

Ng II-1 (30) 2017

Востриков Я. А., Верхотуров А. Д., Бурков А. А., Рыбалкин А. А., Коновалова Н. С. Ya. A. Vostrikov, A. D. Verkhoturov, A. A. Burkov, A. A. Rybalkin, N. S. Konovalova

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЭИЛ

INCREASING THE HEAT RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE OF HARD TUNGSTEN ALLOYS BY SPARK ALLOYING

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

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

Верхотуров Анатолий Демьянович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

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

Бурков Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск).

Mr. Alexander A. Burkov – PhD in Physics and Mathematics, researcher at the Institute for Materials, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk).

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

Mr. Anton A. Rybalkin – a post-graduate student, Foundry Industrial Machinery and Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Коновалова Наталья Сергеевна — научный сотрудник Института тектоники и геофизики имени Ю. А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск); 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

Ms. N. S. Konovalova. – research Fellow, Institute for Tectonics and Geophysics named after Y.A. Kosygin, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680000, Khabarovsk, Kim Yuchen str., 65.

Аннотация. В работе исследован процесс формирования легированного слоя на вольфрамсодержащих твердых сплавах. Установлено повышение жаростойкости и износостойкости при упрочнении твердых сплавов жаростойкими и износостойкими металлами и твердыми сплавами. Определено оптимальное время упрочнения вольфрамсодержащих твердых сплавов в зависимости от используемого анода.

Summary. This article describes the study of getting a protective layer on a hard tungsten alloys. The authors established that an increase in heat resistance and wear resistance is possible with carbide hardening heat-resistant and wear-resistant metals and hard alloys. The paper determines the optimal time of hardening tungsten hard alloys depending on the anode.

Ключевые слова: электроискровое легирование, поверхностный слой, твёрдый сплав, жаростойкость, износостойкость, эффективность, оптимальное время, упрочнение, микротвердость.

Key words: electric spark alloying, the surface layer, hard alloy, heat resistance, durability, efficiency, optimum time, hardening, micro-hardness.

УДК 621.793

Введение

В машиностроении, металлообработке, горном деле на железнодорожном транспорте и других отраслях народного хозяйства вольфрамсодержащие твёрдые сплавы (ВТС) получили распространение в качестве штамповой оснастки, режущего инструмента, пар трения, подшипников скольжения, буровых коронок, и ряда других деталей. Однако при эксплуатации ВТС при температуре более 740 – 800 °С наблюдается снижение их работоспособности в связи с уменьшением их жаростойкости, твердости, износостойкости [1]. Попытки решения этой проблемы сводились к двум основным направлениям: созданию новых твердых сплавов, в том числе и безвольфрамовых, за счет изменения состава, а также созданию на поверхности ВТС защитных упрочняющих покрытий. Новые твердые сплавы на основе ТіС имеют высокую твердость, сравнительно высокую жаростойкость, но и высокую хрупкость. В связи с этим ВТС во многих случаях является безальтернативным материалом.

В настоящее время более 80 % режущего инструмента из ВТС выпускается с жаростойкими покрытиями (толщиной ≤7 мкм), наносимыми методами газофазного осаждения. Защитные и упрочняющие покрытия используются для повышения работоспособности ВТС, однако, как показали исследования, они оправданы только при серийном производстве вследствие высокой ресурсоемкости используемых установок для нанесения покрытий. Альтернативой таким методам может служить метод нанесения защитных и упрочняющих покрытий – электроискровое легирование (ЭИЛ). Этот метод обладает рядом преимуществ, в том числе возможностью переноса на обрабатываемую поверхность любых токопроводящих материалов, в том числе тугоплавких соединений (карбидов, боридов, нитридов, силицидов) [2]. Однако метод ЭИЛ, как и все другие методы, имеет ряд недостатков, в том числе и низкую толщину покрытия (≥10 мкм), что ограничивает образование зоны взаимной кристаллизации на упрочняемой поверхности.

Известны работы авторов [3; 4; 5], которые предлагали различные варианты повышения жаростойкости и износостойкости методом ЭИЛ за счет выбора режимов и электродных материалов. Однако исследования формирования защитного слоя на ВТС (металлами, вольфрамсодержащими твердыми сплавами и композиционными материалами) с целью повышения их толщины слоя, жаростойкости и износостойкости являются малоизученными. На основе вышесказанного, целью работы является исследование и установление закономерностей формирования легированного слоя при упрочнении вольфрамсодержащих твердых сплавов и получение жаростойких и износостойких покрытий. В связи с этим представляет интерес упрочнение поверхности ВТС методом ЭИЛ электродами, материал которых способен образовывать на упрочняемой поверхности жаростойкие и износостойкие покрытия.

В основу работы включены результаты, полученные в ходе НИР УМНИК № 7887ГУ/2015: «Разработка и исследование защитных покрытий режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов для повышения их работоспособности применительно к промышленности Дальневосточного региона» (2015 – 2017 гг.).

Методы, материалы и оборудование

Для исследований в качестве упрочняемых материалов использованы отечественные промышленные образцы ВТС двух групп: ВК (ВКЗ, ВК8, ВК15), ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4). Выбранные марки твёрдых сплавов отражали в значительной мере состав и свойства наиболее применяемых марок для режущего инструмента, содержащих только карбиды вольфрама (WC) либо карбиды титано-вольфрама (WC-TiC).

В качестве электродов, способных образовывать жаростойкие и износостойкие покрытия, предлагаются сплавы, основные легирующие элементы которых (Zr, Ti, Co) [3]. Предполагается, что перечисленные металлы способны к образованию неограниченных твёрдых растворов с упрочняемым материалом. В связи с этим для упрочнения выбраны следующие электродные материалы:



Ng [[-1 (30)

- электрод из сплава ZrSiO₄, полученный в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» ДВГУПС, синтезированный из минерального сырья Алгаминского месторождения на основе ZrSiO₄;
- вольфрамсодержащий твердосплавный электрод TT10K8 (основу сплава составляет TiC, TaC, WC) и вольфрамсодержащий специальный электрод BK15*, спеченный при температуре 1100 °C в Институте Химии ДВО РАН, имеющий фазовый состав Co₃W₃C; Co₃W₆C; WC;
- электрод из стали 45, используемый для получения защитной оксидной пленки, повышающей жаростойкость вольфрамсодержащих твердых сплавов.

Для упрочнения поверхности ВТС и исследования массопереноса в процессе электроискрового легирования использовали установку Корона 1101 с режимом работы Icp. = 0,7 A; Ucp. = 40 B; $t_{\rm UMII} = 12 \cdot 10^{-5}$; $\gamma^{\rm cp}_{\rm UMII}/c = 50$; W = 10,08 Дж/мин.

Исследования микроструктуры проводились на растровом электронном микроскопе HITACHI S3400n и оптическом микроскопе NIKON MA200. Исследования микротвердости образцов проводились методом индентирования микротвердомером SHIMADZUHMV-2T ГОСТ 2999-75. Исследования образцов по температурному окислению выполняли на дериватографе Q-1000 в соответствии с ГОСТ 6130-71 и ГОСТ 21910-76. Изменение массы упрочняемых ВТС определялось гравиметрическим методом при пятикратном измерении с использованием прецизионных весов exellece XS Mettler Tolledo и стандартных весов «ВЛР-200» класса 2 с точностью 5 мкг, ГОСТ 24104-88. Износостойкость образцов определялась по удельному износу упрочненных твердых сплавов относительно неупрочненных образцов по схеме диск – колодка. Контртело представляет собой диск диаметром 53 мм толщиной 5 мм из стали марки 60 микротвердостью 42 HRC. Образец (колодка) представляет собой прямоугольный брусок, подставленный к контртелу таким образом, чтобы боковая поверхность диска (контртела) соприкасалась с ним без зазора.

Для выявления закономерностей формирования поверхностного слоя исследовали кинетику массопереноса гравиметрическим методом. При этом удельную эрозию электрода Δa и удельный привес катода Δk оценивали взвешиванием образцов до и после ЭИЛ. Учёт массы образцов производился в период от 10 до 30 с в зависимости от определения оптимального времени упрочнения. Суммарное время легирования поверхности, отнесённое к 1 см², варьировалось в зависимости от достигаемых параметров от 7 до 9 мин [6]. Значения массы электродов после ЭИЛ определяли как среднеарифметическую величину Δm после 5-кратных измерений.

Для оценки эффективности процесса ЭИЛ использовали критерий γ_{Φ} , учитывающий как критерий формирования ЛС ($\gamma_{\text{ЛС}}$), так и коэффициент эффективности свойств ЛС (γ_{CB}). Коэффициент γ_{CB} может быть оценен как отношение величин, характеризующих те или иные физико-химические и эксплуатационные свойства ($C_{\text{ВЛС}}$) поверхностного слоя, к аналогичным величинам свойств ВТС в качестве основы ($C_{\text{ВO}}$) без покрытия, которые могут быть представлены величинами, характеризующими свойства твёрдости, жаростойкости, износостойкости и так далее, либо величиной одного из них. Таким образом, для более полной оценки эффективности ЭИЛ следует учитывать коэффициент повышения эксплуатационных свойств (γ_{CB}): $\gamma_{\text{CB}} = C_{\text{ВЛС}}/C_{\text{BO}}$. Тогда эффективность процесса ЭИЛ может быть представлена формулой функционального критерия [7]

$$\gamma_{\Phi} = \gamma_{\text{JC}} \times \gamma_{\text{CB}}$$
.

При этом значение основы всегда соответствует 100 %, а коэффициент эффективности может быть больше или меньше этого значения.

В связи с вышесказанным предметом исследования в данной работе являлись процессы формирования легированного слоя на ВТС, состав, структура и свойства легированного слоя, физико-химические, механические и эксплуатационные свойства ВТС до упрочнения и после упрочнения, а также сравнение эффективности свойств легированного слоя после упрочнения вольфрам содержащих твердых сплавов методом электроискрового легирования.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлена кинетика процесса формирования измененного поверхностного слоя вольфрамсодержащего твердого сплава ВК8 различными электродами. Видно, что на начальном

этапе формирования легированного слоя (I участок) наблюдаются положительные значения привеса катода Δk , которые наблюдаются в среднем до $t=120~\text{c/cm}^2$, а далее происходит периодическое разрушение легированного слоя, при этом на втором участке кинетической кривой $\Delta k - \text{BK8}$, начиная с $t > 210~\text{c/cm}^2$ (см. рис. 1, a), он принимает отрицательные значения. Такой характер формирования измененного поверхностного слоя связан с образованием на поверхности электрода «вторичной» структуры за счет переноса материала электрода на катод и от взаимодействия с межэлектродной средой, в частности с кислородом O_2 , связанной с образованием оксидов и нитридов в легированном слое [8].

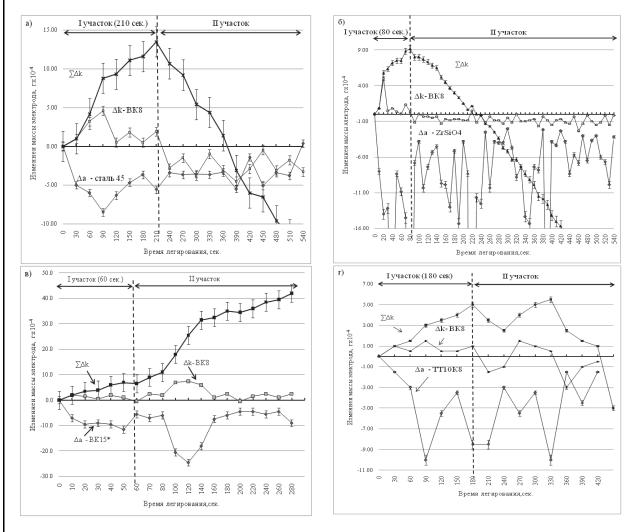


Рис. 1. Кинетика формирования легированного слоя на ВК8 различными электродами

Показано, что при достижении времени окончания первого участка формирования легированного слоя (в среднем 120 с/cm^2), когда заканчивается образование «вторичной» структуры на поверхности электрода, происходит разрушение этой вторичной структуры под влиянием накопившихся внутренних напряжений. Разрушение поверхности электрода за счет воздействия импульсных, тепловых и механических нагрузок от действий искровых разрядов влияет на периодическое разрушение легированного слоя и образование дефектов на его поверхности. Ранее было показано [1], что такой переход из одного участка в другой был обозначен как время хрупкого разрушения ЛС (t_x). В нашем случае мы обозначили как участки формирования «вторичных» структур (I участок), так и участок ЭИЛ, сформированный «вторичными структурами» (II участок).

На примере исследования формирования легированного слоя на твердом сплаве ВК8 при упрочнении электродом из стали 45 показано, что количество дефектов на поверхности увеличивается прямо пропорционально увеличению времени электроискрового легирования. На приве-



Ng II-1 (30) 2017

денных графиках (см. рис. 1) наблюдаются низкие значения массопереноса Δk — BK8. Это объясняется образованием с углеродом карбидных соединений, которые обладают высокой хрупкостью, что способствует снижению эрозионной стойкости измененного поверхностного слоя и приводит к его периодическому разрушению под воздействием импульсных и механических нагрузок. В связи с этим наблюдается незначительный массоперенос на первом участке и разрушение поверхностного слоя на втором участке. Однако суммарный массоперенос ($\sum \Delta k$) имеет положительный характер, что свидетельствует о постоянном формировании легированного слоя. На рис. 2 приведены результаты исследований макроструктуры легированного слоя.

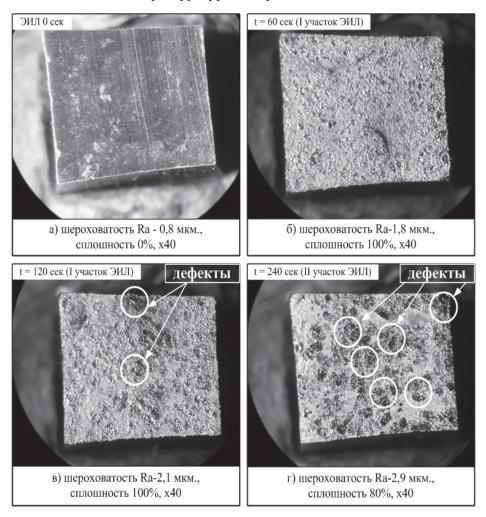
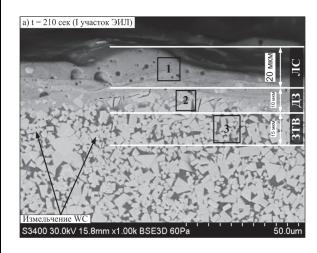


Рис. 2. Формирование защитного слоя на ВК8 методом ЭИЛ сталью 45 к площади 1 см²: а – исходная поверхность; б – упрочненный ЛС через t = 60 с (дефекты отсутствуют); в – упрочненный ЛС через t = 120 с (наличие незначительного количества дефектов); г – упрочненный ЛС через t = 240 с (наличие значительного количества дефектов)

Как видно из рис. 2, с увеличением времени легирования возрастает количество дефектов, заключающихся в изменении физико-механических свойств под действием температуры в зоне искрового разряда. Данные дефекты снижают эффективность формирования слоя и ухудшают сплошность покрытия. При этом установлено, что в течение первого участка кинетической кривой Δk – BK8 (см. рис. 1, a) формируется легированный слой со сплошной поверхностью, в которой отсутствуют дефекты. На приведенных макроструктурах (см. рис. 2, a, a) наблюдаются дефекты в виде кратеров, ухудшающих физико-химические свойства поверхностного слоя (сплошность, шероховатость, жаростойкость), что снижает эффективность формирования легированного слоя. Процесс образования кратеров объясняется свойствами материала электрода, изготовленного из

стали 45, который имеет более низкую температуру плавления, чем твердый сплав, и быстрее расплавляется при локальном воздействии электрического тока. Температура искрового разряда достигает 20 000 °C, что способствует быстрому образованию поверхностной структуры и ее последующему разрушению.

Далее проводилось исследование микроструктуры легированного слоя (см. рис. 3). Показана структура поперечного шлифа и поверхности вольфрамсодержащего твердого сплава ВК8 после электроискрового легирования электродом из стали 45.



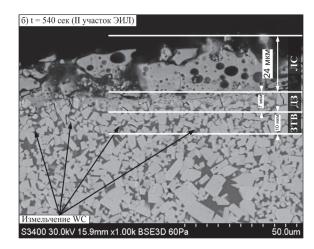


Рис. 3. Микроструктура поперечного шлифа легированного слоя ×1000: а – упрочненный слой, сформированный за 210 с; б – упрочненный слой, сформированный за 540 с; 3ТВ – зона термического влияния; ДЗ – диффузионная зона; ЛС – легированный слой

На рис. 3 показано, что слой, нанесенный электродом сталь 45, имеет пористую структуру. Установлено, что при использовании стальных электродов слой преимущественно формируется на электроде с большим содержанием углерода, что объясняется уменьшением температуры плавления. Как видно из рис. 3, a, δ , в ЗТВ наблюдается измельчение зерен карбидов вольфрама (WC) вследствие воздействия импульсных нагрузок искрового разряда. Также в легированном слое образуются поры, что обусловлено выделением газа CO_2 , их количество и размер существенно уменьшаются по мере приближения к поверхности упрочняемого материала.

Кроме того, в целях выявления перехода легирующих элементов в поверхностный слой проведен химический анализ измененного поверхностного слоя в участках 1, 2, 3 рис. 3, a. Результаты химического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1 Химический состав измененного поверхностного слоя на ВК8 после ЭИЛ сталью 45

	Химический элемент	Участок 1 (ЛС), %	Участок 2 (ДЗ), %	Участок 3 (3TB), %
	C	20,85	11,24	13,18
	O	21,89	14,23	4,58
	Fe	11,91	13,42	0,86
	Co	3,00	4,22	3,70
П	W	40,21	53,04	75,35

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что материал электрода (сталь 45) переходит в основу, тем самым образуя измененный поверхностный слой. В целях определения фазового состава проводился рентгеноструктурный анализ легированного слоя, полученного при упрочнении твердого сплава (ВК8) электродом сталь 45. Данные рентгеноструктурного анализа показали наличие в легированном слое карбида железа (Fe₃C), который способствует повышению физико-химических



Ng II-1 (30) 2017

и механических свойств упрочняемого материала на первом участке кинетической кривой Δk – BK8 (см. рис. 1, a). В то же время Fe₃C способствует разрушению легированного слоя при дальнейшем упрочнении твердого сплава BK8 (более 210 c), что соответствует второму участку кинетической кривой Δk – BK8 (см. рис. 1, a).

Для оценки жаростойкости легированного слоя проводили нагрев упрочненного твердого сплава (ВК8) до температуры 1000 °С в целях определения наростообразования. Установлено, что на легированном слое, соответствующем первому участку кинетической кривой Δk – ВК8, дефекты в виде наростов не обнаружены (см. рис. 4, a). Однако на месте образования кратеров (дефектов легированного слоя), появившихся в процессе упрочнения на втором участке кинетической кривой, в результате нагрева наблюдаются наросты в виде отслоения поверхности твердого сплава (ВК8) (см. рис. 4, δ).

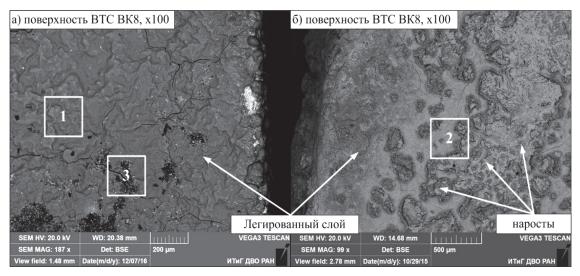


Рис. 4. Макроструктура легированного слоя после нагрева до 1000 °C: а – легированный слой, сформированный за 210 с:

б – легированный слой, сформированный за 540 с

Данные наросты образуются вследствие активного взаимодействия кислорода (O) с вольфрамом (W) и кобальтом (Co). В результате проведения термогравиметрического анализа на поверхности упрочненного твердого сплава (первый участок кинетической кривой на рис. 4, a) обнаружены элементы, соединения которых с кислородом образуют наиболее вероятные оксиды — FeO / Fe₂O, способствующие сдерживанию образования нароста на поверхности твердого сплава, что подтверждается химическим анализом этой поверхности (см. табл. 2). Однако на поверхности упрочненного твердого сплава (второй участок кинетической кривой на рис. 4, δ) на местах дефектов легированного слоя после нагрева до 1000 °C образовались наросты.

Таблица 2 Химический состав поверхности легированного слоя после нагрева до 1000 °C

Химический	Участок 1, %	Участок 2, %	Участок 3, %	Предполагаемый
элемент	(см. рис. 4, а)	(см. рис. 4, б)	(см. рис. 4, а)	оксид
С	5,14	3,12	6,73	_
0	30,44	25,69	22,70	_
Fe	61,95	13,28	18,85	FeO
Со	_	7,02	1,27	СоО
W	1,70	51,25	49,55	WO_3

Предположительный состав образованных наростов — это оксиды в виде соединений WO_3 и $CoWo_4$. В некоторых местах (участок 3 на рис. 4, a) защитное покрытие растрескалось, и на его поверхности начали образовываться оксиды — это подтверждается химическим анализом этого участка (см. табл. 2). Для устранения этого недостатка и создания жаростойкого и износостойкого защитных покрытий на твердых сплавах целесообразно использовать комбинацию электродов, содержащих железо и титан.

В результате исследований состава и структуры установлено, что наиболее высокими показателями обладает легированный слой, полученный в течение первого участка кинетической кривой (до 240 с) на твердых сплавах после упрочнения электродом из стали 45. Поэтому изучение физико-химических и эксплуатационных свойств выполняли только для данного участка кинетической кривой. При этом исследовалась жаростойкость и микротвердость измененного поверхностного слоя. Аналогичные результаты получены при исследовании других твердых сплавов (ВК3, ВК15, Т5К10, Т15К6 и Т30К4).

На рис. 5 показана эффективность повышения жаростойкости ВТС при упрочнении методом ЭИЛ электродами ВТС ВК15*, ВТС ТТ10К8, сплавом сталь 45 и сплавом ZrSiO₄.

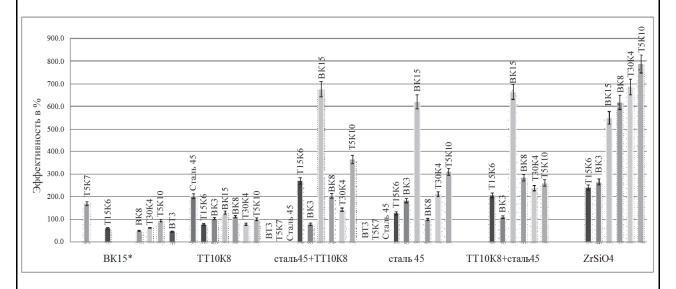


Рис. 5. Эффективность жаростойкости упрочненных ВТС при нагреве до 1000 °C

Установлено, что при упрочнении твердых сплавов электродом (сталь 45) жаростойкость повышается в шесть раз у ВК15 и в три раза у Т5К10. При упрочнении специальным электродом ВК15* жаростойкость всех исследуемых ВТС снизилась от 5 до 52 %. При этом после нагрева до 1000 °C наблюдается отслаивание у твердого сплава Т30К4 по ребрам, у твердого сплава Т15К6 образование пористой окалины, наблюдаются отслаивания на ребрах и в местах прижогов во время ЭИЛ. Защитный слой, сформированный электродом ТТ10К8, повысил жаростойкость незначительно, например у материала ВК15 на 20 %, при этом у некоторых ВТС она снизилась на 22 %. Установлено, что при упрочнении методом ЭИЛ в поверхностном слое ВТС образуются карбиды металлов, повышающие жаростойкость и износостойкость. В случае легирования цирконсодержащим электродом ZrSiO₄ образуются карбиды циркония, превосходящие по своим физикохимическим и эксплуатационным свойствам (по Г. В. Самсонову) карбиды титана, тантала и вольфрама. При упрочнении ВТС, содержащем сплав циркония, жаростойкость твердых сплавов повышается почти в восемь раз у Т5К10 и почти в шесть с половиной раз у ВК8 и Т30К4, что заметно выше, чем при упрочнении электродом сталь 45. На основе полученных данных о повышении эффективности жаростойкости легированного слоя выбранными электродами определены упрочняемые ВТС.



Ученые записки комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

Ng II-1 (30) 2017

На рис. 6 показано повышение эффективности микротвердости легированного слоя на выбранных вольфрамсодержащих твердых сплавах при упрочнении методом электроискрового легирования.

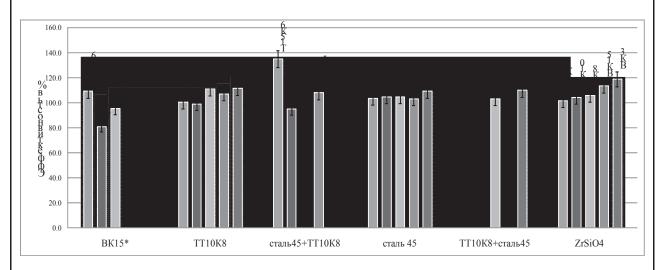


Рис. 6. Эффективность микротвердости легированного слоя упрочненных ВТС

Из приведенного рисунка видно, что микротвердость при упрочнении электродом сталь 45 у ВК15 повышается на 3 %, а у сплава ВК3 — на 9 %. При упрочнении ВТС электродом ZrSiO₄ микротвердость повысилась в среднем на 8 % у всех твердых сплавов, а при упрочнении электродом TT10K8 микротвердость упрочняемых ВТС повысилась в среднем на 6 %. Проведенные исследования износостойкости полученных покрытий показали повышение износостойкости ВТС T15K6 в два раза при упрочнении электродом ZrSiO₄, а при упрочнении электродом TT10K8 в шесть раз. Значения износостойкости объясняются образованием неограниченных твердых растворов в случае TT10K8 и повышением микротвердости ВТС от легированного слоя к основе.

Учитывая вышесказанное, оптимальное время упрочнения следующими электродами составляет: 210 с для материала из стали 45; 80 с для материала из сплава $ZrSiO_4$; 280 с для разупрочненного BTC BK15* и 180 с для BTC TT10K8. После указанного времени рекомендуется зачищать используемый электрод от образовавшейся вторичной структуры.

Однако толщина легированного слоя, показатели эффективности физико-химических и механических свойств и его высокая эрозия указывают на необходимость комбинирования при электроискровом легировании электродов и методов поверхностного упрочнения. Упрочнение ВТС групп ВК и ТК одноименными твердыми сплавами рекомендуется проводить не более 120 с, так как дальнейшее упрочнение может привести к разрушению слоя и эрозии основы.

Выволы

Определены два этапа формирования легированного слоя, позволяющие установить оптимальное время электроискрового легирования вольфрамсодержащих твердых сплавов, при котором будут наблюдаться положительные значения массопереноса.

Показано, что при электроискровом легировании на втором участке кинетической кривой, то есть при превышении оптимального времени упрочнения, повышается шероховатость легированного слоя, ухудшается его сплошность, снижаются эффективность формирования и эффективность его свойств.

При упрочнении ВТС установлено влияние состава упрочняемого материала, а также впервые установлено влияние состава и структуры упрочняющего электрода на формирование легированного слоя, его сплошность и физико-химические, механические и эксплуатационные свойства. Так показано, что при использовании разупрочненного электрода ВК15* в течение всего периода упрочнения повышается массоперенос, при использовании электрода из сплава ZrSiO₄ наблюдается

малый массоперенос и сильная эрозия электрода, однако при этом повышается эффективность свойств легированного слоя.

Для повышения эффективности формирования легированного слоя и его толщины представляет интерес создание многослойных покрытий, например двумя электродами — сталью 45 и вольфрамсодержащим титано-танталовым твердым сплавом TT10К8, позволяющих повысить жаростойкость и износостойкость упрочняемого материала.

Коллектив авторов выражает благодарность Л. А. Коневцову, Е. С. Панину, О. В. Башкову за оказанную помощь в проведении исследований полученных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Повышение жаростойкости твердых сплавов при электроискровом легировании алюминием и титаном [текст] / А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, Л. А. Коневцов, Я. А. Востриков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2015. № IV-1(24). С. 69-73. DOI журнала: 10.17084/uzknastu.
- 2. Самсонов, Г. В. Эрозионная стойкость металлов анода при ЭИЛ тех же металлов / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров // Электронная обработка материалов. -1973. -№ 6. С. 37-38.
- 3. Химухин, С. Н. Разработка научных основ формирования измененного слоя на металлах и сплавах с заданными свойствами при низковольтной электроискровой обработке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. Н. Химухин. Комсомольск-на-Амуре, 2009. 40 с.
- Зависимость эрозии анода от состояния упрочняемой поверхности при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 6. – С. 29-31.
- 5. Верхотуров, А. Д. Научные основы формирования легированного слоя и создания электродных материалов при электроискровом легировании: дис. ... д-ра техн. наук / Верхотуров Анатолий Демьянович. Киев, 1984. 532 с.
- 6. 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.
- 7. Самсонов, Г. В. Влияние межэлектродной среды на эрозию материала анода при электроискровом легировании / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров // Электронная обработка материалов. 1974. № 1. С. 33-35.