

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ

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

<sup>1</sup>ОХП «Институт сварки и защитных покрытий», ул. Платонова, 12б, 220005, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 08.08.2018 г.

*В статье приведены результаты исследований влияния ультразвукового воздействия частотой 22 кГц в процессе электроискрового легирования на микротвердость и напряженное состояние электроискровых покрытий. Показано, что предварительная активация обрабатываемой поверхности и финишная обработка сформированного электроискрового покрытия ультразвуковым воздействием позволяет получать покрытия с уменьшенными показателями внутренних напряжений и увеличенными показателями микротвердости.*

**Введение.** Нанесение покрытий и модифицирование поверхностного слоя – наиболее рациональный путь, позволяющий направленно изменять напряженно-деформированное состояние материала в приповерхностном слое, деформационно-силовые параметры контактных областей и природу контактного взаимодействия тел [1].

Одним из перспективных методов целенаправленного воздействия на качество поверхностного слоя является способ электроискрового легирования (ЭИЛ). Привлекательность этого метода обусловлена его универсальностью, т. е. возможностью обрабатывать материалы практически любой формы с любыми физико-механическими свойствами. Необходимо лишь, чтобы они обладали электрической проводимостью. Тепловые процессы локализуются в тонком поверхностном слое. За счет этого появляется возможность исключить нежелательные структурные превращения в основном металле, что позволяет уже десятки лет успешно использовать данный метод для получения на металлических поверхностях покрытий различного функционального назначения.

Закономерности упрочнения поверхностного слоя при ЭИЛ электродными материалами из твердых сплавов зависят от их состава, исходной структуры и изменения параметров установок для ЭИЛ [2]. При ЭИЛ на сталях формируется упрочненный слой, имеющий структуру

твердых растворов и легирующих элементов в железе с выделением дисперсных частиц фаз легирующих элементов. При этом сохраняются мелкое зерно и достаточно высокая плотность дислокаций [3, 4].

Исследование микротвердости покрытия показывает, что наибольшие значения твердости поверхностного слоя наблюдаются на глубине 20–30 мкм. Столь незначительная глубина увеличения микротвердости и существенное ее изменение могут быть объяснены лишь следующим образом: высокая плотность мощности искрового разряда и малая продолжительность периода его активного взаимодействия с материалом не позволяют эрозионному массовому потоку проникать вглубь материала, формируя при этом в приповерхностной зоне модифицированный упрочненный слой.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что полученный электроискровым легированием первый слой покрытия структурно неоднороден. В нем можно выделить три основные зоны:

первая – это термодиффузионная зона покрытия и основного металла;

вторая – нетравящийся (белый) слой, представляет собой твердый раствор легирующих или карбидообразующих элементов, входящих в состав электродного материала;

третья – зона, сформированная из фрагментов застывшего металла и оксидов.

Структура упрочненного наружного слоя напоминает строение антифрикционного сплава – частицы мелкодисперсных карбидов включены в сравнительно мягкую основу. Перенесенный материал анода легирует материал детали и, соединяясь с диссоциированным атомарным азотом воздуха и углеродом материала детали, образует диффузионный износостойкий слой. Глубина термического влияния на материал детали составляет 0,8–1,0 мм [5].

В процессе ЭИЛ осуществляются перенос материала анода, растворение его в основном материале и прочное сцепление поверхностного слоя с основой за счет их интенсивного смешивания в расплавленном состоянии в микрованне. Происходят изменение структуры, образование карбидов и карбонитридов, упрочнение поверхностного слоя, препятствующее перемещению дислокаций на поверхность, а также измельчение структурных составляющих, образование структур высокой гетерогенности.

При ЭИЛ происходит повышение твердости, прочности, износостойкости поверхностного слоя покрытия упрочняемого изделия. Наличие слоя повышенной пластичности под слоем с высокой твердостью обеспечивает упругость последнего.

Основной механизм упрочнения металлов связан с созданием препятствий или барьеров на пути движения дислокаций [6]. Такими барьерами могут быть границы зерен и субзерен, дислокации, микронапряжения, дисперсные фазы.

*Цель работы* – исследовать влияние ультразвукового воздействия на микротвердость и напряженное состояние формируемых композиционных электроискровых покрытий.

**Материалы и методы исследований.** В качестве легирующих анодов в исследованиях использовались электроды из титановольфрамокобальтового сплава Т15К6. В качестве катодов применялась железоуглеродистая сталь марки 45.

Размеры образца (катод) – 30 × 30 × 4 мм.

Электроискровую обработку образцов в операциях нанесения покрытия проводили с использованием серийно производимой установки «Alier-55», с частотой вибровозбудителя 600 Гц. В операциях ультразвукового воздействия на формируемое покрытие применялся ультразвуковой преобразователь макетного образца УЗ-устрой-

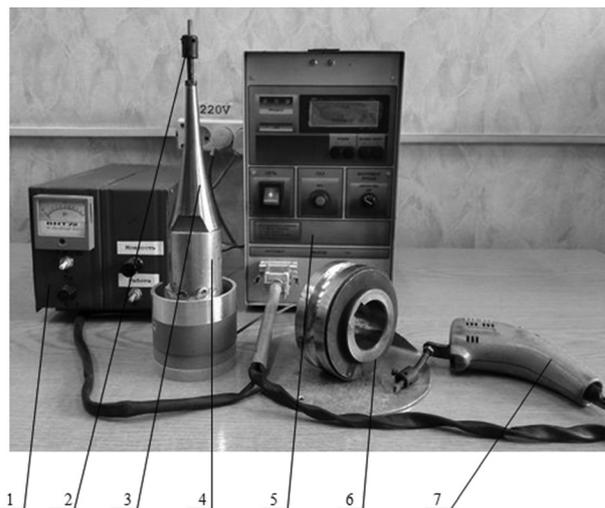


Рис. 1. Ультразвуковое устройство: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – наконечник с электродом; 3 – концентратор; 4 – вибратор с пьезопластинами (частота 20,4–23,6 кГц); 5 – установка «Alier-55»; 6 – обрабатываемая деталь; 7 – вибратор установки «Alier-55» (частота 600 Гц)

ства, разработанного в секторе электрофизических покрытий ОХП ИСЗП, состоящего из генератора, блока питания и ультразвукового пьезопреобразователя. Частота вибрации электрода УЗ-преобразователя составляла 20,4–23,6 кГц (рис. 1).

Для определения микротвердости поверхности образцов с электроискровыми покрытиями использовался компьютеризированный микротвердомер MICROSCAN.

Исследование фазового состава, определение параметров кристаллической решетки и внутренних напряжений проводились на рентгеновском дифрактометре «Ultima IV» фирмы Rigaky в  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучении. Изучения проводились в Отделении исследований и испытания материалов ГНУ «Институт порошковой металлургии».

**Результаты и их обсуждение.** Нанесение покрытия производилось на два образца. Покрытие на первом образце формировалось без применения УЗВ на установке «Alier-55». Нанесение покрытий осуществлялось на электрическом режиме № 6 с энергией импульсов 4,3 Дж и частотой их следования 100 Гц, а оплавление на режиме № 7 – 10 Дж и 50 Гц соответственно. Была достигнута толщина покрытия 5,4 мм. При нанесении покрытия на второй образец с применением УЗВ толщина покрытия составляла 1,05 мм.

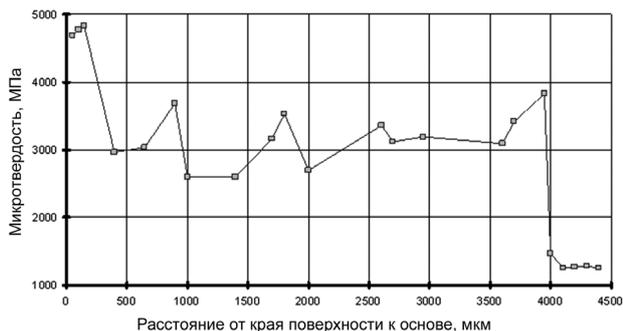


Рис. 2. Значения микротвердости ЭИЛ-покрытия (образец № 1)

График значений микротвердости (образец № 1) представлен на рис. 2.

Как видно из графика, значения микротвердости покрытия из титановольфрамокобальтового сплава Т15К6 наиболее велики у подложки из стали 45. Уменьшение микротвердости с ростом толщины покрытия связано, на наш взгляд, с применением операций «оплавления» слоев покрытия, стимулирующих рост толщины покрытия, но способствующих, в свою очередь, явлениям местного отпуска, снижающего значения микротвердости формируемого покрытия. Некоторый разброс значений микротвердости связан со «слоистостью» покрытия увеличенной толщины.

График значений микротвердости (образец № 2) с применением УЗВ представлен на рис. 3.

Как показано на графике, значения микротвердости покрытия из титановольфрамокобальтового сплава Т15К6 на образце № 2 с использованием УЗВ в операциях оплавления основного покрытия уменьшаются постепенно и монотонно. Это свидетельствует о том, что формируемое покрытие плотное, без заметной «слоистости». Значение микротвердости на расстоянии 500 мкм от основы у образца № 1 составляет 3000 МПа, у образца № 2 – 4100 МПа соответственно, что на 36 % больше.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о значительном увеличении показателей микротвердости электроискровых покрытий при применении УЗВ.

К недостаткам электроискрового легирования относится образование трещин, сколов за счет образования *растягивающих* напряжений, образующихся в процессе формирования легированного слоя. Более того, в процессе ЭИЛ с определенного удельного времени легирования

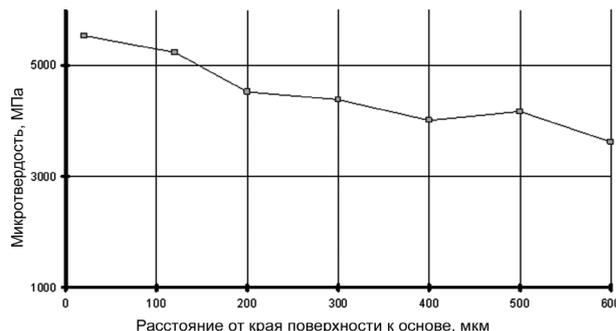


Рис. 3. Значения микротвердости ЭИЛ-покрытия (образец № 2)

наблюдается, как правило, разрушение поверхностного слоя (уменьшение массы катода), что предъявляет жесткие требования к выбору режимов обработки.

Были проведены исследования напряженного состояния электроискровых покрытий, сформированных с применением ультразвукового воздействия.

В качестве материала основы выступали образцы из стали 45, в качестве материала покрытия – электроды из титановольфрамокобальтового сплава Т15К6.

При воздействии комбинации силовых и температурных нагрузок максимальные растягивающие напряжения в каждом слое покрытия возникают в основном со стороны поверхности материала. С увеличением силовых нагрузок уровень рабочих напряжений у поверхности материала с покрытием смещается в область растягивающих напряжений, а с увеличением температуры – к области сжимающих напряжений. В объеме подложки, прилегающей к покрытию, возникает высокий уровень напряжений, что может сказаться негативно на работоспособности материала основы при высоких уровнях нагружения. Исследование прочности показало, что практически все материалы при высоких значениях нагрузки и температуры практически разрушаются. Это связано с тем, что у материалов основы прочность на растяжение в несколько раз меньше прочности на растяжение твердых сплавов. Поэтому уже при достижении 30 % от максимальной сдвиговой нагрузки или температуры 100 °С покрытие будет разрушаться первым. А затем, в зависимости от адгезионной прочности соединения с основой, разрушение может перейти либо в основу, либо по границе раздела [7].

При комбинированном действии плазменной и ультразвуковой энергии в материале металлической основы вследствие структурных (фазовых) превращений (бейнит, отпускаемый мартенсит), спровоцированных выделением избыточных фаз, имеющих кристаллическую решетку, отличную от решетки необработанного материала, возникают напряжения 2-го рода. Экспериментальные результаты показывают, что повторяющаяся под разными направлениями пластическая деформация при ультразвуковом воздействии может создать условия для локальной пластической деформации. При этом измельчение зерна продолжается постоянно вплоть до достижения наноразмерного режима. Образующиеся скопления дислокаций на границах зерен являются зоной переходного поверхностного слоя, создающего сжимающие напряжения в кристаллической решетке и обуславливающего на начальных этапах сопротивление пластическому течению (состояние наклепа материала по достижении критической плотности дислокаций). Снижение же прочности, как правило, наблюдается только под действием жестких напряженных состояний, в которых преобладают растягивающие напряжения.

В процессе выполнения работ были проведены исследования влияния УЗВ на внутренние напряжения в электроискровом покрытии при различных схемах применения путем определения микроискажений кристаллической решетки образцов.

Для этого были изготовлены четыре образца из стали 45 – контрольный образец без обработки; образец, обработанный УЗВ с частотой 20,4–23,6 кГц; образец после электроискрового легирования без использования УЗВ; образец после электроискрового легирования с использованием УЗВ с частотой 20,4–23,6 кГц.

Данные рентгенофазового анализа образцов из стали 45 приведены в таблице.

Таким образом, при обработке поверхности образца из стали 45 ультразвуковым воздействием частотой 20,4–23,6 кГц без массопереноса материала анода на катод получен эффект уменьшения значений микроискажений кристаллической решетки на 39,1 %.

**Параметры кристаллической решетки и микроискажения кристаллической решетки в контрольном образце из стали 45 в исходном состоянии**

Состав	Параметры кристаллической решетки			Микроискажения кристаллической решетки, %
	a, (А)	b, (А)	c, (А)	
Контрольный образец без обработки				
Fe	2,877	2,877	2,877	0,274
Образец, обработанный УЗВ с частотой 20,4–23,6 кГц				
Fe	2,876	2,876	2,876	0,167
Образец после электроискрового легирования без использования УЗВ				
Fe	2,903	2,903	2,903	0,46
Ti	2,846	2,846	4,416	1,05
Co <sub>3</sub> W	4,989	4,989	4,230	6,0
Образец после электроискрового легирования с использованием УЗВ с частотой 20,4–23,6 кГц				
Fe	2,901	2,901	2,901	0,41
Ti	2,857	2,857	4,27	2,72
Co <sub>3</sub> W	5,19	5,19	4,09	0,73

При обработке поверхности образца из стали 45 после электроискровой обработки электродом из титановольфрамокобальтового сплава Т15К6 ультразвуковым воздействием частотой 22 кГц получен эффект уменьшения значений микроискажений кристаллической решетки на 48,6 %.

**Заключение.** Показано, что значения микротвердости электроискровых покрытий, сформированных с использованием УЗВ на расстоянии 500 мкм от основы, на 36 % выше, чем у покрытий, сформированных без использования УЗВ.

В результате исследований определено, что более низкий уровень микроискажений в кристаллической решетке материала катода (от 39,1 до 48,6 %) после его обработки с применением ультразвукового воздействия свидетельствует об уменьшении уровня внутренних напряжений в металле основы и покрытия, о его более стабильном состоянии, что способствует более активному росту массы и толщины покрытия.

## Литература

1. Колесников, В. И. Двухслойные композиции триботехнического назначения для тяжело нагруженных узлов трения / В. И. Колесников, П. Г. Иваночкин // Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т путей сообщ., 2009. – 124 с.
2. Лазаренко, Б. Р. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 117 с.

3. **Исследование** наноструктурных покрытий, синтезируемых методом электроискровой обработки / Ю. К. Машков [и др.] // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – № 10. – С. 75–79.
4. **Коротаев, Д. Н.** Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования / Д. Н. Коротаев, Е. В. Иванова // Перспективные материалы. – 2011. – № 2. – С. 98–102.
5. **Блажеев, В. В.** Исследование механических свойств покрытия, наносимого методом электроискрового легирования / В. В. Блажеев, П. Г. Иваночкин, А. С. Личковаха // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14, № 3 (78). – С. 111–117.
6. **Петрова, Л. Г.** Разработка технологий поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента на основе научно-методологического комплекса инженерии поверхности металлических материалов / Л. Г. Петрова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 12. – С. 28–39.
7. **Власенко, В. Д.** Численное исследование упругих и прочностных характеристик материалов с покрытиями, полученных электроискровым легированием / В. Д. Власенко, А. Д. Верхотуров // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – № 5. – С. 671–678.

#### RESEARCH OF INFLUENCE OF ULTRASONIC INFLUENCE ON MICROHARDNESS AND A STRESSED STATE OF ELECTROSPARK COATINGS

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

<sup>1</sup>SSE «Institute of Welding and Protective Coatings», Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

In the article results of researches of influence of ultrasonic influence by frequency 22 kHz in the process of electrospark doping on microhardness and a stressed state of electrospark coatings are given. It is shown that preliminary activation of the treated surface and finishing of the formed electric spark coating with ultrasonic action allows obtaining coatings with reduced internal stresses and increased microhardness indices.