

ISSN 0132-4535



ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



3(47), 2006

Санкт-Петербург

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ПРОМЕТЕЙ»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«ОБЩЕСТВО МАТЕРИАЛОВЕДОВ»

ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
№ 3 (47)

2006

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **И. В. ГОРЫНИН**
академик РАН

Зам. главного редактора **В. В. РЫБИН**
член-корреспондент РАН

Члены редакционной коллегии

А. А. АБРАМОВ
О. А. БАННЫХ
В. Е. БАХАРЕВА
Л. В. ГРИЩЕНКО
Е. Л. ГЮЛИХАНДАНОВ
Л. И. ЕМЕЛЬЯНОВА
Э. П. ЗАРУБИН (отв. секретарь)
К. В. КАЛУГИНА
Г. П. КАРЗОВ
Ю. Л. ЛЕГОСТАЕВ
В. Н. МАЛЫШЕВ
В. А. МАЛЫШЕВСКИЙ
Б. З. МАРГОЛИН
Г. И. НИКОЛАЕВ
В. Д. ПИРОГОВ
Ф. Г. РУТБЕРГ
С. С. УШКОВ

Адрес редакции:
Россия, 191015, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 49
Центральный научно-исследовательский инсти-
тут конструкционных материалов «Прометей»
Факс: (812) 710-3756
Телекс: 322147 ALFA RU
Телефон: (812) 274-1108
E-mail: vvv@prometey2.spb.su
Internet site: <http://www.prometey.nw.ru>

Журнал издается с сентября 1995 г.
Зарегистрирован в Министерстве Российской
Федерации по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций. Сви-
детельство о регистрации ПИ № 77-13228 от
22 июля 2002 г.

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 020644 от 13 октября 1997 г.

**Журнал «Вопросы материаловедения»
входит в перечень периодических
изданий, рекомендуемых ВАК РФ для
публикации трудов соискателей ученых
степеней.**

Перепечатка материалов из журнала возможна
при письменном согласовании с редакцией, при
этом ссылка на журнал обязательна.

© ЦНИИ КМ «Прометей», 2006

THE EDITORIAL BOARD

Editor-
in-Chief **I. V. GORYNIN**
Academician of the RAS

Associate
Editor **V. V. RYBIN**
Associate Member of the RAS

Members of the Editorial Board

A. A. ABRAMOV
O. A. BANNYKH
V. Ye. BAKHAREVA
L. V. GRISHCHENCO
Ye. L. GULIKHANDANOV
L. I. YEMELYANOVA
E. P. ZARUBIN (Exec. Secretary)
K. V. KALUGINA
G. P. KARZOV
Yu. L. LEGOSTAEV
V. N. MALYSHEV
V. A. MALYSHEVSKY
B. Z. MARGOLIN
G. I. NIKOLAEV
V. D. PIROGOV
F. G. RUTBERG
S. S. USHKOV

Address of the Editorial Office:
The Central Research Institute
of Structural Materials «Prometey»,
49 Shpalernaja Street,
St. Petersburg, 191015, Russia
Fax: (812) 710-3756
Telex: 322147 ALFA RU
Fone: (812) 274-1108
E-mail: vvv@prometey2.spb.su
Internet site: <http://www.prometey.nw.ru>

The Journal has been published since Septem-
ber 1995. The Journal is registered in the
Russian Federation Ministry of Press, Televi-
sion and Broadcasting and Mass Communica-
tions. Registration certificate ПИ N 77-13228
of 22 July 2002.

Licence of publication
ЛР N 020644 13 October 1997.

**The «Problems of Materials Science» jour-
nal is included into the list of periodicals
approved by Hi. Cert. Comm. RF for publi-
cating works of competitors for academic
degrees.**

Any materials may be reprinted from the journal on
condition that written agreement is available with
editorship, a reference to the journal is mandatory.

© CRISM «Prometey», 2006

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

<i>Титовец Ю. Ф., Золоторевский Н. Ю., Самойлов А. Н., Hribernig G., Pichler A.</i> Исследование влияния хрома на микроструктуру и кинетику бейнитного превращения в низколегированных сталях.....	5
<i>Титовец Ю. Ф., Золоторевский Н. Ю., Самойлов А. Н., Hribernig G., Pichler A.</i> Моделирование бейнитного превращения в низколегированных сталях.....	13
<i>Мальцев И. М., Гаврилов Г. Н., Климашев Ю. А., Мазульников И. В., Ошурина Л. А.</i> Обработка инструментальных сталей токами высокой плотности при нагреве под термическую обработку.....	22
<i>Бровер А. В., Бровер Г. И., Дьяченко Л. Д.</i> Особенности проявления структурной наследственности в процессе скоростной лазерной обработки сталей.....	31

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Соколов Г. Н., Зорин И. В., Лысак В. И., Арисова В. Н.</i> Влияние режима электрошлаковой наплавки на термокинетические процессы получения легированного сплава на основе алюминида γ -Ni ₃ Al.....	41
<i>Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А., Гордиенко П. С., Панин Е. С., Метлицкая Л. П.</i> Исследование поверхностных слоев вольфрамсодержащих твердых сплавов при электроискровом легировании алюминием.....	52
<i>Куимов С. Д., Малафеев А. С., Бычков Н. А., Ростовицков В. А.</i> Многослойные осесимметричные полуфабрикаты и изделия из композиционных материалов.....	63
<i>Кулик В. И., Борковских В. А., Борковских Н. Н., Савин В. В.</i> Структурные и физико-механические характеристики уплотненных пироуглеродом углерод-углеродных композиционных материалов на основе тканевых наполнителей.....	70

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

<i>Марголин Б. З., Минкин А. И., Костылев В. И., Пиминов В. А.</i> Инженерный метод оценки вязкого подроста трещины при неизотермическом термосиловом нагружении.....	78
<i>Минкин А. И., Марголин Б. З., Костылев В. И., Смирнов В. И.</i> Прогнозирование консервативных J_R -кривых для материала антикоррозионной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР с учетом влияния нейтронного облучения.....	91
<i>Демидов А. В., Макаров А. Г., Сталевич А. М.</i> Вариант математического моделирования деформационных процессов полимерных материалов.....	101

ХРОНИКА

Итоги научно-практической конференции по результатам работы по важнейшему инновационному проекту государственного значения «Создание технологий и освоение промышленного производства конструкционных металлических материалов с двукратным повышением важнейших эксплуатационных свойств» (проект «Металл»).....	111
9-я международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС».....	117
Памяти Юлия Семеновича Золоторевского.....	120
Рефераты публикуемых статей.....	122

CONTENTS

METALS SCIENCE. METALLURGY

<i>Titovets Yu. F., Zolotarevskiy N. Yu., Samoilov A. N., Hribernig G., Pichler A.</i> Study of the influence of chromium on microstructure and kinetics of bainite transformation in the low-alloy steels	5
<i>Titovets Yu. F., Zolotarevskiy N. Yu., Samoilov A. N., Hribernig G., Pichler A.</i> Simulation of bainite transformation in the low-alloy steels	13
<i>Maltsev I. M., Gavrilov G. N., Klimashev Yu. A., Mazul'nikov I. V., Oshurina L. A.</i> Working of tool steels by currents of high density during their heating for heat working	22
<i>Brover A. V., Brover G. I., Dyatchenko L. D.</i> Features of display of a structural heredity during high-speed laser processing of steels	31

FUNCTIONAL MATERIALS

<i>Sokolov G. N., Zorin I. V., Lysak V. I., Arisova V. N.</i> Effect of the mode of the electrosag surfacing on thermal and kinetic processes of reception alloyed aluminide γ -Ni ₃ Al	41
<i>Verhoturov A. D., Konevtsov L. A., Gordienko P. S., Panin E. S., Metlitskaia L. P.</i> Research of superficial layers tungsten-containing of layers firm-alloys after of electrosag alloying by aluminium	52
<i>Kuimov S. D., Malafeyev A. S., Bytchkov N. A., Rostovshchikov V. A.</i> Multilayer axisymmetrical semifinished products and articles made of composite materials	63
<i>Kulik V. I., Borkovskih V. A., Borkovskih N. N., Savin V. V.</i> Structural and mechanical properties of carbon-carbon composites with fabric reinforcement produced by the pyrocarbon densification	70

STRUCTURAL-WORKING STRENGTH AND SERVICEABILITY OF MATERIALS

<i>Margolin B. Z., Minkin A. I., Kostylev V. I., Piminov V. A.</i> Engineering method of evaluating the viscous increase of crack under nonisothermic thermoloading	78
<i>Minkin A. I., Margolin B. Z., Kostylev V. I., Smirnov V. I.</i> Prognostication of conservative J_R -curves for the material of the anticorrosive cladding of WWER reactor vessels taking into account influence of neutron irradiation	91
<i>Demidov A. B., Makarov A. G., Stalevich A. M.</i> Version of mathematical modelling of deformation processes of polymer stuffs	101

NEW ITEM

The sums of practical-scientific conference on the results of work on the most important innovation project having all-state significance: «Creation of Technologies and the Mastery of the Industrial Production of Structural Metallic Materials with Two-fold Increase in the Most Important Performance Properties» (the project «Metal»)	111
9-th International Conference «Problems of Materials Science in Design, Manufacturing and Operation of Equipment of NPS»	117
Memory of Mr. Yuly S. Zolotarevskiy	120
Abstracts of published articles	122

УДК 621.785.048.4:669.15'27-194

А. Д. ВЕРХОТУРОВ*, д-р техн. наук, Л. А. КОНЕВЦОВ*,
П. С. ГОРДИЕНКО**, д-р техн. наук, Е. С. ПАНИН**, канд. хим. наук,
Л. П. МЕТЛИЦКАЯ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕМ

Показана возможность использования метода электроискрового легирования твердых сплавов на примере легирования их алюминием как альтернативного трудоемким технологиям химического и физического осаждения.

Введение

Известно, что для изготовления режущего инструмента при механической обработке сталей и других материалов используются преимущественно твердые сплавы на основе карбида вольфрама [1, 2]. Однако с целью повышения производительности и точности обработки материалов существует

*Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН.

**Институт химии Дальневосточного отделения РАН, Владивосток.

необходимость постоянного увеличения износостойкости режущего инструмента. Известно также, что в процессе резания (прерывистого, с ударной нагрузкой, при обработке специальных сталей и сплавов и т. д.) работоспособность таких инструментальных материалов значительно снижается. Для повышения износостойкости режущего инструмента в промышленности используют различные методы упрочнения исполнительных поверхностей, в том числе и нанесение покрытий из различных тугоплавких материалов (TiC, TiN, TiMo-N, TiCr-N и др.), превосходящих по твердости карбид вольфрама. Кроме того, используют соединения алюминия, в частности TiAl, Al₂O₃, α-Al₂O₃, Al₂SiO₅, TiCN-AlN. Применение в качестве покрытий материалов второй группы обусловлено необходимостью получения на исполнительной поверхности воздействия инструмента соединений алюминия, обладающих наименьшей схватываемостью с обрабатываемой сталью при резании [3]. Кроме того, соединения алюминия защищают поверхность контакта режущего инструмента от химического износа [4]. Упрочнение зерен основы окислами алюминия (термодинамически стабильное соединение) снижает процессы ползучести и пластической деформации на площадках контакта и предотвращает образование легкоплавких вторичных структур в процессе схода стружки. Для отвода тепла от режущей кромки при резании необходимо создать слой из материала, обладающего высокой теплопроводностью. Для этих целей можно использовать алюминий в качестве одного из каналов для сброса тепла.

В мировой практике упрочнение исполнительной поверхности воздействия режущего инструмента достигается, как правило, методами химического и физического осаждения покрытий. Объем выпуска зарубежными фирмами пластин с износостойким покрытием составляет около 80% объема выпуска инструмента из твердых сплавов [5]. Однако для использования таких технологий требуются сложное оборудование, существенные экономические вложения, квалифицированные рабочие. В России значительная часть режущего инструмента выпускается без покрытий.

В связи с этим представляет интерес использование альтернативных методов поверхностного легирования, в частности электроискрового легирования, обеспечивающего значительное уменьшение затрат и обладающего существенными технологическими возможностями. При электроискровом легировании алюминием твердых сплавов в воздушной среде происходит образование продуктов эрозии как в жидком, так и в газообразном состоянии с вероятным синтезом в поверхностном слое катода Al₂O₃, AlN, что может повысить работоспособность электроискрового легирования. Применение электроискрового легирования твердых сплавов алюминием представляет значительный научный и практический интерес [6, 7].

Цель настоящей работы — исследование поверхностных слоев, полученных электроискровым легированием твердых сплавов алюминием, с целью повышения эффективности режущего инструмента.

Методика и материалы

В качестве материала для катода использовали вольфрамсодержащие твердые сплавы марок BK8, TT7K7, T5K10, T15K6 (и другие) в виде многогранных (трех-, четырех-, пятигранных) быстросменных пластин промышленных образцов для токарных резцов с механическим креплением (ГОСТ 21151). Выбранные твердые сплавы по химическому составу и

свойствам соответствовали наиболее часто применяемым для режущего инструмента сплавам с содержанием карбидов WC либо WC-TiC, WC-TiC-TaC. В качестве анода был выбран технически чистый алюминий марки АД-1.

Массоперенос материала электродов анод/катод (при электроискровом легировании твердых сплавов алюминием) исследовали на установке «ЭЛФА-541». Наилучшая сплошность покрытия обеспечивалась на следующих режимах: $n = 700-850$ об/мин, $v = 20-40$ мм/мин, $s = 0,5-0,9$ мм, $I = 1,6-4,8$ А, зажигающее напряжение $U = 90$ В, частота импульсов $\gamma = 3-4$ кГц, продолжительность импульсов 8-12 мкс, интервалы между импульсами 32-48 мкс, емкость разрядного конденсатора 0,68 мкФ.

Исследование микроструктуры материала анода, продуктов эрозии, распределения легирующих элементов в поверхностном слое катода проводились металлографическим методом с использованием оптических микроскопов «МИМ-10», «БИОЛАМ-М», «МБС-9», «Axiosplan-2» (Carl-Zeiss). Микроструктуру поверхности электродов и распределение элементов исследовали на электронно-зондовом комбинированном микроанализаторе WDS/EDS JXA-8100 (Япония), EDS (Великобритания) во вторичных и отраженных электронах в различных режимах (LDF и MDF) с изменением фокусного расстояния для получения топографии поверхности образцов. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда $1 \cdot 10^{-8}$ А (диаметр пучка 1 мкм).

Одновременное присутствие в образцах углерода и кислорода исключает получение результатов количественного анализа. Полуколичественный анализ осуществлялся программным обеспечением данного прибора по ZAF-коррекции. Для анализируемых элементов W, Co, Al, O, C предел обнаружения не превышает 0,1 масс. %. Исследование топографического и композиционного изображений велось при увеличении от $\times 40$ до $\times 1500$. Так как покрытие было небольшой толщины, для увеличения его поверхности выполняли срез под углом (рис. 1). После полирования на поверхность образца в вакууме наносили тонкий слой углеродной пленки

(для стекания заряда, возникающего на поверхности в результате взаимодействия электронного потока с частицами образца в приборе JXA-8100). Рентгенофазовый анализ был проведен на дифрактометре Д8 ADVANCE (Германия) в монохроматизированном CuK_α излучении при $U = 35$ кВ, $I = 40$ мА.

Механические испытания выполняли на микротвердомере ПМТ-3М, изменение массы образцов определяли гравиметрическим методом с использованием стандартных весов «ВЛР-200» класса 2 (ГОСТ 24104) при пятикратном измерении.

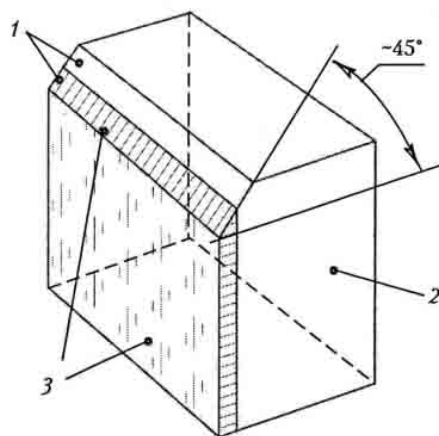


Рис. 1. Схема образца для исследования поверхностных слоев сплава ВК8 с алюминиевым покрытием:

1 — полированная поверхность среза; 2 — сплав ВК8 (основа); 3 — покрытие

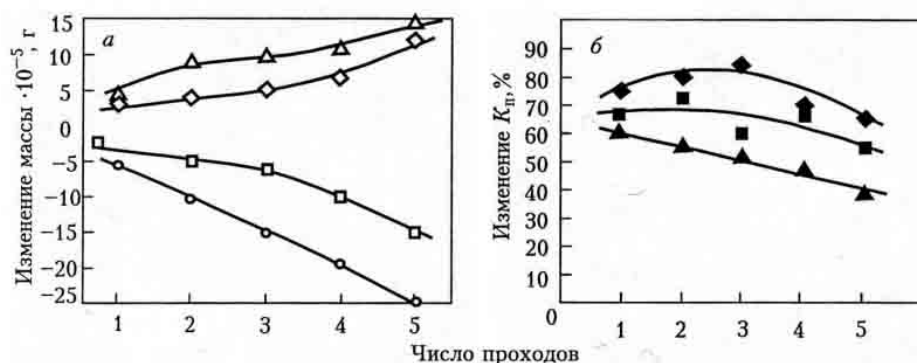


Рис. 2. Изменение массы анода и катода при электроискровом легировании твердых сплавов (а) и коэффициента массопереноса K_n (б) в зависимости от числа проходов i (режим: $n = 800 \text{ мин}^{-1}$, $s = 20 \text{ мм/мин}$, электрод $\varnothing 1,0 \text{ мм}$, частота импульсов $\gamma = 3 \text{ кГц}$, $I = 1,6 \text{ А}$, продолжительность импульсов 8 мкс , интервал между ними 32 мкс):

○, △ – сплав ВК8 (соответственно анод и катод); □, ◇ – сплав Т15К6 (соответственно анод и катод);
 ◆, ■, ▲ – соответственно сплавы ВК8, ТТ7К7, Т15К6

Износостойкость режущего инструмента определяли при обработке прутков из стали 45 диаметром 55–14 мм, длиной 350–250 мм при чистовых режимах резания ($t = 0,2\text{--}0,3 \text{ мм}$, $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $s = 0,07 \text{ мм/об}$) на токарном станке 1К62.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 видно, что при электроискровом легировании алюминием твердых сплавов масса катода непрерывно увеличивается ($\Delta_k > 0$), а масса анода непрерывно уменьшается ($\Delta_a < 0$) — это соответствует благоприятным условиям формирования легированного слоя в связи с отсутствием порога хрупкого разрушения [8]. Проведенные исследования [9] показали, что при электроискровом легировании алюминия (когда алюминий — катод) различными металлами относительно благоприятные условия формирования легированного слоя ($\Delta_k > 0$) наблюдаются при использовании электродов, для которых температура плавления по отношению к основе отвечает условию: $T_a < T_k$ (T_a , T_k — температура плавления анода и катода соответственно). В нашем случае $T_a/T_k \approx 0,23$, что подтверждает благоприятные условия формирования легированного слоя даже при отсутствии взаимной растворимости материала анода и катода и наличие значительного количества в продуктах эрозии твердой фазы.

В этих условиях ($\Delta_k > 0$) при формировании легированного слоя важно определить оптимальное число проходов (i), которое зависит от коэффициента массопереноса K_n [8], шероховатости поверхности покрытия, толщины слоя, его состава, структуры и конечной эксплуатационной характеристики полученного режущего инструмента — размерной стойкости (либо качественных характеристик обработанной поверхности).

Коэффициент массопереноса $K_n = |\Delta k|/|\Delta a| \cdot 100\%$ (увеличение массы катода по отношению к уменьшению массы анода) при электроискровом легировании твердых сплавов алюминием в общем случае уменьшается в зависимости от числа проходов i (рис. 2, б). Наибольшее значение K_n наблюдается в сплавах WC-Co. В сплавах, содержащих двойные или тройные карбиды WC-Ti; WC-TiC-TaC, коэффициент массопереноса меньше, т. е. он уменьшается при повышении хрупких составляющих в сплаве (TiC).

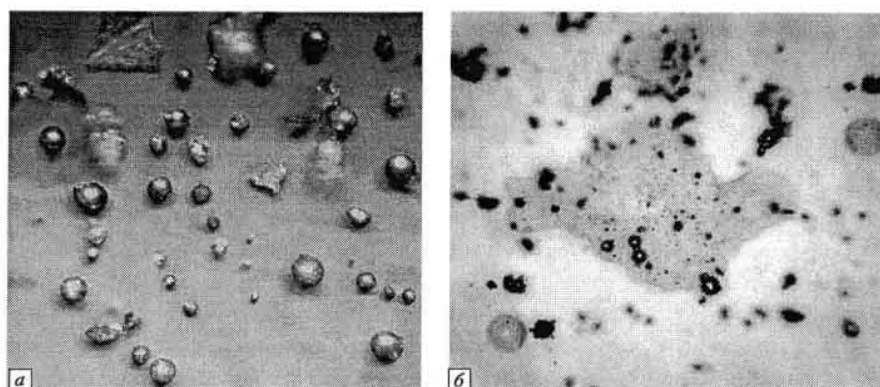


Рис. 3. Микрофотографии продуктов эрозии при электроискровом легировании алюминием:

a – шарообразные частицы. $\times 650$; *б* – отдельные прозрачные частицы (снимок «напросвет»). $\times 600$

При электроискровом легировании твердых сплавов алюминием наблюдается зависимость K_n не только от изменения числа проходов, но и от изменения соотношения WC и Co в сплаве. Во всех случаях легирования алюминием при увеличении числа проходов коэффициент K_n для твердых сплавов снижается при повышении содержания карбида титана. Таким образом, при формировании покрытия из алюминия методом электроискрового легирования наибольшие значения K_n наблюдаются на твердых сплавах с более высоким содержанием WC и Co (сплав ВК8), при этом с увеличением числа проходов до трех он даже повышается до 85%.

На формирование легированного слоя и на коэффициент K_n значительное влияние оказывает состав продуктов эрозии. При $i = 1-5$ наряду с частицами, образовавшимися из жидкой фазы, значительное количество составляют частицы в твердой фазе размером 1–30 мкм, которые состоят в основном из Al, Al_2O_3 , $\gamma-Al_2O_3$ и фазы серого цвета. Часто встречаются прозрачные частицы (рис. 3, б), вероятно, $\gamma-Al_2O_3$ (лейкосапфиры) и реже – сине-голубые частицы (сапфиры) [10], образующиеся в результате импульсного воздействия искрового разряда в воздухе на алюминий. В продуктах эрозии размером 5–20 мкм присутствует большое количество оплавленных непрозрачных частиц материала.

Наблюдается большое количество мелких частиц шаровой формы, образовавшихся из жидкой и паровой фаз размером 1–8 мкм и менее (рис. 3, а), в том числе осажденных и вплавленных в прозрачные частицы (рис. 3, б). С увеличением числа проходов ($i \geq 5$) возрастает количество крупных, в том числе и прозрачных, частиц размером более 10–30 мкм, что сказывается на уменьшении значений K_n .

При этом количество частиц, образовавшихся в твердой фазе, увеличивается как за счет хрупкого разрушения «вторичной» структуры материала анода (рис. 4, а), образовавшейся в результате микрометаллургического процесса с обратным переносом материала (с катода на анод), так и за счет разрушения материала катода (рис. 4, б), в том числе сформировавшегося на поверхности материала и анода и катода при легировании на предыдущих проходах. Как видно на рис. 4, а, в поверхностном слое анода формируется «вторичная» структура, содержащая как отдельные мелкие шарообразные частицы, так и фазу серого цвета (при $i \geq 5$ проходов). На рис. 4, б видно также, что в состав покрытия (при $i \geq 2$) входят отдельные шарооб-

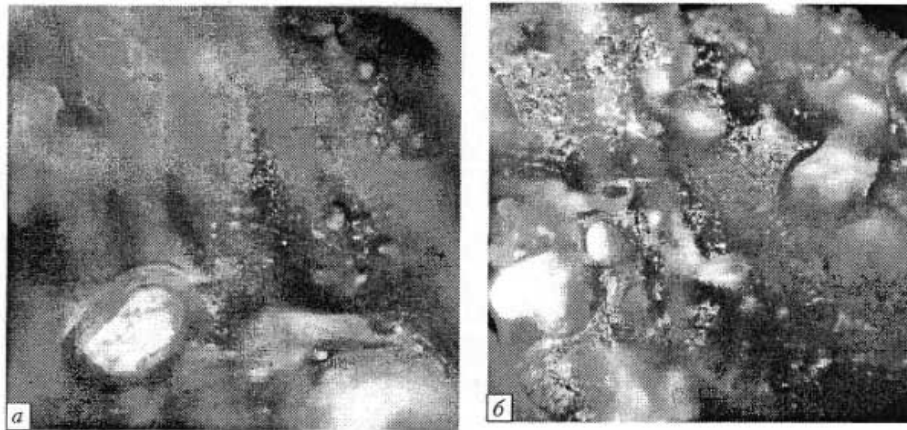


Рис. 4. Микрофотографии участков поверхности при электроискровом легировании алюминием твердого сплава ВК8. $\times 650$:

a — «вторичная» структура на электроде; *б* — катод после покрытия

разные и другие частицы, аналогичные частицам анода и шарообразным продуктам эрозии. Кроме того, в легированном слое основы встречаются прозрачные частицы, также аналогичные продуктам эрозии (рис. 3, б).

В связи с увеличением влияния «вторичной» структуры на образование частиц в твердой фазе при повышении числа проходов коэффициент переноса K_n уменьшается. Кроме того, повышение содержания сравнительно хрупкого карбида TiC в твердом сплаве приводит к уменьшению K_n , в результате чего эффект формирования легированного слоя при использовании более хрупкой подложки уменьшается.

Следовательно, в процессе электроискрового легирования алюминием эрозия анода Δ_a возрастает за счет хрупкого разрушения вторичной структуры Δ_a^* , а привес катода Δ_k уменьшается за счет хрупкого разрушения легированного слоя Δ_k^* , что приводит к уменьшению значений K_n :

$$K_n = (\Delta_k - \Delta_k^*) / (\Delta_a - \Delta_a^*).$$

Действительно, как это видно из рис. 2, б, коэффициент K_n имеет тенденцию к уменьшению при числе проходов $i \geq 3$.

Шероховатость R_a легированного слоя возрастает в 1,5–2,3 раза с увеличением числа проходов (рис. 5, а) — от 0,65–0,75 мкм на первых проходах до 1,2–1,75 мкм при $i = 9-10$. При длительном электроискровом легировании алюминием R_a практически не меняется (данные получены при одиночных проходах повторением рабочих ходов). При легировании с подачей $s \geq 0,5-0,7$ мм/ход (0,5–0,7 диаметра электрода) наблюдается формирование отдельных холмообразных плосковершинных островковых высот ОВ. Средние их значения $ОВ_{cp}$ при электроискровом легировании алюминием с подачей 0,5 мм/ход изменяются с увеличением i . Наибольшие значения $ОВ_{max}$ наблюдаются на первых двух проходах, затем аналогично $ОВ_{cp}$ при $i = 5-6$ снижаются до 5–7 мкм, а затем вновь возрастают с увеличением количества проходов до $i = 5-8$ и стабилизируются после $i = 9-10$, достигая высоты 10–13 мкм. При длительном электроискровом легировании значения $ОВ_{max}$, $ОВ_{cp}$ увеличиваются незначительно и не превышают 12–15 мкм.

Таким образом, с учетом коэффициента K_n , параметра R_a и появления $ОВ_{max}$, $ОВ_{cp}$ лучшие условия формирования легированного слоя наблюдаются при $i = 3-6$.

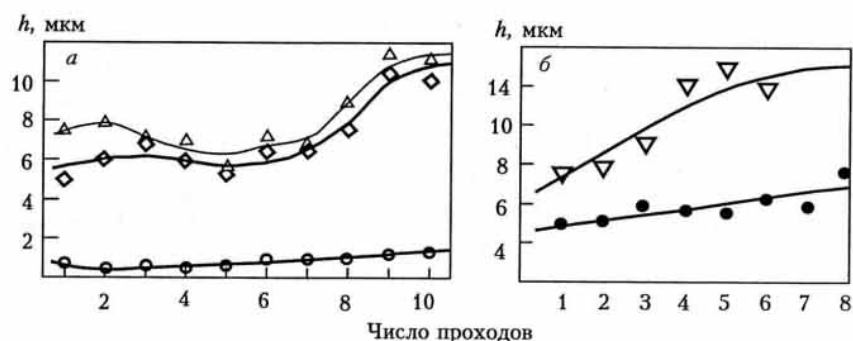


Рис. 5. Изменение микрогеометрии поверхности (\circ — R_a ; \diamond — $OВ_{cp}$, \triangle — $OВ_{max}$) покрытия (а) и толщины легированного слоя образцов из сплавов ВК8 (∇) и ТТ7К7 (\bullet) (б) в зависимости от числа проходов

Средняя толщина покрытия при электроискровом легировании алюмином твердых сплавов (рис. 5, б) повышается в 1,5–2 раза с увеличением числа одиночных проходов до 6–8. Так, при легировании сплава ТТ7К7 одиночными проходами толщина слоя имеет в среднем линейную зависимость и составляет на первых двух проходах 4–5 мкм, а к восьмому проходу 7–8 мкм. При легировании же с подачей толщина слоя растет быстрее и достигает больших значений. Так, при легировании сплава ВК8 с подачей ($s = 0,5$ мм/ход) толщина легирующего слоя достигает 7–8 мкм уже на первых проходах, при $i = 5–8$ достигает 14–15 мкм, при длительном легировании значения h стабилизируются. При этом, как отмечено ранее, снижается коэффициент K_n и растут параметры R_a , $OВ_{max}$, $OВ_{cp}$ до указанных значений.

Для повышения эффективности процесса электроискрового легирования необходимо повысить долю жидкой фазы в продуктах эрозии. Одним из способов в этом направлении является подбор режимов легирования, уменьшение диаметра электрод-инструмента.

При электроискровом легировании с подачей $s = 0,5$ мм/ход (0,5 диаметра электрода) условия массопереноса улучшаются, что обусловлено увеличением жидкой фазы в межэлектродном промежутке вследствие образования на электроде менее электро- и теплопроводной вторичной структуры, содержащей Al_2O_3 , ухудшающей теплоотдачу и способствующей повышению температуры в области прохождения разрядов. Этот эффект усиливается при отклонении оси вращения электрода от плоскости основы (в пределах $0,4–1^\circ$) в сторону, обратную направлению подачи. При этом в межэлектродном промежутке создается небольшой клин за счет отклонения от параллельности плоскости воздействия электрода к основе, уменьшающий теплоотвод от искровых разрядов в области оси вращения, что способствует термическим реакциям фазовых образований. Средняя толщина покрытия достигает 12–15 мкм с увеличением числа проходов до шести.

Таким образом, оптимальные условия формирования легированного слоя с учетом толщины покрытия наблюдаются при трех проходах (для одиночных проходов) и при 4–6 проходах при электроискровом легировании поверхностей с подачей 0,5 мм/ход (0,5 диаметра электрода).

На рис. 6 показан поперечный срез образца (рис. 1) из сплава ВК8 после электроискрового легирования. В покрытии толщиной 7–8 мкм, полученном при $\sigma = 0,5$ мм/ход и $i = 5$, просматривается переходный светлый («серый») слой между основой и покрытием толщиной 2–2,5 мкм.

В этом слое начинается одновременное возрастание содержания алюминия и снижение содержания вольфрама и кобальта. При этом снижению содержания кобальта предшествует его пик, равный среднему значению пиков в основе, перед которым содержание кобальтовой связи снижается в 3–8 раз по сравнению со средним содержанием кобальта в основе (см. таблицу и рис. 6, б, точки 5–6), что свидетельствует о вытеснении кобальта алюминием (и его соединениями) при сохранении содержания вольфрама. Кроме того, в измененном поверхностном слое формируется переходный слой высотой 3–3,5 мкм (точки 3, 4) в основании покрытия. В переходном слое наблюдается быстрое снижение содержания вольфрама (в 3–6 раз) и кобальта (в 2,5–3,5 раза) и вытеснение их алюминием (рис. 7). На высоте 3–5,5 мкм в покрытии наблюдается увеличение содержания кислорода в среднем в 3–6 раз, а затем снижение его до фоновой величины.

При этом содержание алюминия повышается с 6–7% у основания переходного слоя до 78–82% при формировании оксидного слоя (на высоте 3–6,5 мкм) в поверхностном слое покрытия. На высоте 11–14 мкм в слое покрытия несколько повышается содержание вольфрама, входящего в состав «серой» фазы, и появляются графитовые включения. Наименьшая величина сплошного покрытия наблюдается до высоты 5–7 мкм. Значения ОВ в среднем составляют 11,5–16,5 мкм, шероховатость R_a равна 1,2–1,6 мкм.

На дифрактограммах, полученных с образца из сплава ВК8 (рис. 7, б), идентифицируются присутствие карбида вольфрама WC , β -вольфрам и алюминий.

Отсутствие линии кобальта на дифрактограмме объясняется наложением более сильного пика алюминия ($d = 2,040$) на более слабый одиночный пик кобальта ($I = 100\%$), который четко проявляется на рентгенограммах исходного образца из сплава ВК8. Карбид вольфрама (рис. 6, сплав ВК8, белая область) на кривой интенсивности излучения WL_{α_1} (рис. 7, а), как и следует из микроструктуры, проявляется в противофазе с CoK_{α_1} . В пере-

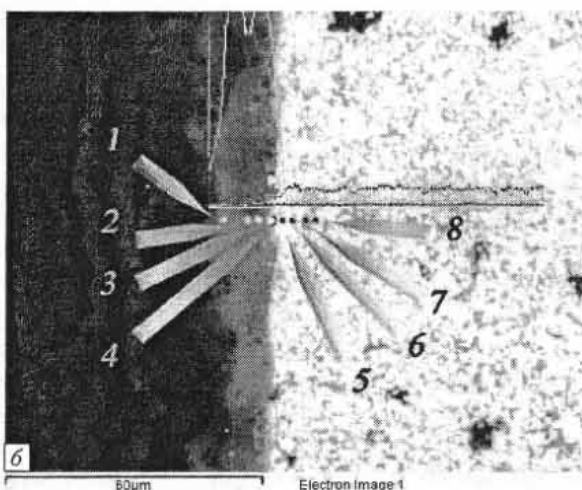


Рис. 6. Микрофотографии исследуемого образца из сплава ВК8 с покрытием:
а – $\times 1500$; б – $\times 1000$

**ПОЛУКОЛИЧЕСТВЕННЫЙ
ЭЛЕМЕНТНЫЙ (масс. %) СОСТАВ
ЛЕГИРОВАННОГО СЛОЯ
И ОСНОВЫ (СПЛАВ ВК8)**

Номер точки (рис. 6, б)	O	Al	Co	W
1	4,2	12,1	5,7	36,6
2	2,9	82,1	3,0	7,5
3	23,6	78,1	2,1	4,3
4	1,6	70,7	6,7	21,9
5	1,5	1,7	22,8	81,6
6	0,7	—	8,0	97,0
7	—	—	36,0	72,2
8	—	—	69,0	35,9

ходной зоне (точка 4) содержание этих элементов быстро снижается и доходит до минимального количества в измененном поверхностном слое (см. таблицу). Максимальное содержание в рассматриваемых точках как вольфрама, так и кобальта соответствует зонам нахождения зонда на включениях этих элементов (точки 5–8), т. е. или на светлых или на темных участках сплава ВК8. Точка 1 выбрана у границы слоя покрытия, в ней приведенные значения искажены геометрией съемки. Точки 2 и 3 выбраны на покрытии.

Наличие четких максимумов и минимумов распределения алюминия и кислорода в зоне покрытия позволяет утверждать, что покрытие несплошное и состоит, по крайней мере, из двух фаз (алюминий и оксид алюминия). Наличие графитовых включений на поверхности покрытия фиксируется от эпоксидной смолы, в которую был запечатан образец.

Для определения стойкости режущего инструмента после электроискрового легирования были проведены сравнительные испытания резца из сплава Т15К6 без покрытия и с покрытием алюминия в 4 прохода в зависимости от пути резания при чистовой обработке вала ($n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; $s = 0,07 \text{ мм/об}$; $t = 0,25 \text{ мм}$; $l = 250 \text{ мм}$). Выявлено, что алюминиевое покрытие меняет характер размерной стойкости режущего инструмента из твердых сплавов при чистовой обработке валов по параметрам конечного качества детали (размеру, повороту, форме). При наличии покрытия алюминия величина погрешности формы в большинстве случаев меньше, чем без покрытия, и не превышает 20–25 мкм при $L = 1,91\text{--}2,09 \text{ км}$. Погрешность конусности (относительный поворот образующей вала к оси) также больше в случае точения без покрытия и достигает 60 мкм/300 мкм при $L = 1,87\text{--}2,28 \text{ км}$, а при точе-

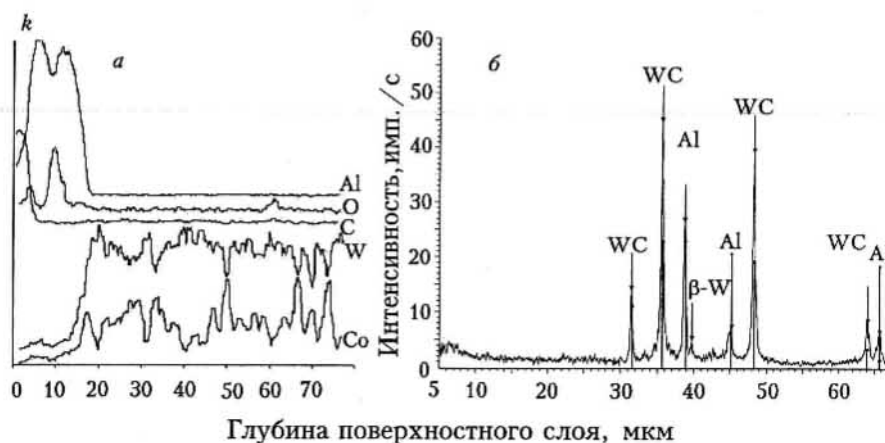


Рис. 7. Распределение интенсивности рентгеновского излучения элементов $Al_{K\alpha}$, $O_{K\alpha}$, $C_{K\alpha_{1,2}}$, $W_{L\alpha_1}$, $Co_{K\alpha_1}$ по глубине поверхностного слоя и основы сплава ВК8 (а) и дифрактограмма поверхностного слоя (б)

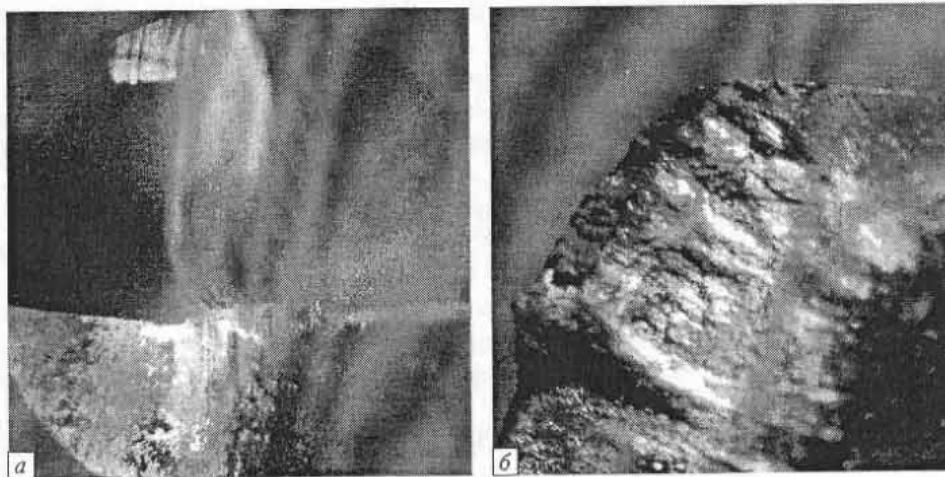


Рис. 8. Образование наростов на резце при резании стали 45 твердым сплавом T15K6 с покрытием алюминием:

a – вид на вершину (виден фрагмент стружки). $\times 80$; *b* – вид на переднюю плоскость при вершине (без стружки). $\times 100$

нии с покрытием — 35 мкм/300 мкм. Аналогично погрешность диаметра: 40 мкм без покрытия и 30 мкм с покрытием при $L = 2,09$ км.

Для всех трех параметров размерной стойкости наблюдался периодичный характер, что объясняется периодичностью появления и срыва нароста в процессе резания (рис. 8). Образование нароста происходит более интенсивно при резании с покрытием, чем без покрытия, нарост формируется быстрее и периодически срывается. Вероятно, в зоне резания при формировании нароста происходит перемещение вторичных структур из слоя покрытия к режущим кромкам исполнительной поверхности воздействия инструмента, которые участвуют в процессе резания и влияют на параметры размерного износа. Этим можно объяснить увеличение размерной стойкости инструментального материала, снижение величин, например, характеризующих параметр формы при резании гибких валов.

При обработке гибкого вала без покрытия исполнительной поверхности воздействия инструмента погрешность формы имеет только положительные значения и с увеличением пути резания $L > 1,04$ км возрастает с затуплением режущего инструмента, увеличением угла заострения и как результат в связи с возрастанием силы резания P_2 . При образовании нароста угол заострения непрерывно меняется: он может не увеличиваться и может даже уменьшаться в связи с включением в процесс резания отдельных фрагментов нароста, обогащенных вторичными структурами покрытия, в том числе Al_2O_3 . Поэтому характер формы поверхности вала при точении резцом с покрытием меняется. При наличии алюминиевого покрытия условия резания становятся другими по сравнению с условиями резания без покрытия — параметры погрешности формы уменьшаются, а с увеличением пути резания $L > 0,77$ км в большем количестве случаев приближаются к нулевым и отрицательным значениям.

ВЫВОДЫ

1. Впервые установлено, что при электроискровом легировании твердых сплавов алюминием в пределах указанных режимов наблюдаются положительные значения привеса катода при повышении длительности легирования. При этом увеличиваются толщина покрытия, сплошность, шеро-

ховатость поверхности и уменьшается коэффициент переноса K_n , который при повышении содержания карбида титана для твердых сплавов снижается. Оптимальное число проходов составляет 3–6.

2. В поверхностных слоях материала образуется композиция, состоящая из вольфрама, кобальта, алюминия, кислорода и соединения WC. Рентгенофазовым анализом наличие Al_2O_3 не обнаружено, однако по результатам металлографического и химического анализов поверхностей катода, анода и продуктов эрозии можно предположить, что он присутствует в поверхностном слое.

3. Легирование алюминием позволяет повысить размерную стойкость по параметрам размера, поворота, формы режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов при чистовой обработке точением валов из стали 45.

4. Можно предполагать, что образование в поверхностном слое композиции из Al_2O_3 и других материалов при послойном электроискровом легировании твердых сплавов алюминием и подборе технологических приемов, режимов и методов позволит значительно повысить качественные характеристики инструментальных материалов при чистовой обработке резанием.

Работа выполнена по гранту РФФИ-ДВО № 06-03-96001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. Металлообрабатывающий твердосплавной инструмент/В. С. Самойлов, В. А. Эйхманс, В. А. Фальковский и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
3. Сверхтвердые материалы/И. Н. Францевич, Г. Г. Гнесин, А. В. Курдюмов и др. – Киев: Наукова думка, 1980. – 296 с.
4. Конаков А. В. Повышение работоспособности инструментальной керамики на основе исследований структуры, состава, свойств и механизмов разрушения и изнашивания/Автореф. дисс... – Амурский госуд. ун-т, Благовещенск, 1999.
5. Вережачка А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
6. Электроискровое легирование конструкционных сплавов композиционным материалом на основе TiCN–AlN/И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. А. Лавренко и др.//Порошковая металлургия. – 2000. – № 5/6 (413). – С. 21–29.
7. Мулин Ю. И., Верхотуров А. Д. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – 110 с.
8. Верхотуров А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
9. Михайлов В. В., Абрамчук А. П. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов//Электронная обработка материалов. – 1986. – № 2 (128). – Институт прикладной физики АН Молдавской ССР. – Кишинев: Изд-во ШТИИИЦА. – С. 36–40.
10. Минералогическая энциклопедия/Под ред. К. Фрея: Пер. с англ. – Л.: Недра, 1985. – 512 с.

Статья поступила 02.03.2006.