МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATALLURGY AND MATERIALS

Верхотуров А. Д., Востриков Я. А., Рыбалкин А. А., Гнатик А. О.
A. D. Verkhoturov, Ya. A. Vostrikov, A. A. Rybalkin, A. O. Gnatik

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО СЛОЯ
ПРИ УПРОЧНЕНИИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ
КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ**

**INCREASING THE EFFICIENCY OF THE ALLOYED LAYER FORMATION WHEN
HARDENING TUNGSTEN CARBIDE WITH COMBINED METHODS**

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturov – Doctor of engineering, professor, senior research Fellow, institute of water and environmental problems, the far eastern branch of the Russian academy of sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Востриков Ярослав Алексеевич – инженер Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия Хабаровск). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

Mr. Yaroslav A. Vostrikov – engineer, Far Eastern state transport university (Russia, Khabarovsk). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

Рыбалкин Антон Андреевич – аспирант кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mmc727@rambler.ru.

Mr. Anton A. Rybalkin – post-graduate student, Mechanical engineering and metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mmc727@rambler.ru.

Гнатик Алина Олеговна – студент факультета экологии и химических технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Gnatik Alina Olegovna – student, Faculty of Ecology and Chemical Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе проведены исследования повышения работоспособности вольфрамсодержащих твердых сплавов за счет комбинации методов электроискрового легирования, электродуговой наплавки и лазерной обработки. Показано формирование легированного слоя толщиной более 1400 мкм с градиентным переходом свойств. Приведены параметры формирования островкового покрытия для повышения износостойкости методом лазерной обработки.

Summary. This article describes the research aimed at improving the tungsten carbide durability with the help of spark alloying methods, arc welding and laser processing. The paper presents the formation of the alloyed layer thickness of more than 1400 μm with gradient transition properties. The parameters of the islet coating formation for durability improvement by laser processing are represented.

Ключевые слова: электроискровое легирование, поверхностный слой, твёрдый сплав, износостойкость, микротвердость, электродуговая наплавка, лазерное оплавление, комбинированные методы.

Key words: electric spark alloying, the surface layer, hard alloy, wear resistance, micro hardness, arc welding, laser melting, combined methods.

УДК 621.793

Введение

В настоящее время в технике находят все большее применение тугоплавкие соединения и, в частности, вольфрамсодержащие твердые сплавы (ВТС), которые применяются для ряда ответственных деталей (режущий инструмент, буровые установки, пальцы шпалоподбойных машин и т.д.).

Однако стоимость вольфрама на мировых рынках непрерывно растет с каждым годом, что остро ставит проблему рационального использования твердосплавного инструмента.

Одним из эффективных методов рационального использования, с учетом экономии вольфрама, является увеличение срока службы и работоспособности ВТС за счет повышения эксплуатационных свойств, методами поверхностного упрочнения.

В мировой практике упрочнение исполнительных поверхностей ВТС, как правило, получают методами химического (ХОП) и физического (ФОП) осаждения покрытий. Однако использование этих методов экономически эффективно только для серийных, крупных предприятий, которые не характерны для Дальневосточного региона. Установки для этих методов требуют сложного оборудования, существенных экономических вложений, квалифицированной рабочей силы. Недостатками метода газофазного осаждения являются также невозможность формировать композиционные покрытия сложного состава, высокая энергоёмкость процесса; вносит загрязнения в окружающую среду. В работе [1] проведен анализ наиболее перспективных методов поверхностного упрочнения ВТС, подтверждающий вывод о неэффективности их использования для мелкосерийного и индивидуального производства.

Одним из перспективных методов в условиях мелкосерийного и индивидуального производства на Дальнем Востоке является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), предложенный в 1943 г. выдающимися русскими учеными, супругами Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Метод ЭИЛ нашел применение для упрочнения режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, благодаря возможности нанесения на поверхность любых токопроводящих материалов, в том числе и тугоплавких соединений [2].

Ранее [2; 3] попытки повышения эффективности формирования легированного слоя (ЛС) и его свойств осуществлялись за счет использования структуры и свойств электродного материала и подбора режимов упрочнения [4], однако это не позволяло существенно повысить толщину ЛС и улучшить его свойства. Недостатком метода ЭИЛ ВТС является небольшая толщина упрочняющего слоя (до 22-25 мкм), это особенно характерно при упрочнении материалов с высокой температурой плавления, например ВТС, что ограничивает более широкое использование этого метода в промышленности.

В связи с этим нами предложены гипотезы по повышению толщины и эксплуатационных свойств упрочняющего слоя для получения на поверхности ВТС композитных материалов с градиентной структурой и формирования островковых покрытий [5] с использованием комбинации методов ЭИЛ и электродуговой наплавки (ЭДН) и ЭИЛ и лазерной обработки (ЛО).

Достоинства ЭДН заключаются в том, что покрытия, полученные наплавкой, характеризуются отсутствием пор, высокими значениями модуля упругости и прочности на разрыв. Прочность соединения этих покрытий с основой соизмерима с прочностью материала детали. Лазерная обработка поверхностей металлов и сплавов относится к локальным методам термической обработки. Благодаря высокой плотности и мощности энергии обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения (10^4 - 10^8 °C/с) и малое время воздействия излучения на обрабатываемую поверхность, поэтому при лазерной обработке наблюдаются минимальное тепловое воздействие на обрабатываемую деталь и минимальное коробление детали. В работе [6] показано, что при лазерном упрочнении поверхности создаются износостойкие покрытия, однако применительно к ВТС такие исследования не проводились. Авторами [5] установлено, что на поверхности металла после разрушения ЭИЛ покрытия оставались участки («островки»), прочно соединенные с основой. Предполагается, что повышение износостойкости легированного слоя возможно за счет создания таких островков на ЭИЛ покрытии. Авторами [1; 2; 5; 6] приводились примеры повышения износостойкости металлических поверхностей за счет лазерной обработки

методом оплавления поверхности легированного слоя и методом термоупрочнения поверхности ВТС.

Благодаря сочетанию достоинств ЭИЛ и предлагаемых методов предполагалось повышение работоспособности ВТС. На основе предложенных гипотез целью работы является исследование процесса формирования ЛС и его свойств, полученного комбинацией методов ЭИЛ+ЭДН и ЭИЛ+ЛО.

Методы, материалы и оборудование

Для оценки эффективности процесса ЭИЛ использовали коэффициент $\gamma_{\text{Св}}$ [7]. Коэффициент $\gamma_{\text{Св}}$ может быть оценен как отношение величин, характеризующих те или иные физико-химические и эксплуатационные свойства ($\text{Св}_{\text{ЛС}}$) поверхностного слоя, к аналогичным величинам свойств ВТС в качестве основы (Св_0) без покрытия и может быть представлен величинами, характеризующими свойства твердости, жаростойкости, износостойкости и так далее, либо величиной одного из них. Таким образом, коэффициент $\gamma_{\text{Св}} = \text{Св}_{\text{ЛС}}/\text{Св}_0$. При этом значение основы всегда соответствует 100 %, а коэффициент эффективности может быть больше или меньше этого значения.

На основании предварительных исследований [8] по эффективности формирования поверхностного слоя выбраны электродные материалы. Выбор электродного материала основывался на его способности к повышению эффективности жаростойкости, износостойкости и микротвердости методом ЭИЛ ВТС. Рассмотрены следующие электродные материалы – среднеуглеродистая сталь 45, WC-15%Co спеченный при 1100 °С в Институте химии ДВО РАН, цирконсодержащий электрод Zr1, полученный в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» ГОУ ВО ДВГУПС, безвольфрамовый твердый сплав ТН20, состоящий из карбида титана TiC и связки Ni+Mo.

Из представленных электродов для ЭИЛ наибольшим повышением износостойкости ВТС (главный критерий выбора материала) по сравнению с упрочняемой основой является электрод Zr1 с показателем эффективности свойств легированного слоя в 222 % и электрод ТН20 с показателем в 140 %. Приведенные электроды имеют наибольшие показатели в повышении жаростойкости и микротвердости. Описанные электродные материалы выбраны для повышения эффективности процесса ЭИЛ ВТС за счет повышения микротвердости и износостойкости комбинацией методов ЭИЛ+ЭДН и ЭИЛ+ЛО.

Для упрочнения поверхности ВТС и исследования массопереноса материала электродов анод/катод в процессе ЭИЛ использовали установку Корона 1101 с режимом работы $I_{\text{ср.}}$ 0.7 А; $U_{\text{ср.}}$ 40 В; $t_{\text{имп}}$ $12 \cdot 10^{-5}$ с; $\gamma_{\text{ср}}$ 50 имп/с; W 10.08 Дж/мин. Режимы на установках варьировались в пределах их технических характеристик. Использовались режимы ЭИЛ, обеспечивающие лучшую сплошность покрытия [9], полученные на основании кинетических зависимостей.

Для создания наплавочного слоя использовался тиристорный сварочный источник фирмы ESAB – Origio Mig – 500t. Работа по наплавке проволоки на твердый сплав производилась при следующих режимах – напряжение U 17.8-20.2 В, подача проволоки V 2 м/мин, рабочий ток I 80-90 А. Использовали проволоку ESAB сплошного сечения d 0.8 мм, с содержанием состав в мас. %: С 0.06-0.14, Mn 1.40-1.60, Si 0.80-1.0, P_{max} 0.025, S_{max} 0.025, данная проволока является наиболее распространенной на промышленных предприятиях. Во время наплавки использовали защитный газ – CO₂ 100 %. Характеристики наплавочной проволоки – предел текучести 440 Н/мм², предел прочности 540 единиц.

Для лазерной обработки использовалась установка СКАТ 301. Работа на данной установке проводилась на следующих режимах: мощность – 340 Вт, частота импульса – 0.73 Гц, скорость перемещения дорожки – 1 мм/с, фокусное расстояние 4 мм, длина волны излучения неодимового лазера в ближнем инфракрасном диапазоне – 1.06 мкм, энергия в импульсе – 0.82-0.87 Дж.

Металлографический анализ сплавов выполнялся с помощью микроскопа ЕС МЕТАМ РВ 22 и металлографического комплекса МПМ 3 ФЦ при увеличении $\times 1000$. Исследование микроструктуры велось на растровом электронном микроскопе HITACHI S3400n и оптическом микроскопе NIKON MA200. Исследования микротвердости образцов проводились методом индентирования на микротвердомере ПМТ-3М и микротвердомером SHIMADZU HMV-2T. Замеры

значения микротвердости проводились согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

Контроль качества покрытий по критерию износостойкости проводили методом микроабразивного износа на приборе CALOTEST CSM Instruments, при котором вал вращался со скоростью 2990 об/мин, время испытания выдерживалось до 20 мин, в случае быстрого истирания покрытия эксперимент прекращался раньше, контртело – шарик из подшипниковой стали диаметром 20 мм, точность измерения кратера составляла от 1 до 5 %, при покрытии в 25-30 мкм, диаметр кратера составлял 0.07-1.7 мкм. Испытания полученных образцов на периферийное трение скольжения осуществлялись на машине трения ИИ-5018 по ГОСТ 23.205-79 при нагрузке 500 кгс и рабочим временем 120 мин. Материалом контртела служила закаленная сталь 60 твердостью HRC 40-45.

Результаты и обсуждения

Работа выполнялась в два этапа. На первом этапе были проведены исследования влияния макроструктуры, полученной комбинацией методов ЭИЛ и ЛО на поверхности ВТС. На втором этапе разрабатывали и исследовали композитный материал с градиентным изменением свойств, полученный комбинацией методов ЭИЛ и ЭДН:

1 Повышение эффективности износостойкости ВТС за счет упрочнения комбинацией методов ЭИЛ и ЛО.

На рис. 1 приведена макроструктура защитного слоя на ВТС, полученная методом ЭИЛ и ЛО.

Рис. 1. Модель изменения микрорельефа ЭИЛ покрытия на ВТС ВК8:
а – модель островкового покрытия; б – ЭИЛ покрытие Zr1 + ЛО на ВК8

Предложенная модель островкового покрытия показана на рис. 1, а с экспериментально установленными размерами участков, оплавляемых лазером. По имеющимся в литературе данным [5], размеры локальных участков («островков») принимали равными: N 7 мм; D 10 мм и расположением к направлению скольжения и α 15°. Суммарная площадь заполненных металлом участков покрытия при сравнении с номинальной поверхностью составляет $F_{\text{пл}} = 0.62 F_{\text{ном}}$. На рис. 1, б показан результат комбинированного покрытия на твердом сплаве ВК8, полученного методом ЭИЛ электродом Zr1 и модификацией лазерной обработки рельефа легированного слоя, по предложенной модели островкового покрытия. Для проведения эксплуатационных испытаний твердый сплав припаяли к металлической подложке (сталь, см. рис. 1, б). По подобранным режимам ЭИЛ на всю упрочняемую поверхность ВТС (ВК8, см. рис. 1, б) нанесли легированный слой с учетом оптимального времени для получения максимальной сплошности покрытия. При этом толщина слоя ЭИЛ составляла в среднем 10 мкм. Полученное покрытие обработали

лазерным лучом по предложенной модели с образованием продолговатых зон глубокого оплавления по всей упрочняемой поверхности.

Применение на твердом сплаве специальной микрогеометрии, создаваемой лазерным термоупрочнением, на слое, образованном ЭИЛ, способствует увеличению ресурса работы, надежности и эффективности оборудования. Образующиеся покрытия представляют гетерогенный материал, износостойкость которого зависит от условий эксплуатации изделий в реальных производственных условиях, физико-химической природы материалов электродов и технологических параметров процесса.

На рис. 2 показана микроструктура твердого сплава ВК8 с комбинированным упрочняющим покрытием.

Рис. 2. Микроструктура поперечного шлифа ВК8: а – зоны оплавления легированного слоя Zr1 лазером $\times 100$; б – микроструктура нижней точки зоны оплавления лазером $\times 1500$

На рис. 2, а видно, что после воздействия ЛО образовались два впадения, расстояние между которыми 200 мкм. Материал впавленных участков состоит из закристаллизованного материала покрытия и основы твердого сплава. Из рис. 2, а видно, что легированный слой на поверхности твердого сплава имеет толщину 10 мкм. При этом воздействие лазерного луча расплавляло слой и основу твердого сплава, образовав островки твердого сплава шириной 200 мкм, покрытые легированным слоем электрода Zr1. Глубина лазерного слоя составила на всех ВТС 500-563 мкм, соответственно и высота образованных островковых покрытий на ВТС примерно 500-563 мкм. Под локальным воздействием концентрированных потоков энергии в месте расплавления легированного слоя и твердого сплава происходит образование вытянутых зерен карбида вольфрама. В твердом сплаве, в месте воздействия лазерного луча, образуется зона термического влияния толщиной в среднем 90 мкм. На рис. 2, б показан участок нижней части зоны оплавления лазером – зона термического влияния на твердый сплав. В результате этого оплавления происходит измельчение зерен карбида вольфрама, тем самым образуя переходные зоны, состоящие из агломераций WC различной величины. Показано, что размер зерна в ВК8 в обычном состоянии составляет в среднем 3-4 мкм. В зоне термического влияния наблюдаются три переходных зоны различной ширины: зона 1 на рис. 2, б обозначена участком шириной 18 мкм, в котором размер зерна карбида вольфрама составляет от 0.7 до 1.2 мкм. При этом в зоне 2 шириной 9 мкм наблюдаются зерна размером 2.2-2.3 мкм, в зоне 3 видны вытянутые, переплавленные зерна карбида вольфрама размером 3-5.2 мкм, попавшие под прямое воздействие лазерного луча.

На рис. 2, а показаны зоны участка 1 – легированного слоя на твердом сплаве и участка 2 – зоны лазерного оплавления в твердом сплаве. Установлено, что при упрочнении безвольфрамовым твердым сплавом ТН20 в легированном слое наблюдается до 1.3 % титана, до 9.47 % кислорода, это указывает на образование в поверхностных слоях легированного слоя жаростойких и износостойких соединений и оксидов TiO_2 . При упрочнении ВТС электродом Zr1 образуется

тонкий слой, в котором содержится до 1.98 % циркония, до 9.30 % кислорода и в два раза больше углерода, чем при упрочнении ТН20, предполагается образование Zr_2O .

По проведенным ранее исследованиям [1] можно утверждать, что наличие циркония в легированном слое дает жаростойкие и износостойкие соединения, повышающие эксплуатационные свойства ВТС. Измельчение зерен карбидов вольфрама влияет на повышение микротвердости, а соответственно и на повышение износостойкости. В связи с этим микротвердость в зоне оплавления лазером повысилась в два раза, эффективность комбинированного процесса ЭИЛ и лазерной обработки за счет повышения микротвердости составляет 203 %.

В табл. 1 показаны результаты эксплуатационных испытаний упрочненных ВТС различными электродными материалами и лазерным термоупрочнением.

Таблица 1

Эффективность повышения эксплуатационных свойств ВТС
при комбинированном упрочнении методом ЭИЛ и ЛО

Исследуемый ВТС	Эффективность износостойкости покрытия, %	Эффективность микротвердости покрытия, %
ВК8 (Не покрыт)	100.0	100.0
ВК8+ТН20+ЛО	116.7	105.6
ВК8+Zr1+ЛО	140.0	116
Т15К6 (Не покрыт)	100.0	100.0
Т15К6 +ТН20+ЛО	140.0	121.26
Т15К6 + Zr1+ЛО	77.8	101

Как видно из табл. 1, эффективность процесса ЭИЛ ВТС за счет повышения износостойкости у некоторых образцов увеличилась на 40 %, при этом заметно снижение эффективности при упрочнении ВТС Т15К6 электродом Zr. Снижение износостойкости можно объяснить возникновением хрупких оксидных соединений в поверхностном слое и возникновением микротрещин при воздействии концентрированных потоков энергии. Материал Zr склонен к образованию хрупких оксидов Zr_2O и в случае с упрочнением ВТС группы ТК образованию оксида – TiO_2 . Под действием нагрузки, во время исследования износостойкости, поверхностный слой начал разрушаться и тем самым увеличил износ образца.

Применение лазерного упрочнения приведет к более экономному расходованию дорогостоящих, дефицитных твердосплавных инструментальных материалов, позволит значительно повысить производительность труда, снизить расходы на производство и эксплуатацию инструмента и тем самым обеспечить выпуск высококачественной продукции. Применение предлагаемой методики повышения износостойкости рекомендовано на сталях и твердых сплавах, не ответственных деталей железнодорожного транспорта, где допускается высокая шероховатость.

2 Повышение толщины защитного слоя и создание композитного покрытия с градиентным переходом свойств упрочнением поверхности ВТС комбинацией методов ЭИЛ и ЭДН.

Данные по проведению наплавочных работ на ВТС в литературе носят разрозненный характер и не систематизированы [10]. Для определения режима электродуговой наплавки на твердый сплав проведен модельный эксперимент (см. рис. 3).

Рис. 3. Макроструктура твердого сплава BK8: а – BK8 с трещиной поперек $\times 18$; б – BK8, расколовшийся на две части $\times 18$; в – BK8 без видимых трещин $\times 18$

Наплавка проводилась плавящимся электродом в среде CO_2 . Установлено, что при высоких режимах тока происходит интенсивное выделение тепла, вследствие этого твердый сплав нагревается до 300°C и происходит сплавление расплавленного металла с ВТС. При этом в некоторых случаях наблюдается диффузионная зона расплавленного металла на глубину до 70 % от общей толщины твердосплавной пластины. В процессе быстрого остывания в металле возникают сжимающие напряжения, которые разрушают ВТС (см. рис. 3, а). При проведении комбинированного упрочнения ВТС (см. рис. 3, б) методом ЭИЛ электродом с содержанием связей Ni-Mo (твердый сплав ТН20) и методом ЭДН установлено, что твердый сплав разрушается только в местах зоны сплавления наплавленного металла. Режим соблюдался аналогично первому эксперименту – напряжение U 35.7-41.2 В, подача проволоки V 3 м/мин, рабочий ток I 100-120 А. Диффузионная зона в данном случае достигает до 25 % от общей толщины твердосплавной пластины. На основе полученных результатов выдвинуто предположение о возможности сохранения твердого сплава при уменьшении силы тока, напряжении и замедлении скорости подачи проволоки в процессе наплавки на ВТС. Опытным путем определены режимы наплавки для получения сплошного слоя и сохранения целостности твердого сплава (см. рис. 3, в), при этом толщина наплавленного валика достигала 2000 мкм. Диффузионная зона в основу ВТС расплавленного металла составляла до 15 %. Однако в результате нанесения наплавленного металла на ВТС в его поверхности появляются микродефекты в виде трещин и пор, определить которые возможно только при высоком увеличении (более $\times 800$) в микроскоп. Низкая твердость наплавки (500-600 Нv) указывает на возможность разрушения (отслоения) поверхностного слоя от твердого сплава во время эксплуатации.

Предлагается гипотеза о создании композитного защитного слоя высокой толщины с повышенной износостойкостью на поверхности ВТС за счет градиентного перехода свойств (микротвердости) от поверхности наплавленного слоя к основе твердого сплава. Для проверки выдвинутой гипотезы предлагается использовать метод электроискрового легирования. В качестве электрода для электроискрового легирования предлагается электрод ТН20.

На рис. 4 показаны микроструктуры твердого сплава BK8 после комбинированного упрочнения методом ЭДН и ЭИЛ.

На рис. 4 показана микроструктура наплавленного слоя, упрочненного электродом ТН20 методом ЭИЛ. Структура наплавленной стали имеет феррито-перлитную фазу, что подтверждается микротвердостью в указанных местах: феррит – 80 Нv, перлит – 340 Нv, толщина легированного слоя (см. рис. 4, а участок 7) составляет 57.5 мкм, а толщина переходного слоя (см. рис. 4, а участок 6) к наплавке – 5.15 мкм. На рис. 4, б показана микроструктура твердого сплава BK8, легированного слоя электродом ТН20 методом ЭИЛ и наплавочного слоя, а также переходных зон указанных слоев. Участком 1 обозначена зона толщиной 120-140 мкм, насыщенная углеродом. Между легированным слоем и твердым сплавом образовалась переходная зона толщиной 5 мкм (см. рис. 4, б участок 2), толщина легированного слоя составляет 20 мкм (см. рис. 4, б участок 3), участком 4 обозначена зона сплавления легированного слоя и наплавочного слоя.

Рис. 4. Микроструктура слоя: а – наплавочный слой легированный электродом ТН20 х800; б – комбинация слоев на твердом сплаве ВК8 х600

На рис. 5 представлена микроструктура защитного слоя.

Рис. 5. Микроструктура защитного слоя. Участки 1-7 показывают место химического анализа и измерения микротвердости

На приведенном рис. 5 показан упрочняющий слой общей толщиной от ЭИЛ до ВТС – 1467 мкм, толщина наплавочного слоя (участок 5) составила 1385 мкм. Замечено, что указанные переходные зоны и слои различаются микротвердостью, цветом и различным химическим составом. Нумерация участков, показанная на рис. 4-5, соответствует зонам с различным химическим составом и различной микротвердостью. Так, участок 1 (Уч. 1) – это основа упрочняемого, вольфрамосодержащего твердого сплава ВК8. Участком 2 (Уч. 2) отмечена диффузионная зона между легированным слоем, полученным методом ЭИЛ и упрочняемым твердым сплавом. Легированный слой показан на участке 3 (Уч. 3), имеет общую диффузионную зону с ВТС (участок 3) и общую диффузионную зону с наплавленным слоем – участок 4 (Уч. 4). Слой, полученный методом электродуговой наплавки, обозначен участком 5 (Уч. 5) и имеет наибольшую толщину. При упрочнении наплавленного слоя методом ЭИЛ, образовалась диффузионная зона между легированным слоем и наплавленным металлом на участке 6 (Уч. 6), при этом легированный слой обозначен участком 7 (Уч. 7).

В табл. 2 приведен химический состав участков 1-7 (см. рис. 5) защитного слоя на ВТС.

Из таблицы видно, что концентрация углерода повышается от твердого сплава к поверхности наплавочного слоя, это объясняется диффузионными процессами углерода из твердого сплава к поверхности под воздействием высоких температур при наплавке. Повышенная концентрация углерода (почти в два раза) связана с воздействием электроискрового легирования на наплавочный металл. Титан диффундировал в твердый сплав и в наплавочный слой при ЭИЛ электродом ТН20, железо также перенеслось в поверхностный слой твердого сплава. На основании сделанных экспериментов по исследованию повышения эффективности процесса ЭИЛ ВТС электродами ТН20 и сталь 45 предполагается, что наличие в твердом сплаве железа и

титана повышает жаростойкость и износостойкость, а также наличие указанных металлов на поверхности наплавочного слоя повысит его микротвердость и износостойкость.

Таблица 2

Химический состав поверхности после ЭИЛ ВК8 и его ЭДН

Химический элемент	Уч. 1	Уч. 2	Уч. 3	Уч. 4	Уч. 5	Уч. 6	Уч. 7
C	8.07	7.83	8.29	8.09	9.18	14.17	14.26
O	4.76	5.61	10.56	3.82		4.19	8.72
Ti	0.18	0.74	1.88	0.43	0.00	0.79	2.03
Mn		0.38	0.50	0.78	1.20	0.77	
Fe	7.32	15.87	28.55	64.49	77.99	47.17	9.38
Co	5.16	6.30	7.60	4.29	0.87	2.72	5.92
Ni	0.00	0.00	0.17	0.14	0.06	0.02	0.01
Mo	0.00	0.74	0.00	0.00	0.93	0.00	0.23
Ta	0.45	1.15	1.35	0.61	0.03	1.05	2.82
W	73.54	59.52	39.82	17.35	9.36	28.81	55.90

На рис. 6 показано изменение микротвердости в основных и переходных слоях защитного покрытия от твердого сплава ВК8 к поверхности покрытия.

Рис. 6. Распределение микротвердости защитного слоя

Средние значения микротвердости полученных слоев представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения микротвердости защитного покрытия в HV

Уч. 1	Уч. 2	Уч. 3	Уч. 4	Уч. 5	Уч. 6	Уч. 7
1398.30	1263.53	1463.61	1129.95	777.35	1103.44	1249.70

Как видно из табл. 3, соблюдается градиентный переход от поверхности защитного слоя к основе твердого сплава.

Создание композитных материалов на поверхности твердых сплавов применимо для восстановления и упрочнения деталей на железнодорожном транспорте. Это могут быть ответственные детали, такие как автосцепка вагонов, замки автосцепки, пальцы шпалоподбивочных машин, упрочнение режущего инструмента, штамповой оснастки и других изделий.

Выводы

1. Впервые предложены гипотезы и методологические подходы к решению проблемы повышения работоспособности ВТС методом ЭИЛ и комбинацией методов ЭИЛ и ЭДН и методов ЭИЛ и ЛО.

2. Впервые предложен новый подход к получению композитного материала комбинацией методов упрочнения ЭИЛ и ЭДН на ВТС с градиентным переходом свойств.

3. Получен композитный слой на упрочняемом ВТС с градиентным переходом микротвердости от поверхности к основе, толщиной более 1300 мкм, с сочетанием мягкой и твердой упрочняющих фаз, при этом в зоне взаимодействия градиентных слоев наблюдаются диффузионное взаимодействие и зоны взаимной кристаллизации.

4. В два раза повышена износостойкость при сухом трении титановольфрамсодержащих твердых сплавов за счет комбинации методов ЭИЛ и ЛО.

5. Исследован процесс повышения износостойкости за счет создания островкового покрытия методом ЭИЛ и ЛО. Показано, что в местах глубокого лазерного оплавления формируется несколько переходных зон.

6. Показано, что образованное с помощью ЛО островковое покрытие с расстоянием островков порядка 7-10 мм повышает износостойкость твердого сплава на 70 % больше по сравнению с его основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование и свойства композиционных эил-покрытий на сталях ШХ15 и Р6М5 с использованием новых керамических материалов [текст] / И. А. Подчерняева, А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, Я. А. Востриков // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 2. – 2014. – С. 34-39.
2. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
3. Верхотуров, А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей [текст] / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха. – Киев: Техніка, 1982. – 181 с.
4. Электродные материалы для электроискрового легирования [текст] / А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, Л. Ф. Прядко, Ф. Ф. Егоров; отв. ред. М. Д. Смолин, АН СССР, Дальневост. науч. центр, Ин-т горн. дела. – М.: Наука, 1988. – 222 с.
5. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610392 от 23.01.2007 по заявке № 2006613256 // В. Д. Власенко, Ю. И. Мулин. Программа расчета технологических параметров процесса электроискрового легирования для образования функциональных поверхностей.
6. Ляшенко, Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – № 4(10). – С. 17-25.
7. Верхотуров, А. Д. К вопросу о критерии эффективности процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, И. А. Астапов // Вестник АмГУ. – 2007. – № 39. – С. 6-9.
8. Верхотуров, А. Д. Научные основы формирования легированного слоя и создания электродных материалов при электроискровом легировании: дис. ... д-р техн. наук / А. Д. Верхотуров. – Киев, 1984. – 532 с.
9. Коневцов, Л. А. Повышение работоспособности режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов электроискровым легированием металлами и боридами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Леонид Алексеевич Коневцов. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 154 с.
10. Инновационные подходы к развитию предприятий, отраслей, комплексов. В 2 кн. К 2: моногр. / авт. кол.: А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, А. В. Угляница [и др.]. – Одесса: Купrienko С.В., 2015. – 209 с.