 г.

11. Часть 2 (5/10). – [Электронный ресурс.] – Режим доступа: <http://swsu.ru>. – Дата доступа: 27.02.2022.

12. Способ измерения дальности и линейных размеров объектов по их телевизионным изображениям. – [Электронный ресурс.] – Режим доступа: <http://elibrary.ru>. – Дата доступа: 27.02.2022.

УДК 629.621.432.691.9.048.4

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ АСПЕКТ В ПОЛУЧЕНИИ УПРОЧНЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ

доктор техн. наук, профессор **Н.М. Чигринова**. ФММП, БНТУ, Минск

Резюме. – в данной работе представлены результаты изучения влияния материаловедческого аспекта – состава многокомпонентных легирующих анодов, способов их изготовления и технологических параметров интегральной технологии электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием на динамику массопереноса получаемых упрочняющих покрытий.

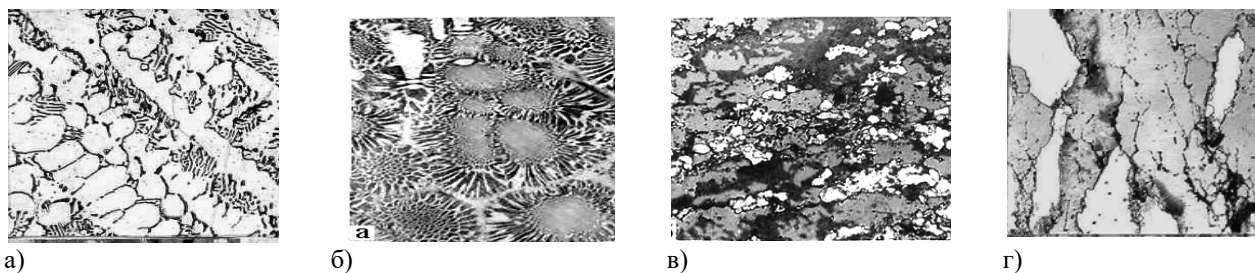
Ключевые слова: аноды, ультразвуковое воздействие, электроразрядное спекание.

Введение. Сегодня перед целым рядом производств в различных отраслях народного хозяйства стоит актуальная задача повышения конкурентоспособности производимой продукции. Одним из наиболее эффективных решений является поверхностное упрочнение производимых изделий различного назначения с формированием функционально-адаптированных покрытий широкого спектра действия.

Среди множества технологий создания таких покрытий можно выделить интегральный метод электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием (ЭИЛ с УЗВ) [1]. При указанной обработке формирование покрытия осуществляется за счет массопереноса материала легирующего анода на поверхность упрочняемого изделия (катода) и этот процесс происходит более стабильно, с устойчивым и активным массопереносом за счет снижения сопротивления металла пластическому течению под ультразвуковым воздействием [2] и многочисленных виброударов по упрочняемой поверхности. В результате полученное покрытие имеет большую толщину и более высокую равномерность. Кроме того, под действием ультразвука происходит перераспределение, стабилизация и релаксация остаточных напряжений в материале покрытия, независимо от его состава [3]. Однако и на состав покрытия, и на его структуру, а значит, и свойства, оказывает серьезное влияние один фактор, определяющий и скорость, и особенности массопереноса на упрочняемую поверхность, а именно – состав легирующего анода и способ его изготовления. В результате использования многокомпонентных легирующих анодов расширяются возможности управления как элементным составом упрочненной поверхности, так и уровнем и распределением остаточных напряжений по её сечению [4], что определяет работоспособность изделия в целом. В данной работе приведены некоторые результаты исследования влияния состава многокомпонентных легирующих анодов, полученных разными способами, на кинетику массопереноса и толщину сформированных покрытий при различном энергетическом воздействии. Для решения поставленных вопросов применяли серийное оборудование для электроискрового легирования и ультразвуковой обработки типа «Элитрон» и «Alier», УИЛ-2 в оптимальном диапазоне параметров, установленном в ранее проведенных исследованиях [5].

Основная часть. В качестве легирующих анодов применяли многокомпонентные электродные системы: металлы-интерметаллиды и металлы-карбиды, легированные Fe, Ni, Si, Ti, Co, Mn, полученные методами высокоэнергетического горячего прессования (ВГП), электроразрядного спекания (ЭРС) и литья [6]:

сплав К4Ф – 2 шт. (Co-WC-Cr₃C₂) – ВГП; сплав 12С₂ – Fe-Ni-Si (2%)-Cr₃C₂ – ЭРС; сплав 12С4 – Fe-Ni-Si (4%)-Cr₃C₂ – ЭРС; сплав Т15К6У – WC-TiC-Co-0,4C – ВГП; сплав 4А литой – Ni-Cr-Al – литье; сплав 4АCo литой – Ni-Cr-Al-Co – литье. Микроструктура этих композиций представлена на рисунке 1.



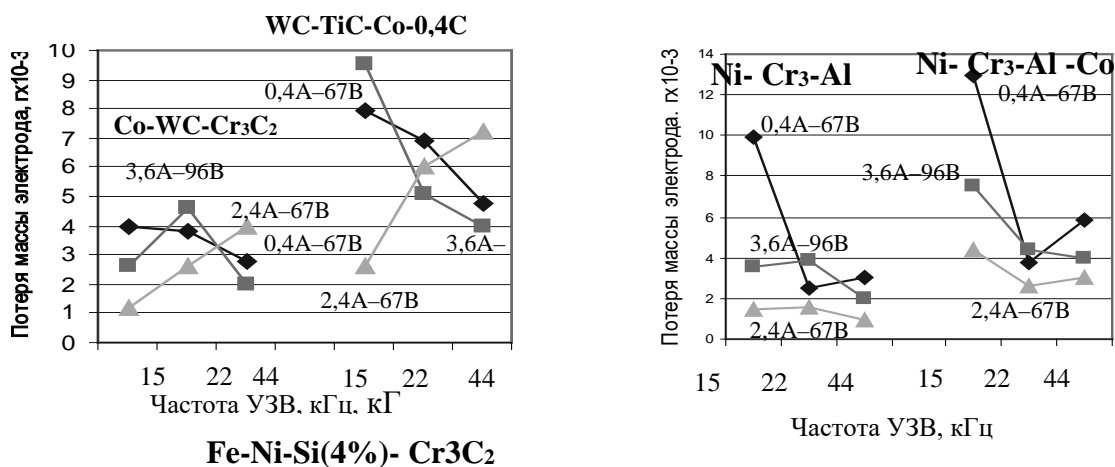
литые системы: а – 2А; б – 4А; спеченные системы: г – 4А; д – 4АС1
Рисунок 1 – Микроструктура литых и спеченных электродов (× 500)

Известно [7], что такие материалы содержат хрупкие эвтектики, определяющие их неравномерный и стохастический крупнокапельный массоперенос, но при этом толщина формируемых покрытий на 15–25 % больше, чем при обработке поверхности стандартными твердыми сплавами. Методически определение динамики массопереноса и измерения толщины полученных покрытий проводили на образцах одного размера, легируемых согласно схемам ЭИЛ+УЗВ и УЗВ+ЭИЛ+УЗВ. В качестве металлической основы, на которую производился массоперенос материалов изучаемых электродов, использовали сталь 45. Электрические характеристики процесса ЭИЛ фиксировали с помощью цифрового осциллографа В-421. Оценку толщины покрытия производили с помощью многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К-5» или прибора аналогичного типа. Математическая обработка статистических данных эксперимента осуществлялась с помощью методологии поверхностей откликов и компьютерной системы *Mathematica*. В приведенных таблице 1 представлены данные по массопереносу материалов изучаемых электродов на стальную подложку в течение фиксированного времени (5 минут) при ее легировании в диапазоне оптимальных режимов ЭИЛ с переменной интенсивностью однократного ультразвукового воздействия по схеме ЭИЛ+УЗВ.

Таблица 1 – Изменение толщины покрытий различного состава в зависимости от режимов упрочнения по схеме ЭИЛ+УЗВ и состава легирующих анодов

Материал электрода	Режим ЭИЛ I, A-U, B	Частота УЗВ 15 кГц		Толщина покрытия, мкм	Частота УЗВ 22 кГц		Толщина покрытия, мкм	Частота УЗВ 44 кГц		Толщина покрытия, мкм
		Эф-ные У/Л	Эф-ная мощность, Вт		Эф-ные У/Л	Эф-ная мощность, Вт		Эф-ные У/Л	Эф-ная мощность, Вт	
Co-WC-Cr ₃ C ₂	0,3-45	47/2,30	104,8992519	50,0	35/2,21	63,83201696	20,0	16/0,77	11,17361730	16,0
	0,6-96	46/2,34	107,3701696	75,0	28/1,38	23,8844973	22,5	12/0,79	9,051592819	18,0
	3,6-96	46/2,49	115,2913569	100,0	28/1,38	22,0657872	35,0	12/0,75	9,139145259	19,0
WC-TiC-Co-0,4C	0,3-45	47/2,41	112,5029014	45,0	31/2,05	64,18460982	25,0	15/0,78	11,78846033	25,0
	0,6-96	47/2,17	103,7567779	100,0	34/1,31	52,73608105	45,0	12/0,74	9,60632123	30,0
	3,6-96	48/1,83	85,97181898	115,0	33/1,49	53,30254209	50,0	13/0,75	10,05332418	45,0
Fe-Ni-Si(2%)-Cr ₃ C ₂	0,3-45	57/1,89	104,5941951	175,0	34/2,15	73,28782653	55,0	15/0,79	9,051592819	30,0
	0,6-96	54/2,07	117,7915347	180,0	34/2,14	74,14336885	170,0	13/0,76	9,560442275	45,0
	3,6-96	57/1,68	101,0325194	190,0	33/2,14	70,34568561	190,0	15/0,68	9,949608038	55,0
Ni-Cr-Al	0,3-45	54/2,20	121,7579458	205,0	47/2,08	93,4014866	50,0	24/1,16	24,35565489	25,0
	0,6-96	48/1,50	81,82164632	300,0	46/2,5	115,4009261	100,0	27/1,01	25,64593041	41,0
	3,6-96	55/2,47	141,1205279	390,0	45/2,38	106,75245	130,0	25/1,25	27,99832371	46,0
Ni-Cr-Al-Co	0,3-45	55/2,69	147,8265086	340,0	34/2,20	73,64162773	200,0	23/1,09	24,97782856	32,0
	0,6-96	56/1,77	98,4736386	395,0	35/2,18	78,76164016	205,0	25/1,33	33,93521148	46,0
	3,6-96	58/1,48	87,69107454	410,0	35/2,21	77,99934551	215,0	26/1,40	36,5725793	60,0

Математическая обработка приведенных данных и проведенные расчеты позволили построить диаграммы потери массы легирующего анода при изменении энергетических параметров интегрального метода в процессе легирования стальной подложки в зависимости от состава легирующих анодов с однократным ультразвуковым воздействием различной частоты 15кГц, 22кГц, 44 кГц (рисунок 2).



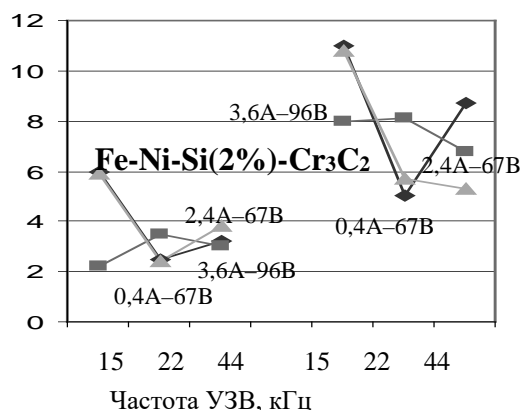


Рисунок 2 – Влияние состава электрода на величину потери его массы на различных режимах ЭИЛ и УЗВ

Анализ графиков на рисунке 2 позволил сделать ряд выводов:

1) на изменение потери массы легирующих анодов кроме их состава оказывают влияние электрические и частотные параметры ЭИЛ и УЗВ;

2) эрозия легирующих анодов на основе твердых сплавов групп Co-WC-Cr₃C₂ и WC-TiC-Co-0,4C, изготовленных методом ВГП, тем выше, чем больше величина тока и напряжения при ЭИЛ, что естественно.

При этом следует отметить, что при обработке металлической основы электродами обоих составов наиболее стабильный массоперенос при легировании металлической основы во всем изучаемом диапазоне режимов ЭИЛ отмечен при частоте УЗВ в 22 кГц. Но на малых и жестких режимах ЭИЛ увеличение частоты УЗВ приводит к снижению скорости массопереноса при работе электродами обеих групп;

3) при обработке поверхности стальной основы интерметаллидными анодами составов Ni-Cr₃-Al, Ni-Cr₃-Al-Co, полученными методом литья, видно, что наличие в составе многокомпонентного анода состава Ni-Cr₃-Al-Co легкоплавкого кобальта, вызывает более активную эрозию, чем при работе электродом Ni-Cr₃-Al, независимо от частоты УЗВ. В отличие от твердосплавных анодов возрастание частоты УЗВ приводит к интенсификации процесса эрозии интерметаллидных анодов, что обусловлено их более высокой хрупкостью. Следует также подчеркнуть, что электроды, полученные методом литья, разрушаются активнее, чем аноды, изготовленные методом ВГП. Возрастание величины эрозии литейных анодов по сравнению с анодами после ВГП практически в 2 раза определяется, очевидно, не только их составом, но и технологией получения.

4) анализ величины эрозии легирующих анодов составов Fe-Ni-Si(2%)-Cr₃C₂ и Fe-Ni-Si(4%)-Cr₃C₂ в зависимости от режимов ЭИЛ и УЗВ показал большее сходство с изменением эрозии интерметаллидных анодов. Это, скорее всего, также связано с наличием в их составе твердых карбидов хрома и кремния. Но при этом во всем диапазоне режимов ЭИЛ и УЗВ данные электроды указанных составов разрушались менее активно и характер их разрушения был более спокойным, что можно объяснить их структурой, полученной в процессе ЭРС.

Состав легирующих анодов также ответственен за массоперенос, результатом которого является получение покрытий определенной толщины. На рисунке 3 показано, как изменяется толщина формируемого упрочненного слоя в зависимости от изменения состава электродного материала и всех изучаемых параметров интегральной обработки.

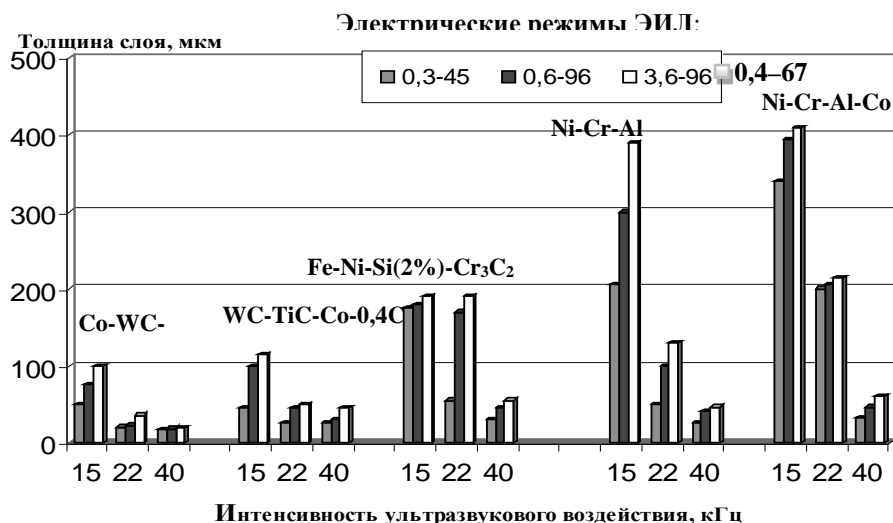


Рисунок 3 – Влияние состава легирующих анодов и интенсивности ультразвукового воздействия на изменение толщины формируемого слоя на различных режимах ЭИЛ

Так, из приведенной диаграммы видно, что наиболее толстые покрытия образуются при работе интерметаллидными анодами, полученные по технологии литья. Это объясняется их высокой хрупкостью и эродированием крупнокапельным путем (рисунок 4)

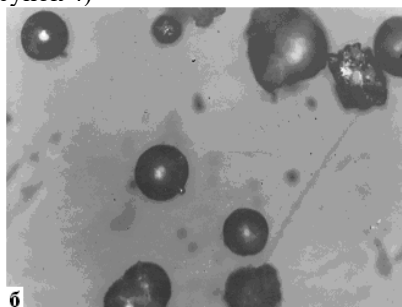


Рисунок 4 – Продукты эрозии после ЭИЛ стального катода интерметаллидными электродами ($\times 200$)

Минимальная толщина упрочненного слоя реализована при использовании электродных системы на основе карбидо-вольфрамовых твердых сплавов, легированных кобальтом и карбидами хрома, изготовленных в процессе ВГП. Несколько более интенсивно происходит эрозия анода на основе титано-вольфрамовых твердых сплавов **WC-TiC-Co-0,4C**, легированных углеродом и кобальтом, что можно объяснить его более высокой хрупкостью. Однако, наиболее сильное воздействие на изменение толщины покрытия, независимо от режимов и составов легирующих анодов, величину эффективной мощности процесса оказывает интенсивность ультразвуковой обработки. Так видно, что увеличение частоты ультразвука от 15 кГц до 44 кГц при модифицировании уже сформированных изучаемыми анодами покрытий практически привело к нивелированию различия в их толщинах при обработке во всем принятом диапазоне режимов ЭИЛ и уменьшило различия в уровне средней (эффективной мощности) интегральной обработки (рисунки 2 и 3). Аналогичные эксперименты по контролю толщины формируемого покрытия, величине эффективной мощности при изменении входных параметров интегрального процесса – интенсивности и частоты ультразвукового воздействия, уровня электрических параметров ЭИЛ, состава легирующих анодов были проведены во второй серии экспериментов после обработки стального катода с двойным ультразвуковым воздействием – схема УЗВ+ЭИЛ+УЗВ. Во второй серии фиксировался привес обрабатываемого катода (стальной основы) при его легировании по схеме УЗВ+ЭИЛ+УЗВ изучаемыми анодами в выбранном диапазоне электрических и ультразвуковых параметров (рисунки 5–7).

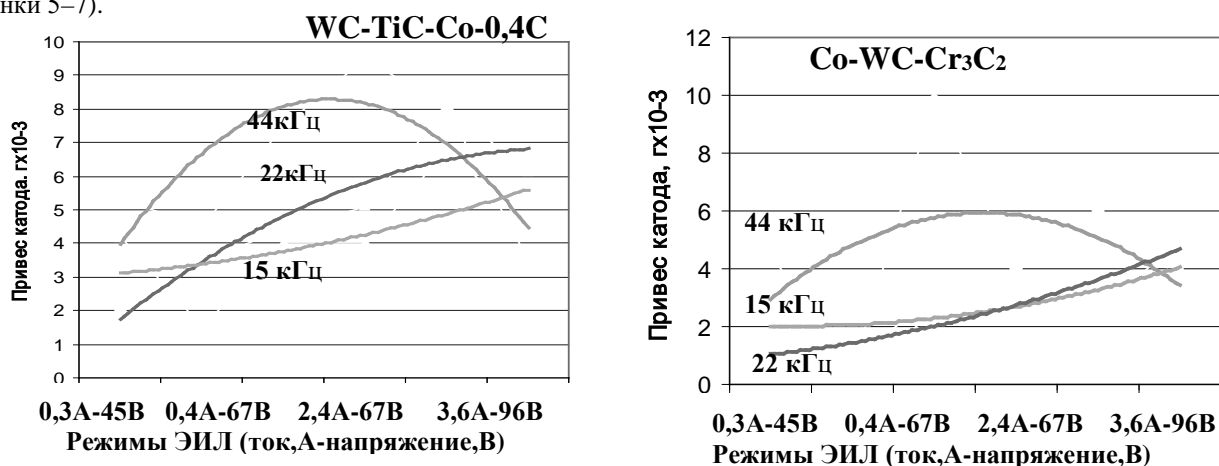


Рисунок 5 – Влияние состава легирующего твердосплавного анода и частоты УЗВ на величину привеса стальной основы

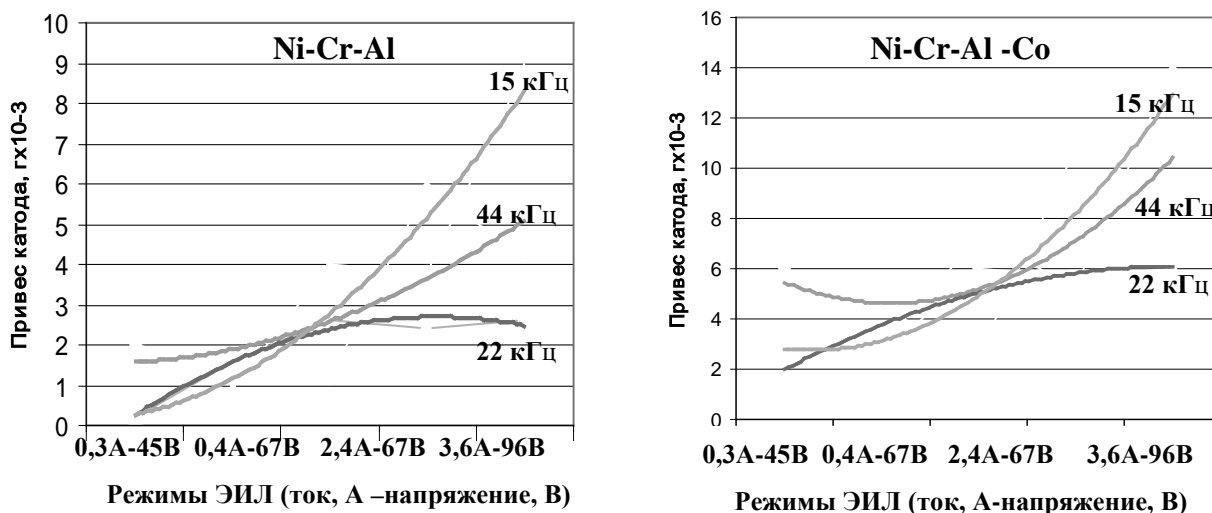


Рисунок 6 – Влияние состава интерметаллидного электрода и частоты УЗВ на величину привеса стального катода

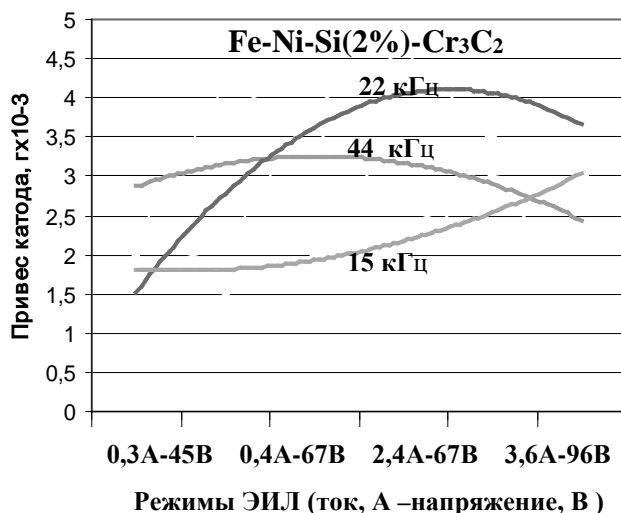


Рисунок 7 – Изменение величины привеса стального катода при его легировании железо-никелевым электродом под двойным ультразвуковым воздействием различной частоты

Анализ представленных графиков показал, что в зависимости от состава легирующего анода и метода его получения так же, как и при обработке с однократным УЗ воздействием, заметно изменяется величина привеса обрабатываемого катода. При этом, наиболее интенсивно эродируют сложнокомпонентные электродные материалы на основе интерметаллидных систем (рисунок 6). При этом характер изменения величины катода практически идентичен для обоих составов анодов. Сравнение графиков потери массы и привеса катода после двойной (ЭИЛ+УЗВ) и тройной (УЗВ+ЭИЛ+УЗВ) обработок (рисунки 2, 5–7) свидетельствует о том, что чем выше интенсивность ультразвукового воздействия (тройная обработка УЗВ+ЭИЛ+УЗВ), тем более интенсивно осуществляется массоперенос материала легирующего электрода независимо от его состава на обрабатываемую поверхность практически во всем диапазоне электрических параметров метода. Но состав анода также заметно влияет и на уровень величин токов и напряжений, позволяя выявлять их оптимальные значения. Установлено, что при легировании стальной подложки твердосплавными электродами с большим содержанием карбидных элементов (состав WC-TiC-Co-0,4C) массоперенос выше. Однако предварительное УЗ воздействие на металлическую основу в диапазоне малых режимов – при токе 0,4 А и напряжении 67 В и частоте УЗВ 15 и 22 кГц показало, что привес катода или, иными словами, толщина сформированного покрытия ниже, чем после двойной обработки. Это можно объяснить тем, что после двойного ультразвукового вмешательства в материал его пластические свойства возрастают и в результате такого происходит более интенсивное уплотнение полученного слоя. Более толстые слои, сформированные во всем диапазоне электрических режимов процесса, при ультразвуковом воздействии в 44 кГц можно объяснить более высокой степенью первоначального наклепа обрабатываемой поверхности, его более высокой активностью и, как следствие, образованием существенно

большей толщины создаваемого покрытия. При массопереносе материалов интерметаллидных электродов тенденция в привесе легируемого катода сохраняется. Однако, как было отмечено выше, легирование интерметаллидной системы кобальтом (система Ni-Cr-Al-Co) обеспечивает существенно более высокий привес. При этом влияние частоты ультразвука проявляется в заметном уменьшении толщины полученного покрытия после его обработки при 44 кГц, что можно объяснить присутствием в материале более мягкого, существенно легче уплотняемого компонента – кобальта. Наименее стабильный массоперенос происходит при использовании электродов системы Fe-Ni-Si-Cr3C2 с различным содержанием кремния. Независимо от интенсивности и частоты УЗВ, а также величин электрических параметров обработки массоперенос осуществляется беспорядочно, что, по-видимому, можно объяснить невысокими прочностными свойствами самого электрода, полученного методом порошковой металлургии и последующего спекания.

Заключение. В результате проведенного исследования установлено, что при решении задачи упрочнения рабочих поверхностей металлических объектов за счет формирования равнотолщинных функциональных покрытий работоспособной толщины интегральным методом ЭИЛ с УЗВ необходимо оптимизировать состав легирующих анодов, методы их получения и параметры электроискровой и ультразвуковой обработок. При этом следует учитывать, что различные аноды эродируют с разной скоростью капельным путем с различной величиной капель. Этими же факторами определяется величина капель и скорость их отрыва от поверхности анода и осаждения на обрабатываемую поверхность, что обуславливает толщину и качество формируемого покрытия, а значит, и эксплуатационные свойства изделий с ними. Проведение процесса упрочнения по схемам ЭИЛ с УЗВ и УЗВ+ЭИЛ+УЗВ с изменяющимися характеристиками тока, напряжения и частоты продемонстрировало единую тенденцию изменения и равномерность массопереноса, и, следовательно, прироста толщины покрытий для всех групп изучаемых анодов. Показано, что аноды практически всех составов эродируют более интенсивно с возрастанием частоты УЗВ. При этом получение более толстых слоев во всем диапазоне электрических режимов процесса ЭИЛ при ультразвуковом воздействии в 44 кГц можно объяснить более высокой степенью первоначального наклепа обрабатываемой поверхности, активацией поверхности после УЗ- воздействия и, как следствие, образованием существенно большей толщины создаваемого покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чигринова, Н.М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика / Н.М. Чигринова // Монография. – Минск, «Бестпринт» 2018. – 262 с.
2. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования. // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1983. №1. – С. 3–6.
3. Верхотуров А.Д. Эрозионная стойкость тугоплавких металлов. Электронное строение и физико-химические свойства тугоплавких металлов и соединений. К.: “Наукова думка”. 1980. – С. 37–43.
4. Ливурдов В.И., Снежков В.А., Поликарпова А.П. и др. Качество поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования с использованием генераторов независимых импульсов. // Электронная обработка материалов. 1984. №4. С. 18-20.
5. Чигринова, Н.М. Совершенствование микроплазмоискровых технологий для формирования высококачественных покрытий на поверхностях деталей ответственного назначения / Н.М. Чигринова, С.И. Ловыгин, В.Е. Чигринов // Науч.-техн. журнал «Порошковая металлургия» № 35. – Минск. – 2012. С. 205–211.
6. Чигринова, Н.М. Применение многокомпонентных электродных систем для формирования покрытий методом микроплазмоискрового легирования / Н.М. Чигринова, А.В. Паустовский, Р.А. Алфинцева, В. Е. Шелудько, А.Д. Костенко, А.Ю. Борехов // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 8 Междунар. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. – Минск, 2008. – С. 108–110.
7. Заплатин, В.Н. Основы материаловедения: Учебник / В.Н. Заплатин. – М.: Академия, 2019. – 272 с.