

УДК 620.18+544.015

Корбут Е. В.¹, Подчерняева И. А.², Ляшенко Б. А.³, Юречко Д. В.²

¹НТУ Украины «Киевский Политехнический Институт». Украина, г. Киев

²Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ. Украина, г. Киев

³Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Украина, г. Киев

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Анотація

На підставі огляду літератури по електроіскровому зміцненню твердих сплавів із вмістом вольфраму (ВТС) зроблений висновок, що ефективним шляхом підвищення експлуатаційних властивостей ВТС є оптимізація складу легуючого електрода, технологічних схем нанесення покриттів (багатосарові, комбіновані) та їх структурування (дискретні, глобулярні).

Abstract

On the basic of literature review on the electric-spark hardening of tungsten containing hard alloys (TNA) the following conclusion was done. The effective way of TNA exploitation properties increase is the optimization of alloying electrode composition as well as both technological schemes of coating deposition (layered, combined) and their structuring (uncontinuous, global).

Введение

В настоящее время около 80% режущего инструмента из вольфрамосодержащих твердых сплавов (ВТС) выпускают с защитными покрытиями для уменьшения коэффициента трения, увеличения трещиностойкости и стойкости к высокотемпературной коррозии. ВТС при больших тепловых нагрузках в зоне резания подвергаются высокотемпературному окислению. Высокая скорость испарения оксидов вольфрама значительно увеличивает износ инструмента, ограничивая рабочую температуру резания ($\leq 800^\circ\text{C}$). В качестве материала защитных покрытий используют преимущественно карбонитриды титана, гафния, сложный нитрид (Ti, Al)N [1] и многослойные покрытия с комбинацией слоев HfC, HfN,

Hf(C, N), AlN [2], обеспечивающих защиту от износа и высокотемпературной коррозии. Для традиционно используемых покрытий (Ti, Al)N достигаемый эффект объясняется как наличием износо-коррозионно стойкой составляющей нитрида титана, так и образованием в процессе трибоокисления на поверхности режущей кромки вторичных структур из твердых растворов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ и высокотемпературного коррозионностойкого β -тиалита (Al_2TiO_5), которые прочно связаны с поверхностью покрытия и могут играть роль твердой смазки при трении скольжения на воздухе [3].

Защитные покрытия на ВТС в основном наносят с использованием различных вариантов метода газофазного осаждения (PVD, PCVD), их комбинаций [4], а также его комбинацией с другими методами, например, с термодиффузионным насыщением [5] и электроискровым легированием [6]. PCVD-метод заключается в химическом осаждении из газовой фазы, активированной холодной плазмой, тонких слоев (1...3 мкм) из MeC, MeN, Me(C, N), Al_2O_3 , ALON (Me-переходный металл IV группы), наносимых по отдельности или в разных комбинациях. Недостатками газофазных методов осаждения являются высокая температура осаждения ($\sim 500^\circ\text{C}$ и выше), сложность технологического процесса, связанная с использованием высокого вакуума, реактивных газов, включая экологически опасные хлориды, с большим количеством операций в одном цикле, а также высокая потребляемая мощность (2,2...3,5 кВт).

Конкурирующим способом нанесения износо-, коррозионностойких покрытий на ВТС может быть электроискровое легирование (ЭИЛ) [7], являющееся одним из приоритетных направлений развития химико-термической обработки металлов с использованием концентрированных потоков энергии. ЭИЛ отличается низкой температурой осаждения ($< 70^\circ\text{C}$), простотой технологической операции (процесс осу-



ществляется на воздухе, не требует сложного крупногабаритного оборудования, предварительной обработки поверхности и многостадийности), высокой прочностью сцепления покрытия с основой и малой потребляемой мощностью (0,2...0,7 кВт). Композиционное электроискровое покрытие формируется при взаимодействии продуктов электроэрозии электрода (анода) в жидкопаровой и твердой фазах с материалом обрабатываемой детали (катода) в микрованне расплава на рабочей поверхности. Улучшение эксплуатационных характеристик электроискровых покрытий достигается различными способами, главными из которых являются выбор оптимальных составов материала легирующего электрода, режимов обработки, конструирование структуры покрытия (многослойная, глобулярная) и комбинация ЭИЛ с другими методами.

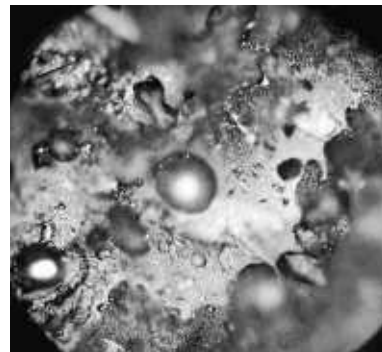
В настоящей работе обобщены и проанализированы имеющиеся сведения по электроискровому упрочнению вольфрамсодержащих твердых сплавов с целью показать перспективность этого направления для повышения работоспособности твердосплавного режущего инструмента.

Электромассоперенос при электроискровом легировании ВТС

Изменение эрозии анода (электрода) Δa и привеса катода (детали) Δk с увеличением времени электроискровой обработки является важнейшим технологическим параметром процесса, характеризующим его эффективность [7].

Исследование параметров электромассопереноса в процессе ЭИЛ ВТС композитами на основе тугоплавких соединений титана, циркония и металлами (Al, Ti, Cu) показало [13, 14], что кинетика массопереноса не отличается от таковой для подложек из металлических сплавов: привес катода (ВТС) возрастает до порога хрупкого разрушения легированного слоя (t_x), обеспечивая увеличение коэффициента массопереноса k_t в диапазоне $t \leq t_x$. При этом использование металлического электроискрового подслоя увеличивает эффективность массопереноса за счет уменьшения твердофазной составляющей эрозии катода из ВТС [13]. Величина k_t , определяемая как отношение привеса катода к эрозии анода $k_t = |\Delta k|/|\Delta a| \cdot 100\%$, составляет 80...50% в случае ЭИЛ твердых сплавов металлами и существенно меньше ($\leq 40\%$) — композитами на основе тугоплавких соединений [14].

В условиях ЭИЛ в системах «керамика (анод) — керамика (катод)» кинетические зависимости электромассопереноса и вторичная структура на рабочей поверхности анода имеют тот же характер, что и для систем с металлическим катодом [15]. Это же относится и к системам «керамика (анод) — ВТС (катод)». Было показано [14], что в процессе ЭИЛ сплава ВК6



a



б

Рис. 1. Микроструктура рабочей поверхности анода (керамика на основе ZrB_2) после ЭИЛ сплава ВК6 (а) и продукты эрозии анода (б), $\times 800$ [14]

композиционной керамикой на основе ZrB_2 на рабочей поверхности керамического анода формируется типичная вторичная структура, возникающая за счет обратного массопереноса материала катода на анод и преимущественно теплового воздействия искрового разряда на поверхность анода (рис. 1, а). Последнее подтверждается наличием в продуктах электроэрозии анода сфероидизированных оплавленных частиц (рис. 1, б) и микроструктурой рабочей поверхности анода (рис. 1, а), которая представляет поверхность оплавления с термическими трещинами и характерными сфероидизированными впадинами, образовавшимися в результате испарения газовых включений.

Влияние электроискрового легирования на стойкость ВТС к высокотемпературной коррозии

При обработке металлов резанием в зоне контакта реза с обрабатываемым материалом вследствие трения может развиваться температура до $1100^\circ C$. Это приводит к окислению поверхности режущей кромки, уменьшению механической прочности материала реза, увеличению его адгезии к обрабатываемому материалу и, соответственно, к снижению эффективности резания. Поэтому актуальной проблемой является повышение стойкости материала реза к высокотемпературной коррозии. Это особен-

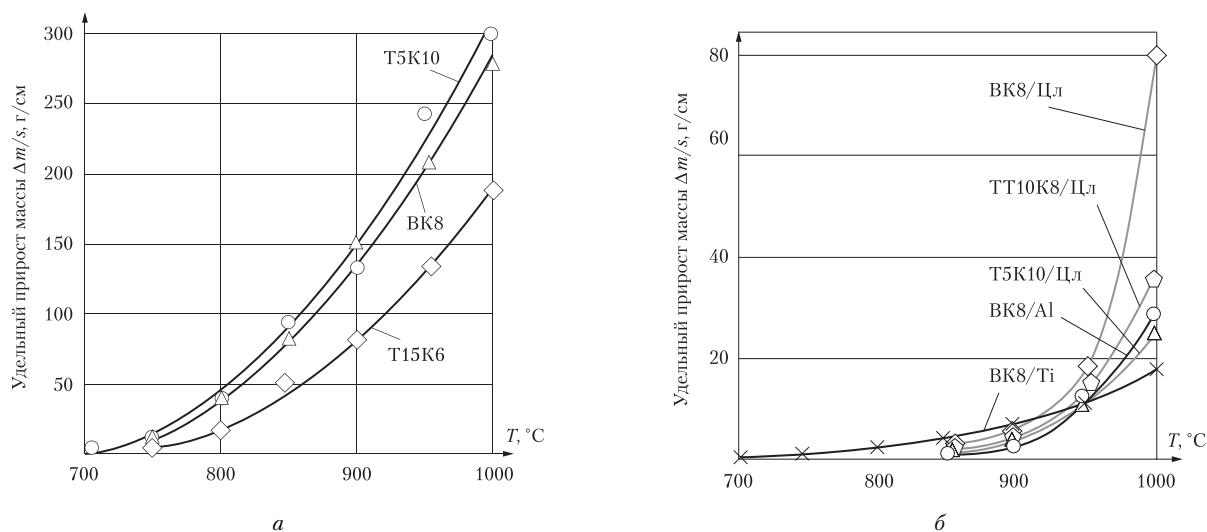


Рис. 2. Изменение с температурой удельного привеса образцов и ВТС при нагреве на воздухе со скоростью 20 $^\circ C/мин$:
а — без покрытия; б — с ЭИЛ-покрытием [14]

но важно для инструментов из ВТС, если учесть высокую скорость испарения оксидов вольфрама WO_3 , $CoWO_4$. Указанная проблема может решаться двумя путями: 1 — легированием кобальтовой связки с целью образования более окалиностойких Co-сплавов [16]; 2 — нанесением стойких к высокотемпературной коррозии покрытий [1, 13, 14]. Второй путь является экономически более целесообразным по сравнению с объемным легированием.

Систематические исследования окалиностойкости ВТС с электроискровым покрытием в широком диапазоне составов как ВТС (VK6, VK8, T5K10, T15K6, TT8K7), так и легирующих электродов (Al, Ti, Si, коллоидный графит, керамика на основе тугоплавких соединений титана и циркония) в область рабочих температур резания 650...1000 $^\circ C$ проведены в работах [13, 14]. Обнаружено, что ЭИЛ-покрытия в 4...10 раз уменьшают прирост массы образца ВТС при повышенных температурах (рис. 2). Причем максимальная коррозионная стойкость достигается ЭИЛ металлами Al и Ti. Этот результат является следствием окисления компонентов на поверхности электроискрового покрытия с образованием оксидных фаз повышенной коррозионной стойкости.

В случае ЭИЛ алюминием такими компонентами, согласно результатам микрорентгеноспектрального анализа [14], являются алюминий и вольфрам, которые в процессе высокотемпературного окисления могут образовывать на поверхности коррозионно-стойкие алуминаты вольфрама систем $W-Al-O$ и $W-Al-Co-O$. Это предположение подтверждается образованием в процессе трибоокисления алуминатов вольфрама на изношенной поверхности режущей кромки VK8-пластины с ЭИЛ-покрытием из алюминиевого сплава АЛ25 [17], что свидетельствует о формировании вторичных структур на рабочей

поверхности инструмента при обработке резанием. Следует отметить, что несплошность электроискровых покрытий, способствующая повышению их износостойкости [8], в то же время снижает стойкость поверхности к коррозии за счет непокрытых участков поверхности.

Влияние электроискрового легирования на триботехнические характеристики ВТС

Для обеспечения несущей способности режущего инструмента и стойкости к ударным нагрузкам применяют различного вида покрытия с градиентной, слоистой или матричной структурой, обеспечивающей снижение остаточных напряжений за счет чередования твердой и мягкой составляющих [1, 4, 5, 8]. Создание слоистых структур возможно в том числе с использованием метода ЭИЛ путем чередования электродов разного состава [18] либо комбинированием метода ЭИЛ с другими способами нанесения [6, 19, 20].

Особенностью ЭИЛ-покрытий является присущая им несплошность, изменяющаяся в интервале 40...10 % и обеспечивающая повышение износостойкости за счет дискретности структуры покрытия, ответственной за снижение остаточных напряжений [8]. Эффект дискретности покрытия усиливается при ЭИЛ композиционной керамикой (без металлического связующего) за счет формирования на начальном этапе обработки сфероидизированных глобул повышенной твердости по сравнению с поверхностью [9–12]. Наличие таких глобул, помимо снижения остаточных напряжений, уменьшает площадь трибоконтакта, что приводит к увеличению удельной нагрузки и, как результат, инициирует реакции трибоокисления, которые ответственны за формирова-

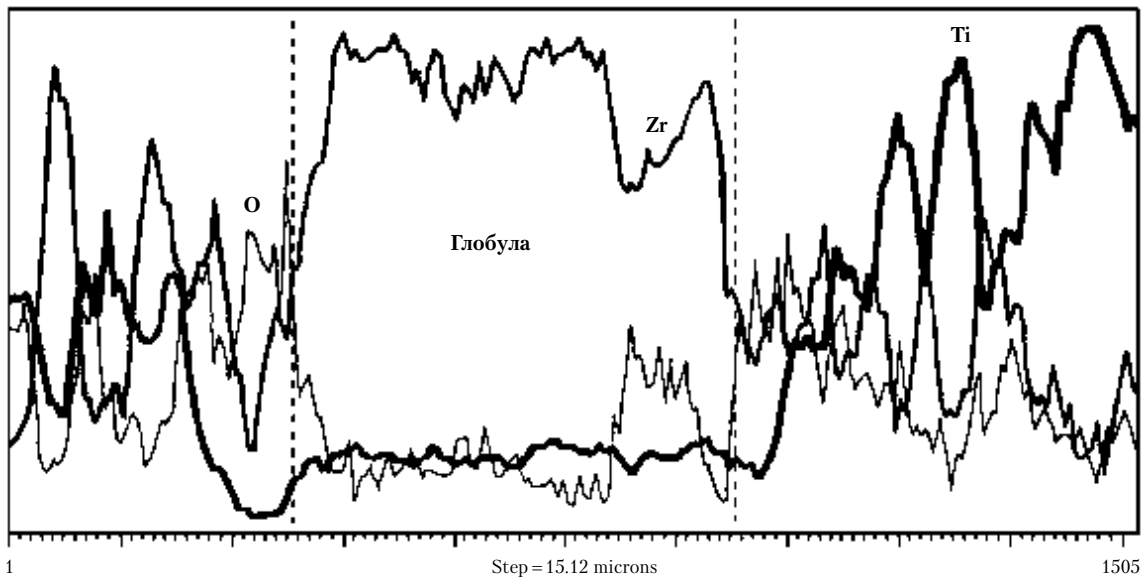


Beam = 98.32 nA, KeV = 15.

Sp. = 1, Element: O, Scala = 150

Sp. = 2, Element: Zr, Scala = 950

Sp. = 3, Element: Ti, Scala = 2000



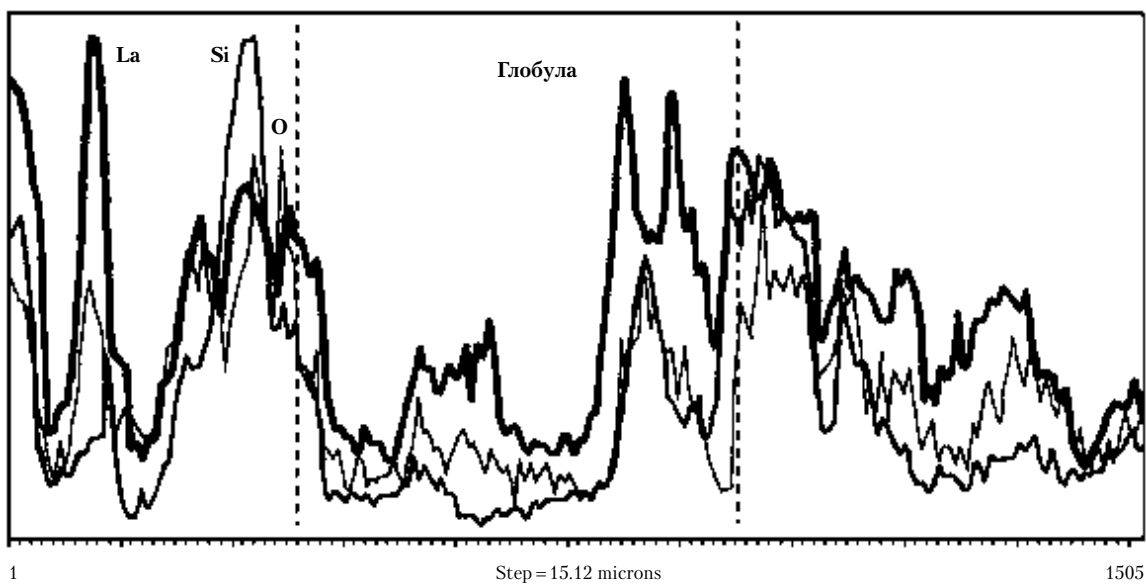
a

Beam = 109.23 nA, KeV = 15.

Sp. = 1, Element: O, Scala = 150

Sp. = 2, Element: Si, Scala = 500

Sp. = 3, Element: La, Scala = 500



б

Рис. 3. Распределение элементов на поверхности ЭИЛ-покрытия с глобулярной структурой системы ЦЛАБ-2/ВТЗ-1 (основа) [12]

ние полиоксидных вторичных структур, играющих роль твердой смазки.

На рис. 3, заимствованном из работы [12], в качестве примера приведен микрорентгеноспектральный анализ поверхности глобулы, формирующейся на начальном этапе ЭИЛ титанового сплава ВТ3-1 электродным керамическим материалом на основе диборида циркония системы ZrB_2-ZrSi_2 (ЦЛАБ-2).

Выбор Ti-сплава в качестве подложки интересен еще и с точки зрения возможности использования титанового электроискрового подслоя на ВТС с целью увеличения адгезионной прочности связи покрытия с основой. Высота глобулы $\approx 180 \pm 30$ мкм, диаметр ≈ 700 мкм, площадь поверхности, занимаемая глобулами, составляет 30...40%. Поскольку основным элементом глобулы является Zr (рис. 3), с большой долей вероятности можно предположить, что основу ее составляет диборид циркония, имеющий, согласно справочным данным, микротвердость 28 ± 1 ГПа. Это предположение подтверждается распределением микротвердости по поперечному сечению покрытия в области глобулы (рис. 4). Как видно, микротвердость глобулы несколько ниже по сравнению с микротвердостью диборида циркония из-за модифицирования ее другими легирующими компонентами, но достаточно высока и составляет ~ 20 ГПа.

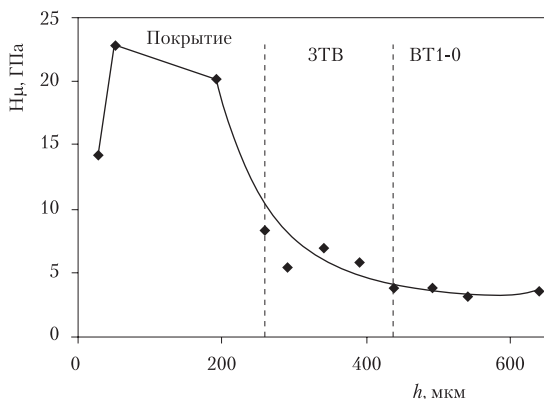


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине глобулы ЭИЛ-покрытия системы ЦЛАБ-2/ВТ1-0 (основа) [12]

Таким образом, структурированная глобулами поверхность ЭИЛ-покрытия может быть представлена в виде сравнительно мягкой основы (модифицированный легирующими компонентами металлический сплав подложки), армированной твердыми выступающими включениями. Более высокая износостойкость такой глобулярной структуры покрытия по сравнению со сплошной подтверждена в работе [10] для условий фреттинг-коррозии без смазки.

ВТС традиционно используют для электроискрового упрочнения металлических сплавов, в том числе инструментов из быстрорежущих сталей [22, 23]. Представляет интерес обратная задача — ЭИЛ собственно вольфрамсодержащих твердых сплавов. Перспективность этого направления впервые была

показана в работах [13, 14] и подтверждается сравнением зависимостей интенсивности изнашивания (I) и коэффициента трения (f) от скорости скольжения (V) для исходного сплава ВК8 (без покрытия) и после его ЭИЛ композиционной керамикой различных составов (рис. 5). ЭИЛ-покрытия наносили на лабораторной установке Элитрон-21 в режиме: частота импульса тока ~ 1200 Гц, энергия в импульсе 0,008 Дж, время обработки 2 мин/см². Композиционные керамические электроды были разработаны и изготовлены в ИПМ НАНУ. Использованы композиты на основе тугоплавких соединений титана: карбонитрида титана (КНТ14АН), диборида титана (ТБНА20), системы TiN—AlN (TiAlN) без связки и со связкой.

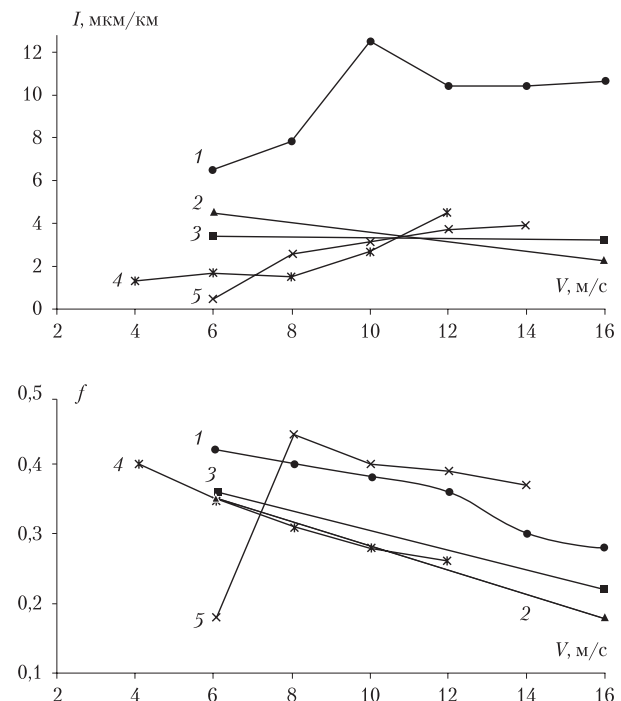


Рис. 5. Интенсивность изнашивания (I) и коэффициент трения (f) сплава ВК8 без покрытия (1) и с ЭИЛ-покрытиями в зависимости от скорости скольжения (V): TiAlN c/c (2); TiAlN б/с (3); ТБНА20 (4); КНТ14А (5)

Триботехнические параметры измеряли на воздухе в условиях трения скольжения без смазки по схеме «вал-вкладыш» по методике работы [24], контртелом служила закаленная сталь 65Г.

Из зависимостей рис. 5 следует, что при $V=12$ м/с интенсивности изнашивания сплава ВК8 с ЭИЛ-покрытиями на $\sim 70\%$, а коэффициент трения на $\sim 30\%$ ниже по сравнению с исходным твердым сплавом без покрытия. При этом уменьшение величин I и f с ростом скорости скольжения свидетельствует об образовании на рабочей поверхности вторичных полиоксидных структур в процессе изнашивания покрытий, выступающих в роли твердой смазки. Такая вторичная структура (трибопленка) образуется в зоне трибоконтакта в результате компактирования



и спекания в процессе трения окисленных продуктов износа [25].

Существуют разные технологические приемы повышения износостойкости ЭИЛ-покрытий: их комбинация с различными методами обработки поверхности (лазерное оплавление [12, 20, 21], магнитоабразивная обработка [6]), с другими способами нанесения покрытий (газофазным [6], электролитическим [26] осаждением), а также нанесение многослойных ЭИЛ-покрытий [10, 18].

Зависимости на рис. 5 с учетом результатов исследований последнего десятилетия приводят к выводу, что оптимизация составов легирующего электрода, режимов обработки, конструктивных схем покрытия в сочетании ЭИЛ с другими методами осаждения и обработки поверхности является эффективным путем повышения эксплуатационных свойств ВТС.

Выводы

При ЭИЛ ВТС материалами разных классов закономерности электропереноса и формирования вторичной структуры на рабочей поверхности электрода (анода) сохраняются те же, что и для металлических катодов. Низкий коэффициент массопереноса при ЭИЛ ВТС ($\leq 40\%$) можно повысить использованием металлического подслоя. ЭИЛ-покрытия в 4...10 раз увеличивают стойкость ВТС к высокотемпературному окислению и на 70% — стойкость к износу в условиях трения скольжения на воздухе. Основными параметрами, контролирующими свойства электроискровых покрытий на сплавах ВТС, являются состав легирующего электрода, режим нанесения и конструирование структуры покрытия — одно- или многослойное, дискретное, глобулярное, а также комбинация ЭИЛ с другими методами нанесения.

Анализ литературы приводит к выводу, что электроискровое упрочнение вольфрамсодержащих твердых сплавов является перспективным направлением повышения их эксплуатационных свойств за счет использования специальных электродных материалов, оптимизации технологических схем нанесения покрытий и их структурирования.

Литература

1. *Tool coating AIDS titanium cutting / Metalwork, PROD.* — 1991. — v. 135. — № 12. — P. 28.
2. *Pat. 254489.* Япония. N. Ogori, K. Yamadata, T. Nomura et. al. — Опубл. 18.04.91.
3. *Мосина Т. В., Панасюк А. Д., Юга А. И., Григорьев О. Н.* Фрикционные свойства композиционных материалов системы TiN—AlN / Порошковая металлургия. — 1999. — № 9/10. — с. 104–108.
4. *Matthews A., Zeyland A.* Developments in vapour deposited ceramic coatings for tribological applications / Key Eng. Mat. — 2001. — v. 206–213. — p. 459–466.

5. *Фадеев В. С., Верхотуров А. Д., Паладин Н. М.* и др. Разработка и создание слоистых материалов инструментального подназначения с заданным градиентом свойств / Перспективные материалы. — 2004. — № 5. — с. 45–52.

6. *Степанова О. В., Подчерняева И. А., Тимофеева И. И.* и др. Влияние комбинации газофазного осаждения с электроискровым легированием на износостойкость твердого сплава ВК8 / Порошковая металлургия. — 2006. — № 7/8. — с. 49–55.

7. *Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Езоров Ф. Ф.* Электродные материалы для электроискрового легирования. — М.: Наука. — 1988. — 223 с.

8. *Ляшенко Б. А., Мовшиович А. Я., Долматов А. И.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Научно-технические системы. Сер. Технологические системы. — 2001. — № 4. — с. 17–25.

9. *Юречко Д. В., Подчерняева И. А., Панасюк А. Д., Григорьев О. Н.* Физико-химическая модель формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах при электроискровом массопереносе композиционной керамики / Порошковая металлургия. — 2006. — № 1/2. — с. 51–58.

10. *Подчерняева И. А., Панашенко В. М., Панасюк А. Д.* и др. Электроискровое упрочнение титанового сплава ВТЗ-1 безвольфрамовой композиционной керамикой / Порошковая металлургия. — 2007. — № 9/10. — с. 36–44.

11. *Подчерняева И. А., Степанова О. В., Панасюк А. Д.* и др. Особенности глобулярной структуры электроискровых покрытий на сплаве ВК8 / Порошковая металлургия. — 2008. — № 5/6. — с. 77–84.

12. *Подчерняева И. А., Панасюк А. Д., Панашенко В. М.* и др. Электроэрозионная стойкость и структурно-фазовые превращения при электроискровом и лазерном легировании титанового сплава композиционной керамикой на основе систем ZrB₂—ZrSi₂ и TiN—Cr₃C₂ / Порошковая металлургия. — 2008. — № 1/2. — с. 151–161.

13. *Подчерняева И. А., Лавренко В. А., Березанская В. И.* и др. Формирование и свойства электроискровых покрытий на твердом сплаве ВК6 / Порошковая металлургия. — 1994. — № 11/12. — с. 19–24.

14. *Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А., Подчерняева И. А.*, и др. Электроискровое упрочнение твердосплавного режущего инструмента алюминием и композиционной керамикой на основе ZrB₂ / Перспективные материалы. — 2007. № 3. — с. 72–80.

15. *Подчерняева И. А., Панашенко В. М., Григорьев О. Н.* и др. Структурные и фазовые превращения при электроискровом модифицировании в системе керамика — керамика / Порошковая металлургия. — 2006. — № 11/12. — с. 40–47.

16. *Пантелеев И. Б., Лукашова Т. В., Орданьян С. С.* Окалиностойкость и высокотемпературная прочность твердых сплавов WC—Co—Ni—Re(Mn) / Порошковая металлургия. — 2006. — № 7/8. — с. 55–59.

17. Подчерняева И. А., Юречко Д. В., Бочко А. В. и др. Влияние электроискрового легирования Al—Si сплавов твердосплавной режущей пластины на износостойкость / Порошковая металлургия. — в печати.
18. Подчерняева И. А., Григорьев О. Н., Субботин В. И. и др. Износостойкие слоистые электроискровые покрытия на основе ZrB_2 / Порошковая металлургия. — 2004. — 7/8. — с. 77–81.
19. Подчерняева И. А., Тепленко М. А., Костенко А. Д. и др. Влияние послойного электроискрового легирования на свойства композиционного электролитического покрытия системы Ni—В / порошковая металлургия. — 2004. — № 1/2. — с. 42–46.
20. Подчерняева И. А., Панасюк А. Д., Панашенко В. М. Закономерности абразивного изнашивания ZrB_2 -содержащих электроискровых комбинированных покрытий на титановом сплаве. Сообщение I / Порошковая металлургия. — 2009. — № 5/6. — с. 88–100.
21. Подчерняева И. А., Панасюк А. Д., Панашенко В. М. и др. Электроэрозионная стойкость и структурно-фазовые превращения при электроискровом и лазерном легировании титанового сплава композиционной керамикой на основе систем ZrB_2 — $ZrSi_2$ и TiN— Cr_3C_2 / Порошковая металлургия. — 2008. — № 1/2. — с. 151–161.
22. Zamulaeva E. I., Levashov E. A., Kudryashov A. E., Vakaev P. V., Petrzhik M. I. Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC—Co electrodes: Deposition process, structure, and properties / Surface and Coating Technology. — 2008. — v. 202. — № 15. — P. 3715–3722.
23. Soma Raju K., Faisal N. H., Srinivasa Rao D., Joshi S. V., Sundararajan G. Electro-spark coatings for enhanced performance of twist drills / Surface and Coatings Technology. — 2008. — v. 202. — № 9. — P. 1636–1644.
24. Мамыкин Е. Т., Юга А. И. Комплекс машин и методов для определения антифрикционных свойств в условиях трения скольжения / Порошковая металлургия. — 1973. — № 1. — с. 62–67.
25. Kato H., Komai K. Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces / Wear. — 2007. — v. 262. — № 1/2. — P. 36–41.
26. Подчерняева И. А., Тепленко М. А., Костенко А. Д. и др. Влияние послойного электроискрового легирования на свойства композиционного электролитического покрытия системы Ni—В / Порошковая металлургия. — 2004. — № 1/2. — с. 42–46.