ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ – КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

HIGH-FREQUENCY ELECTROSPARK ALLOYING - AS A WAY TO IMPROVE THE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF METALS

Анатолий ПАРАМОНОВ, ORCID: 0009-0005-2513-7112
Владимир ПАРШУТИН, ORCID: 0009-0009-7883-4746
Александр КОВАЛЬ, ORCID: 0009-0007-9582-924x
Institutul de Fizica Aplicată, or. Chșinău, RM

CZU: 621.9.048.4

e-mail: paramonov41@mail.ru
e-mail: vlad.parshutin40@mail.ru
e-mail: sasha.covali@mail.ru

In work, the reasons, which affect quality characteristics of electrospark coatings, are considered. It is shown, that quality characteristics of the deposited layers depend on frequency, porosity and energy of impulses. For improvement of quality of coverings, it is necessary to provide smooth input of energy in a spark gap. It is shown that high-frequency alloying allows receiving coverings with the increased hardness, low roughness and high corrosion resistance in acids, especially in water and saline solution.

Ключевые слова: электроискровое легирование, коррозия, сталь, твердые сплавы.

ВВЕДЕНИЕ

Продолжительная и бесперебойная работа различных машин, станков и механизмов в настоящее время является актуальной задачей с точки зрения экологии и финансовой эффективности. Это можно обеспечить не только изготовлением деталей из материалов с высокими физико-химическими свойствами, но и различными методами модификации рабочих поверхностей.

Известны и альтернативные методы – нанесение защитных и упрочняющих покрытий на рабочие поверхности деталей аппаратов и машин. В результате этого, за счёт изменения физико-механических свойств рабочих поверхностей существенно меняются их характеристики: увеличиваются твёрдость и износостойкость, коррозионностойкость и т.п.

Актуальны и различные способы восстановления изношенных (в допустимых пределах) деталей, а затем и упрочнения восстановленного слоя. Это позволяет существенно экономить финансовые средства, за счёт существенной разницы в цене между новой деталью и восстановленной.

Для восстановления рабочих размеров изношенных деталей используются различные методы: электрохимические, электрофизические, механические и т. д.

Наибольший интерес представляют методы, которые позволяют наносить износостойкие покрытия большой толщины [1-3].

Наиболее известная группа из электрофизических методов обработки – электроэрозионная обработка. В неё входят: электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная и анодно-механическая обработки. Электроискровая разделилась на два вида: электроэрозионная размерная обработка и электроискровое легирование (ЭИЛ). В настоящее время именно ЭИЛ является наиболее перспективным методом для упрочнения и восстановления различных металлических поверхностей. В результате обработки наносимое покрытие значительно изменяет свойства обработанной поверхности. Но процесс можно вести так, что при отсутствии изменения размеров детали, свойства поверхности изменяются благодаря её диффузионному обогащению элементами, входящими в состав электрода.

И если физико-механическим свойствам покрытий исследователи уделяют значительное влияние, то коррозионные очень мало изучены. А они очень важны – ведь в основном обрабатывают детали из различных видов стали. Окружающая среда, материал электродов, многократное термоциклическое воздействие происходящие в зоне действия разряда могут значительно изменять коррозионные свойства как в сторону улучшения, так и в сторону ухудшения.

Цель работы – исследование влияния процесса высокочастотного ЭИЛ на физико-химические (в первую очередь коррозионные свойства) обработанных металлических поверхностей.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было сказано выше пристального внимания коррозии не уделялось, хотя даже в немногочисленных работах [4-9] было показано, что ЭИЛ повышает коррозионную стойкость обработанных деталей.

В последнее время это упущение стремительно наверстывается, особенно за рубежом [10-15]. Например, различные стальные изделия работают не только при высоких нагрузках, но и в агрессивных средах (кислоты, щелочи, морская вода и т. д.). Поэтому необходимо обеспечить не только высокую износостойкость, но и коррозионностойкость рабочих поверхностей. Так, высокотемпературная подшипниковая сталь М50 используется для изготовления высокотемпературных подшипников, которые широко используются в морской промышленности. При высокой твердости М50 неустойчива к коррозии. Повысить её устойчивость удалось при ЭИЛ хромом [10]. Различные углеродистые стали востребованы с автомобильной промышленности – и проблема опять в низкой коррозионной стойкости. К тому же механическая и тепловая обработки (сварка) могут еще больше снизить коррозионную стойкость. ЭИЛ электродами из WC/TiC/Co/Ni позволило значительно уменьшить токи коррозии [11]. При этом было замечено, что увеличение энергии импульсов не всегда приводит к увеличению массопе-

реноса (значительные объемы материала электрода разбрызгивается) и при этом значительно увеличивается коррозионный процесс. Наиболее широко для восстановления и упрочнения используются твердосплавные электроды из карбида титана и карбида вольфрама, как по отдельности, так и вместе (с кобальтовой связкой) в различных пропорциях [12]. Значительное уменьшение коррозии (при увеличении износостойкости) наблюдается при обработке молибденовыми электродами [15].

Тем не менее не все исследователи стараются найти зависимость коррозионных свойств обработанных поверхностей от параметров процесса ЭИЛ, среди которых: частота и энергия импульсов, напряжение, применяемый электродинструмент, окружающая среда и материал электродов.

Есть отличие в самом ЭИЛ - за рубежом предпочитают легирование вращающимся электродом, в то время как в СССР и странах соц. лагеря в основном использовали ручные вибраторы или многоэлектродные вращающиеся головки при механизированном легировании. Зачастую ЭИЛ ведут в среде инертных газов (аргон), считая, что они помогают защитить от взаимодействия с атмосферным кислородом и охлаждать электрод от чрезмерного перегрева. Но результаты неоднозначны. Есть работы, указывающие на отсутствие явного положительного эффекта от применения аргона [16, 17]. Существенное влияние оказывает и вращающийся электрод. При его применении необходимы сложные системы для поддержания нужного межэлектродного зазора, только круглые электроды, невозможность смены позиции электрода относительно детали в пространстве в процессе легирования. Несмотря на недостатки применяют его в основном потому, что он обеспечивает значительно меньшую шероховатость и большую равномерность, по сравнению с известными классическими ручными вибраторами.

Как было сказано выше, стремление увеличить толщину получаемого слоя за счет увеличения энергии в импульсе снижает коррозионные свойства покрытия [11]. В работах [18, 19] также замечено, что стремление получить толстые слои работая с большими энергиями ведет к перегреву подлодки и снижает положительные стороны ЭИЛ. Да, увеличением энергии и частоты импульсов заметен рост толщины покрытия, но после 3 мин обработки она начинает уменьшаться [18]. Существенное влияние на формирование покрытия оказывают частота, скважность и форма импульсов. Наблюдается накопление энергии при повышении частоты импульсов – частота импульсов (или их группирование) и пауза между ними задают накопление тепла (рис. 1). Но слишком большие энергии приводят не только к большему массопереносу, а также к пористости и трещинам. Поэтому следует уменьшать энергию при увеличении частоты импульсов. В ходе исследований отмечается, что при применении вибрационной системы для точного расчета энергии идущей на ЭИЛ необходимо чтобы частота импульсов совпадала с частотой вибрации электрода.

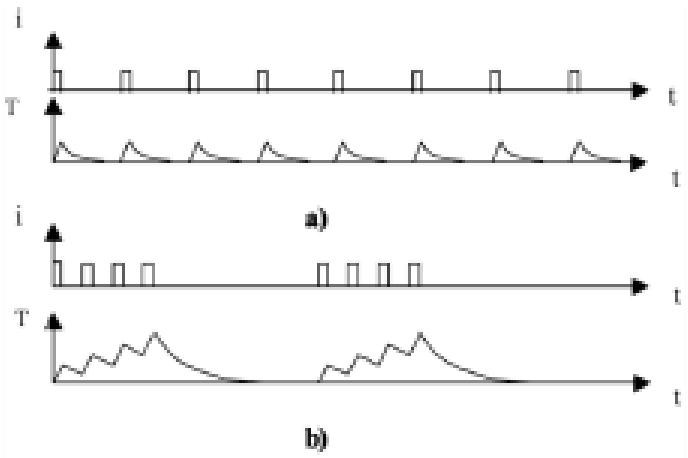


Рис. 1. Влияние имульсов на накопление тепла на детали: а – единичные, б – группами [19].

Но еще с 80-х годов был запатентован ручной высокочастотный вибратор, позволяющий работать на частоте до 2000 Гц (у обычного 100 Гц, иногда до 400 Гц) [20]. Было также показано, что существует возможность и безвибрационного легирования – вибрация возникает при движении электрода по детали за счет микронеровностей на их поверхностях [21, 22]. Работа на высоких частотах существенно улучшает качественные характеристики получаемых покрытий [21], благодаря эффекту накопления тепла в зоне обработки (рис. 2). Использование значительно меньших рабочих емкостей по сравнению с обычным ЭИЛ (8-50 мкФ вместо 200-1000 мкФ) позволяет делает процесс аккумулирования тепла более плавным, что резко снижает пористость и трещинообразование. Необходимо отметить – есть информация об установках, работающих на частотах до 20000 Гц, но на самом деле это частота следования искровых импульсов. При этом сам вибратор работает с частотой до 400-500 Гц. Как было показано в работах [23-25] при отсутствии синхронизации подачи искровых импульсов с положением электрода в пространстве, в реальности из 20000 Гц рабочими будут 500-1500 Гц.

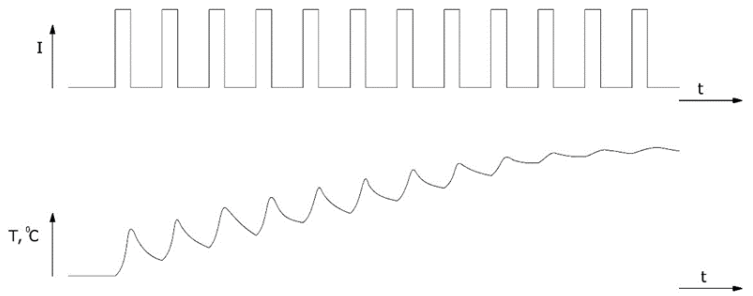


Рис. 2. Накопление тепла в зоне обработки при высокочастотном легировании.

Исследования показали улучшение качественных характеристик (привес, сплошность, шероховатость) при использовании ВЧ вибратора, но отсутствовали данные по коррозии, которым мы теперь и уделяем внимание.

В ходе исследований [26] были выявлены особенности электрохимического и коррозионного поведения легированных поверхностей в кислых, нейтральных и щелочных средах. В качестве подложки использовались образцы из стали Ст. 3. На неё наносили различные покрытия: титан, никель, титан-никель, сплав ТНМ-20. Кроме того, изучались покрытия титана на никеле, никеля на титане и титана на титане, а также поведение чистых металлов. Обработку проводили на установках для электроискрового легирования: универсальной – ПЭЛ-28 и высокочастотной ПЭЛ-2000. Покрытия наносили в один слой толщиной порядка 100 мкм на трех режимах: I – энергия в импульсе 0,028 Дж при частоте 200 Гц; II – энергия в импульсе 0,8-1,2 Дж при частоте 50 Гц; III – энергия в импульсе 0,028 Дж при частоте 1500 Гц. Удельное время легирования составляло для высокочастотного режима 1-1,5 мин/см^2, а для остальных режимов – 2-3 мин/см^2. Качество покрытий при НЧ (левая сторона) и ВЧ легировании (правая сторона) показано на рис. 1.

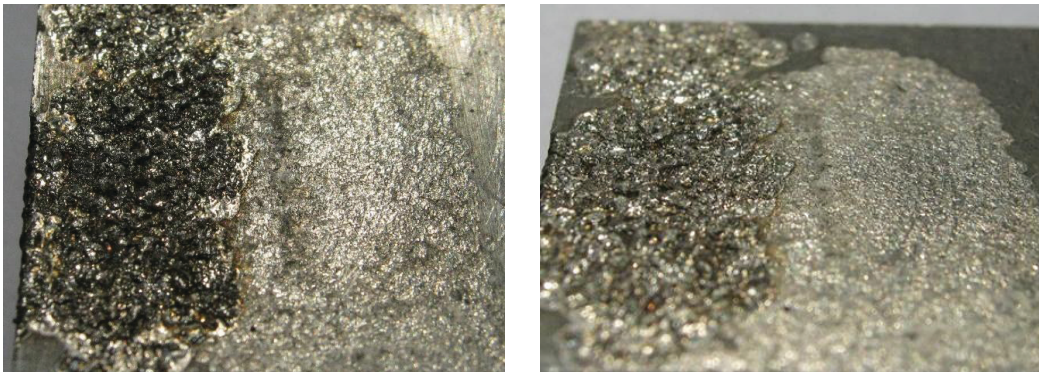


Рис. 1. Покрытие ВК8 на стали Ст.45 при низкочастотном (на рисунке слева) и высокочастотном (на рисунке справа) легировании.

Установлено, что электрохимическое поведение и коррозионная стойкость обусловлены фазовым составом, шероховатостью и пористостью покрытия, а также режимами нанесения. Как видно из табл. 1 при ВЧ легировании значительно снижается скорость коррозии, особенно в воде и 20%NaCl [26]. При этом длительности испытаний в кислотах составляли 15-60 мин., в воде, соли и щелочи – до 15 суток.

Таблица 1.

Влияние состава среды на скорость коррозии металлов и покрытий (г/м²·ч) при комнатной температуре

Металл	H_2SO_4 (48%)	Концентрированная кислота			3об. HCl + 1 об. HNO_3	Вода	20% NaCl	20% NaOH	Модельн. среда 7 г/л NaCl + 7 г/л Na_2SO_4
		H_3PO_4 (85%)	HCl (38%)	HNO_3 (68%)					
Ni	0	0	9,45	424,5	100,5	$1,2\cdot10^{-3}$	$5,9\cdot10^{-3}$	$1,2\cdot10^{-3}$	$3,7\cdot10^{-3}$
Ti	23,6	8,2	16,1	0,2	0,61	$0,15\cdot10^{-3}$	$1,5\cdot10^{-3}$	$4,2\cdot10^{-3}$	$1,1\cdot10^{-3}$
Ст. 3	36,6	1,05	150,5	62,8	139,8	$168\cdot10^{-3}$	$756\cdot10^{-3}$	$5,6\cdot10^{-3}$	$610\cdot10^{-3}$
Ст. 3-Ti (НЧ+ВЧ)	30,1	3,2	40,3	14,4	74,3	$2,45\cdot10^{-3}$	$4,7\cdot10^{-3}$	$3,4\cdot10^{-3}$	$4,1\cdot10^{-3}$
Ст. 3-Ni (ВЧ)	5,5	0,9	47,2	120,7	113,4	$4,4\cdot10^{-3}$	$12,8\cdot10^{-3}$	$3,1\cdot10^{-3}$	$9,2\cdot10^{-3}$
Ст. 3-Ti-Ni (НЧ)	16,7	3,3	48,5	66,4	87,6	$0,8\cdot10^{-3}$	$6,4\cdot10^{-3}$	$4,7\cdot10^{-3}$	$5,1\cdot10^{-3}$

Повышение частоты легирования позволило снизить шероховатость получаемых покрытий и повысить сплошность. Но в кислотах значительное повышение коррозионной стойкости не всегда бывает достижимо из-за включения материала подложки в покрытие.

В связи с этим дальнейшие исследования были направлены на определение фазового и элементного состава покрытий, полученных при легировании титаном никеля и титана, никеля – титаном, стали – сплавами ТНМ-20 и ВК8. Исследовалось и коррозионное поведение покрытий ВК8, ТНМ-20 и Ti-Ni на стали при высокочастотном ЭИЛ [27]. В ходе этого было выявлено, что легирующий материал оказывает существенное влияние на состав покрытия. Так при легировании стали на ВЧ режиме титаном или ВК8 на поверхности полученного покрытия превалирует материал подложки (70-80%), а легировании никелем только до 35%. Обработка стали ТНМ-20, ВК8 и титаном с никелем позволяет уменьшить токи коррозии в 2-4,5 раза, но наиболее предпочтительными с точки зрения снижения коррозионных потерь оказались сплавы ВК-8 и ТНМ-20. Этот результат достигается благодаря не только нанесению коррозионностойких материалов, но и полу-

чению коррозионностойких соединений железа, за счет изменения энергетических параметров искрового промежутка.

Результаты исследований высокочастотного легирования были успешно применены на практике для восстановления и упрочнения различного режущего инструмента (рис. 3).



Рис. 3. Результаты нанесения покрытий Т15К6 и ВК8 на различные детали.

По результатам практических работ были получены патенты [28, 29], в которых отражено, что высокочастотное электроискровое легирование является современным и перспективным способом повышения физико-химических свойств металлических поверхностей.

ВЫВОДЫ

1. В ходе работ выявлено, что качественные характеристики наносимых слоев зависят от частоты, скважность и энергии импульсов.

2. Высокочастотное легирование позволяет обеспечить плавное аккумулирование тепловой энергии импульсов, и тем самым уменьшить пористость и трещинообразование покрытий.

3. Покрытия, нанесенные твердосплавными электродами при высокочастотным ЭИЛ обладают не только повышенной твердостью, низкой шероховатостью, но и высокой коррозионной стойкостью, особенно в воде и солевом растворе.

Литература:

1. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985.
2. Леонтьев П. А., Хан М. Г., Чеканов Н. Т. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1986.
3. Сборник «Диффузионное насыщение и покрытия на металлах». Киев: Наукова думка, 1977.
4. Лазаренко Н. И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде. Электроискровая обработка металлов. 1957. Вып. 1, с. 70-94.
5. Лазаренко Н. И., Лазаренко Б. Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Электронная обработка материалов, 1977, № 3, с. 12-16.
6. Решетников С. М., Вдовин С. Ф. Применение метода электроискровой металлизации для повышения коррозионной стойкости нелегированной стали. Электронная обработка материалов, 1977, № 3, с. 33-37.
7. Чернова Г. П., Томашов Н.Д., Федосеева Т. А. и др. Повышение коррозионной стойкости сплавов нанесением на них покрытий методом электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1977, № 4, с. 42-46.
8. Касаткин Э. В. и др. Возможность применения электроискрового легирования для создания стойких и эффективных электродов в электрохимических процессах. Электронная обработка материалов, 1978, № 6, с. 28-33.
9. Вдовин С. Ф. и др. Защита от атмосферной коррозии методом электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1988, № 6, с. 15-17.
10. Cao, G., Zhang, X., Tang, G., et al. Microstructure and corrosion behavior of Cr coating on M50 steel fabricated by electrospark deposition. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019. V. 28, № 7, p. 4086-4094.

11. Aghajani, H., Hadavand, E., Peighambardoust, N., et al. Electro spark deposition of WC-TiC-Co-Ni cermet coatings on St52 steel. Surfaces and Interfaces. 2020. V. 18. № 3, 100392.
12. Jiao, Z., Peterkin, S., Felix, L., et al. Surface modification of 304 stainless steel by electro-spark deposition. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018. V. 27, № 9, p. 4799-4809.
13. Korkmaz, K., Investigation and characterization of electrospark deposited chromium carbide-based coating on the steel. Surf. Coat. Technol., 2015. Vol. 272, p. 1–7.
14. Lin, N. M., Li, M. L., Zou, J. J., et al. Study on fabrication and corrosion resistance of Ni-based alloy coating on P110 steel by electro spark deposition, J. Mater. Eng. Perform., 2013. V. 22, № 5, p. 1365–1370.
15. Wang, W., Du, M., Zhang, X., et al. Preparation and properties of Mo coating on H13 steel by electro spark deposition process. Materials 2021. V. 14, 3700. 15 p. https://doi.org/10.3390/ma14133700.
16. Johnson R. N., Sheldon G. L. Advances in the electrospark deposition coating process. Journal of Vacuum Science and Technology A. 1986. № 6, p. 2740-2746.
17. Joyce A. M. Analysis of metallurgically bonded electrospark deposited coatings. Master's diss., University of New Orleans, New Orleans, USA, 2019. 82p.
18. Wang, P., Pan, G., Zhou, Y., Qu, J. and Shao, H. Accelerated Electrospark Deposition and the wear behavior of coatings. Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, vol. 6, no. 6, pp. 780-784.
19. Peterkin, S. Electro-spark deposition machine design, physical controls and parameter effects. Master's diss., University of Waterloo, Ontario, Canada, 2016. 130 p.
20. Фурсов, С.П., Парамонов, А.М., Добында, И.В., Семенчук, А.В. Источники питания для электроискрового легирования. Кишинёв, 1983. 144 с.
21. Ливурдов, В. И. и др. Качество поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования с использование генератора независимых импульсов. Электронная обработка материалов, 1984, № 4, с. 18-20.
22. Парамонов, А. М. и др. Исследование перспективы использования безвибрационного электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1997, № 5-6, с. 28-32.
23. Парамонов, А.М., Коваль, А.В. Разработка источников питания для электроискрового легирования с ручным вибрирующим электродом, ЭОМ. 2020, № 1, с. 67-75.
24. Парамонов, А. М., Пасинковский, Е. А., Коваль, А. В. К вопросу расширения частотного диапазона электроискрового легирования. ЭОМ, 2006, № 1, с. 22 – 27.
25. Парамонов, А. М., Пасинковский, Е. А., Коваль, А. В. Временные параме-

тры вибрирующего электрода в условиях электроискрового легирования. ЭОМ, 2006, № 2, с. 9-12.

26. Koval, A. V. Study of corrosion behavior of coatings produced on steel with electrospark alloying using a hand high-frequency vibrator. SEAE 2022, vol. 58, № 2, p. 176-183.
27. Koval, A. V. Peculiarities of formation of phase and elemental composition during electrospark alloying using a manual high-frequency vibrator. SEAE 2023, vol. 59, № 3, p. 271-280.
28. INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ AL ACADEMIEI DE ŞTIINŢE A MOLDOVEI. Procedeu de sporire a rezistenţei la coroziune a oţelurilor. Brevet №. 561. Inventatori: Parşutin, Vl., Paramonov, A., Pasincovschii, E., Covali, A., Cernîşeva, N., Şoltoian, N. Publ. 30.11.2012, BOPI nr. 11/12.
29. INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ AL ACADEMIEI DE ŞTIINŢE A MOLDOVEI. Procedeu de obținere a acoperirii multistrat prin metoda alierii cu scântei electrice. Brevet №. 685. Inventatori: Parşutin, Vl., Paramonov, A., Covali, A., Agafii, V., Cernîşeva, N. Publ. 31.10.2013, BOPI nr. 10/13.