

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 5 2020



СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ГОРДИМСЯ ПРОШЛЫМ • РАЗВИВАЕМСЯ В НАСТОЯЩЕМ • СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 5, 2020

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 63

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Главный редактор: ЛЕОНТЬЕВ Л.И.
(Российская Академия Наук, г. Москва)

Заместитель главного редактора: ПРОТОПОПОВ Е.В.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Заместитель ответственного секретаря: БАЩЕНКО Л.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)
БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
БРОДОВ А.А., редактор раздела «Экономическая эффективность металлургического производства» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Металлургические технологии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЖУЧКОВ В.И. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэль, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)
КОСЫГЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)
КУРГАНОВА Ю.А. (МГУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЕШАЛКИН В.П. (Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва)
МУЛЮКОВ Р.Р. (ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
НУРУМГАЛИЕВ А.Х. (Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Караганда, Республика Казахстан)
ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)
ПИЕТРЕЛЛИ ЛОРИС (Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия)
ПОДГОРЮНЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАПЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шэньжень, Китай)
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «Материаловедение» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЧУМАНОВ И.В. (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск)
ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
Тел.: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» по решению ВАК входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» индексируется в международной базе данных Scopus.

Журнал «Известия ВУЗов. Черная металлургия» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONTEV L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

Deputy Editor-in-Chief: PROTOPOPOV E.V.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Deputy Coordinating Editor: BASHCHENKO L.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)
G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute
Tsnetmetobrabotka", Moscow)

M.V. ASTAKHOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.O. BAISANOV (Abishev Chemical-Metallurgical
Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

V.D. BELOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.A. BRODOV, Editor of the section "Economic effi-
ciency of metallurgical production" (IP Bardin Central
Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow)

I.V. CHUMANOV (South Ural State Research
University, Chelyabinsk)

A.N. DMITRIEV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

A.V. DUB (JSC "Science and Innovations", Moscow)

M.R. FILONOV, Editor of the section "Material
science" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

A.M. GLEZER (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

S.M. GORBATYUK (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

K.V. GRIGOROVICH, Editor of the section "Metallur-
gical Technologies" (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.E. GROMOV (Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk)

A.G. KOLMAKOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.M. KOLOKOL'TSEV (Magnitogorsk State Technical
University, Magnitogorsk)

M.V. KOSTINA (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

K.L. KOSYREV (JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow)

YU.A. KURGANOVA (Bauman Moscow State
Technical University, Moscow)

V.V. KURNOSOV (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

H. LINN (Linn High Therm GmbH, Hirschbach,
Germany)

V.I. LYSAK (Volgograd State Technical University,
Volgograd)

V.P. MESHALKIN (D.I. Mendeleev Russian Chemical-
Technological University, Moscow)

R.R. MULYUKOV (Institute of Metals Superplasticity
Problems of RAS, Ufa)

L.P. MYSHLYAEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

S.A. NIKULIN (National Research Technological
University "MISIS", Moscow)

A.KH. NURUMGALIEV (Karaganda State Industrial
University, Karaganda, Republic of Kazakhstan)

O.I. OSTROVSKI (University of New South Wales,
Sidney, Australia)

LORIS PIETRELLI (Italian National Agency for
New Technologies, Energy and Sustainable Economic
Development, Rome, Italy)

G.S. PODGORODETSKII, Editor of the section
"Resources Saving in Ferrous Metallurgy" (National
Research Technological University "MISIS", Moscow)

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section
"Innovations in metallurgical industrial and
laboratory equipment, technologies and materials"

(Russian Research Institute of the Pipe Industry,
Chelyabinsk)

TS.V. RASHEV, Editor of the section "Superduty steel"
(Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria)

A.I. RUDSKOI (Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University, Saint-Petersburg)

O.YU. SHESHUKOV (Ural Federal University,
Ekaterinburg)

L.M. SIMONYAN, Editor of the section "Ecology
Rational Use of Natural Resources" (National Research
Technological University "MISIS", Moscow)

R.F. SINGER (Friedrich-Alexander University, Germany)

B.A. SIVAK (VNIIMETMASH Holding Company,
Moscow)

L.A. SMIRNOV (OJSC "Ural Institute of Metals",
Ekaterinburg)

S.V. SOLODOV, Editor of the section "Information
Technologies and Automatic Control in Ferrous
Metallurgy" (National Research Technological University
"MISIS", Moscow)

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

N.A. SPIRIN (Ural Federal University, Ekaterinburg)
TANG GUOI (Institute of Advanced Materials of
Tsinghua University, Shenzhen, China)

M.V. TEMLYANTSEV (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

E.P. VOLYNKINA (Siberian State Industrial
University, Novokuznetsk)

A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

V.S. YUSUPOV (Baikov Institute of Metallurgy and
Materials Science of RAS, Moscow)

V.I. ZHUCHKOV (Institute of Metallurgy, Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural Federal
University, Ekaterinburg)

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

V.I. ZOLOTUKHIN (Tula State University, Tula)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
Siberian State Industrial University

Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,
Kirova str., 42
Siberian State Industrial University,
Tel.: +7 (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications. in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications PI number FS77-35456

СОДЕРЖАНИЕ

Протопопов Е.В. СибГИУ – 90! Гордимся прошлым, развиваемся в настоящем, создаем будущее!	291
--	-----

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянец М.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов	298
Козырев И.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башченко Л.П. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование	305
Фастыковский А.Р., Никитин А.Г., Беляев С.В., Добрянский А.В. Особенности освоения технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане	313
Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами	318
Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С., Куценко А.И. Влияние теплофизических характеристик сплава и материала литейной формы на скорость затвердевания отливок	327
Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксидно-железосодержащих отходов металлургического производства	335

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения	344
--	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Осколкова Т.Н., Симачев А.С. Влияние импульсно-плазменного модифицирования титаном и бором поверхности твердого сплава VK10KS на его структуру и свойства	351
Зоря И.В., Полегаев Г.М., Старостенков М.Д., Ракитин Р.Ю., Кокханенко Д.В. Влияние примесей легких элементов на процесс кристаллизации никеля в области тройного стыка границ зерен: молекулярно-динамическое моделирование	357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Рыбенко И.А., Роос Х.-Г. Метод и инструментальная система для моделирования и оптимизации технологических режимов процессов прямого восстановления металлов в агрегате струйно-эмульсионного типа	364
---	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Зимин А.В., Золн И.А., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование развертывания сервисных активов, основанное на данных о применении ИТ-сервисов	373
---	-----

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

ГлушакOVA О.В., Черникова О.П., Стрекалова С.А. Интегральная оценка эффективности реализации корпоративных стратегий предприятиями черной металлургии	379
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

Цымбал В.П., Буинцев В.Н., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Сеченов П.А. Математическое моделирование в учебном процессе, исследованиях и малозатратных металлургических технологиях	389
--	-----

CONTENTS

E.V. Protopopov To the 90 th Anniversary of Siberian State Industrial University	291
---	-----

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

E.V. Protopopov, V.V. Chislavlev, M.V. Temlyantsev, A.V. Golovatenko Increasing efficiency of rail steel refining in CCM tundish based on rational organization of hydrodynamic processes	298
N.A. Kozyrev, R.A. Shevchenko, A.A. Usol'tsev, A.N. Prudnikov, L.P. Bashchenko Welding of differentially heat-strengthened rails. Industrial testing	305
A.R. Fastyskovskii, A.G. Nikitin, S.V. Belyaev, A.V. Dobryanskii Features of the rolling-separation technology development on operating continuous small-grade mill	313
A.A. Umanskii, V.V. Dorofeev, L.V. Dumova Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties	318
O.G. Prikhod'ko, V.B. Deev, E.S. Prusov, A.I. Kutsenko Influence of thermophysical characteristics of alloy and mold material on castings solidification rate	327
A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production	335

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, A.I. Edil'baev, B.A. Edil'baev Manganese ores of the Kemerovo Region – Kuzbass and methods of their enrichment	344
--	-----

MATERIAL SCIENCE

T.N. Oskolkova, A.S. Simachev Influence of pulse-plasma modification of VK10KS solid alloy surface by titanium and boron on its structure and properties	351
I.V. Zorya, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov, R.Yu. Rakitin, D.V. Kokhanenko Effect of light elements impurity on process of nickel crystallization near the triple interface of grain boundaries: A molecular dynamics simulation	357

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

I.A. Rybenko, Roos Hans-Georg Technological modes of metals direct reduction in an aggregate of jet-emulsion type	364
---	-----

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

A.V. Zimin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin Planning service assets deployment based on information about dynamics of IT services use	373
--	-----

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Glushakova, O.P. Chernikova, S.A. Strekalova Integral assessment of corporate strategies implementation efficiency of ferrous metallurgy enterprises	379
---	-----

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ

V.P. Tsybmal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov Mathematical modeling in education process, research and low-energy metallurgical technologies	389
--	-----

УДК 621.793.74:[669.018.25:[669.295+661.65]]

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТИТАНОМ И БОРОМ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК10КС НА ЕГО СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА*

*Осколкова Т.Н., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» (osolkova@kuz.ru)*

*Симачев А.С., к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» (simachev_as@mail.ru)*

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрено модифицирование поверхности твердого сплава ВК10КС титаном совместно с бором способом импульсно-плазменного воздействия (электровзрывного легирования). При этом формируется сверхтвердый (нанотвердость 27 500 МПа) слой толщиной 2,0 – 2,5 мкм с низким ($\mu = 0,10$) коэффициентом трения по сравнению с коэффициентом трения твердого сплава в спеченном состоянии ($\mu = 0,41$). Этот слой состоит из мелкодисперсных высокотвердых фаз TiB_2 , (Ti, W)C, W_2C (по данным растровой, просвечивающей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа). Ниже располагается упрочненный (с нанотвердостью 17 000 МПа) приповерхностный слой (зона термического влияния) толщиной 10 – 15 мкм, идентифицированный карбидами W_2C и WC и легированный кобальтовой связующей. Этот слой плавно переходит в основу. Профилометрическими исследованиями установлено, что после электровзрывного легирования титаном с бором шероховатость увеличивается ($Ra = 2,00$ мкм) по сравнению с исходной ($Ra = 1,32$ мкм), но сохраняется в пределах технических требований ($Ra = 2,50$ мкм). Исследованиями выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе выявлены скопления дислокаций. В кобальтовой связующей выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации, а также мелкодисперсные выделения карбидов вольфрама). Указанное изменение можно объяснить стабилизацией кубической модификации кобальта, кристаллическая решетка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта. Дополнительное легирование кобальтовой связующей положительно влияет на эксплуатационную стойкость карбидовольфрамовых твердых сплавов в целом из-за своей стабилизации.

Ключевые слова: импульсная плазменная обработка, твердые сплавы, нанотвердость, износостойкость, взрываемый проводник, микроструктура, кобальтовая связующая.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-351-356

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроения, горнодобывающей и деревообрабатывающей промышленности в нашей стране напрямую связано с применением спеченных твердых сплавов, которые широко используют в качестве инструментальных материалов. Сплавы WC–Co – наиболее прочные из известных твердых сплавов. Однако эти сплавы не всегда удовлетворяют требованиям по эксплуатационной стойкости, поэтому одним из перспективных направлений их совершенствования является разработка технологий, которые обеспечивают повышение износостойкости при сохранении вязкости [1 – 6]. Для поверхностного упрочнения твердых сплавов в последнее время все чаще стали применять концентрированные потоки энергии, используя импульсные плазменные ускорители [7 – 12].

* Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля Е.А. Будовских за предоставленную возможность в проведении эксперимента.

Целью настоящей работы явилось получение упрочненного слоя на поверхности сплава ВК10КС способом электровзрывного легирования с использованием титана и бора, исследование его структуры и свойств.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Стремление интенсифицировать процесс получения упрочненных слоев-покрытий, повысить их чистоту и адгезию к подложкам привело к применению импульсных плазменных ускорителей. При импульсно-плазменном нанесении покрытий используют более плотные потоки плазмы, чем при ионно-плазменном напылении.

Одним из способов импульсного плазменного воздействия является электровзрывное легирование (ЭВЛ), сущность которого основана на накоплении энергии батарей импульсных конденсаторов до 1 – 10 кДж и ее последующем разряде в течение 100 мкс через проводник, испытывающий при этом взрывное разрушение. Способ ЭВЛ вольфрамокобальтового твердосплавного

инструмента включает нагрев поверхности и насыщение ее продуктами взрыва с последующей самозакалкой путем отвода тепла в глубь материала и окружающую среду. Инструментом теплового воздействия на поверхность и источником легирующих элементов при ЭВЛ является импульсная многофазная плазменная струя. Она формируется из материала взрываемого проводника, закрепленного на коаксиально-торцевых электродах плазменного ускорителя. Область взрыва локализована конической разрядной камерой, переходящей в цилиндрическое сопло, через которое продукты взрыва истекают в вакуумную технологическую камеру установки с остаточным давлением 100 Па [13].

Обработку поверхности твердого сплава ВК10КС проводили в высокоэнергетическом режиме при интенсивности воздействия $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ (диаметр d внутреннего электрода 15 мм; диаметр d_0 канала сопла 10 мм; расстояние x от облучаемой поверхности до среза сопла 20 мм; величина зарядного напряжения $U = 2,3 \text{ кВ}$). Облучаемая поверхность твердого сплава испытывала оплавление и интенсивное конвективное перемешивание расплава из-за неоднородного давления, оказываемого плазменной струей на поверхность [14].

В работе исследовали титан ВТ1-00 в виде фольги толщиной 25 мкм. При взрыве титана можно ожидать формирования на поверхности твердых сплавов группы ВК карбидов титана TiC – основу твердых сплавов группы ТК, используемых при высоких скоростях резания [15].

В работе [16] установлено, что ЭВЛ сплава ВК10КС титаном позволяет повысить поверхностную твердость до 25 000 МПа. Возможности такой обработки могут быть увеличены при совместном взрыве титановой фольги и порошка бора, которые переносятся формируемой струей на облучаемую поверхность. Эффективность нанесения на поверхность твердых сплавов боридных покрытий для повышения их микротвердости и износостойкости показана в работе [17].

При использовании титана в качестве проводника совместно с порошком бора в поверхностном слое твердого сплава, куда продукты взрыва переносятся как в плазменном, так и в конденсированном состоянии, возможно образование карбидов и боридов, которые обладают высокой твердостью. В настоящей работе использовали порошок аморфного бора марки А фракцией 5 мкм из расчета 60 мг порошка на 15 см^2 обрабатываемой поверхности.

В работе для электровзрывной обработки использовали твердый сплав марки ВК10КС производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (Россия).

Исследования структуры твердого сплава после ЭВЛ осуществляли с помощью растрового («Philips SEM 515») и просвечивающего (марки Тесна 20 G2 TWIN фирмы FEI) электронных микроскопов. Химический состав поверхностного и приповерхностного

слоев твердого сплава до и после электровзрывной обработки определяли на растровых электронных микроскопах «Philips XL-30», «Philips SEM 515». Рентгенофазовые исследования проводили с помощью дифрактометра ДРОН-2,0 в K_α -излучении железа. Оценку нанотвердости поверхностного слоя после упрочнения проводили на приборе «Nano Hardness Tester» фирмы CSEM на трех образцах по 10 замеров на каждом. Испытания образцов на износостойкость в исходном состоянии и после упрочнения проводили с помощью трибометра «PC-Operated High Temperature Tribometer» при комнатной температуре. Износ образцов определяли путем измерения глубины и площади трека износа, образованного в результате действия вращающегося алмазного индентора на неподвижном образце (нагрузка, действующая на индентор, оставляла 3 Н, количество вращений – 4000 оборотов, линейная скорость движения индентора $2,5 \text{ см/с}$) с помощью высокоточной измерительной установки «Micro Measure 3D station» с программным обеспечением. Анализ полученных профилей осуществлен с использованием компьютерной программы Mountains Map Universal, версия 2.0.13. Результаты трибологических испытаний представлены как среднеарифметические значения, полученные на трех образцах по 10 замеров на каждом. Оценку шероховатости проводили с помощью установки «Micro Measure 3D station» фирмы CSEM.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При ЭВЛ в высокоэнергетическом режиме происходит расплавление поверхностного слоя твердого сплава, насыщение этого слоя продуктами взрыва, интенсивное перемешивание под действием плазменной струи, дальнейшее ускоренное охлаждение и кристаллизация расплавленного слоя. Металлографические исследования показали (рис. 1), что при импульсной плазменной обработке твердосплавных пластин титаном с бором образуется плохо травящаяся зона тол-

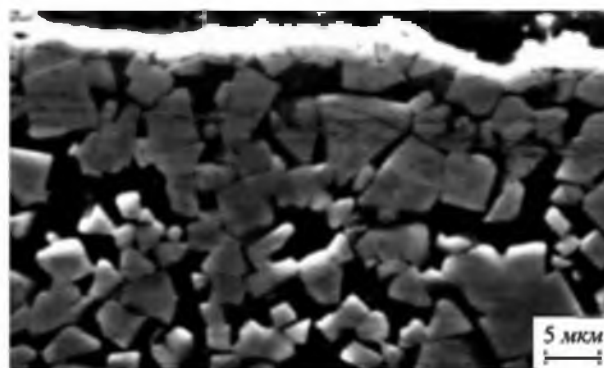


Рис. 1. Микроструктура сплава ВК10КС после электровзрывного легирования титаном с бором

Fig. 1. Microstructure of VK10KS alloy after electroexplosive alloying with titanium and boron

щиной 2,0 – 2,5 мкм следующего химического состава: 16,35 % Ti; 74,9 % W; 4,65 % B; 4,1 % C. Эта зона связана с формированием новых упрочняющих мелкодисперсных фаз и состоит по данным рентгенофазовых исследований из диборида титана TiB_2 (15 %) и карбидов (Ti, W)C (30 %), W_2C (20 %), WC (35 %) (рис. 2). По мнению авторов работы [17] борсодержащие фазы, образующиеся в твердых сплавах после борирования, позволяют сохранять устойчивость этих сплавов в течение длительной эксплуатации при повышенных температурах.

Оценка нанотвердости этого слоя твердого сплава BK10KC после ЭВЛ титаном с бором выявило ее увеличение до 27 500 МПа. Высокие значения нанотвердости связаны с формированием при электровзрыве титановой фольги с бором новых мелкодисперсных высокопрочных фаз – TiB_2 , W_2C , (Ti, W)C. Новые образующиеся фазы содержат бор и позволяют эксплуатировать твердые сплавы длительное время при повышенных температурах [17 – 19].

Ниже располагается упрочненный поверхностный слой толщиной 10 – 15 мкм, плавно переходящий в основу без образования микротрещин. В этом слое кристаллизуются карбиды вольфрама W_2C и WC с уменьшенными (3 – 4 мкм) размерами по сравнению с исходными (5 – 7 мкм). Причиной кристаллизации карбидов W_2C в данной зоне является недостаток углерода, который был востребован для образования карбида (Ti, W)C. Нанотвердость этого слоя составляет 17 000 МПа. Эта зона затрагивает еще изменения кобальтовой фазы, которые связаны с дополнительным ее легированием химическими элементами, входящими в состав взрываемых материалов и основы. Кобальтовая фаза представляет собой пересыщенный твердый раствор, дополнительно легированный вольфрамом, углеродом, титаном, бором. В дальнейшем этот раствор распадается и насыщает цементирующую связку мелкодисперсными карбидами вольфрама. Увеличение

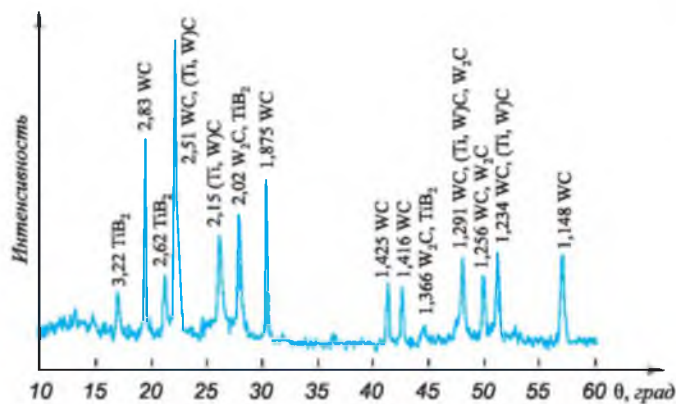


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы сплава BK10KC после электровзрывного легирования титаном с бором

Fig. 2. A fragment of the diffraction pattern of VK10KS alloy after electroexplosive alloying with titanium and boron

степени легирования кобальтовой связующей приведет к стабилизации ГЦК решетки (β -Co), уменьшению разницы в коэффициентах термического расширения WC и Co-фазы, снижению напряженного состояния в кобальтовой фазе и повышению температуры разупрочнения, что положительно повлияет на эксплуатационную стойкость вольфрамокобальтовых твердых сплавов в целом [19]. В работе [17] показано, что при борировании твердого сплава WC – 20 % Co помимо формирования на поверхности сплава соединений, содержащих бор, большое количество активных атомов бора диффундирует в Co-фазу и приводит к образованию соединения $W_2Co_{21}B_6$.

Просвечивающей электронной микроскопией выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе обнаружены как единичные дислокации, так и ячеистая дислокационная структура (рис. 3, а), что приводит к наклепу зерен карбида вольфрама WC.

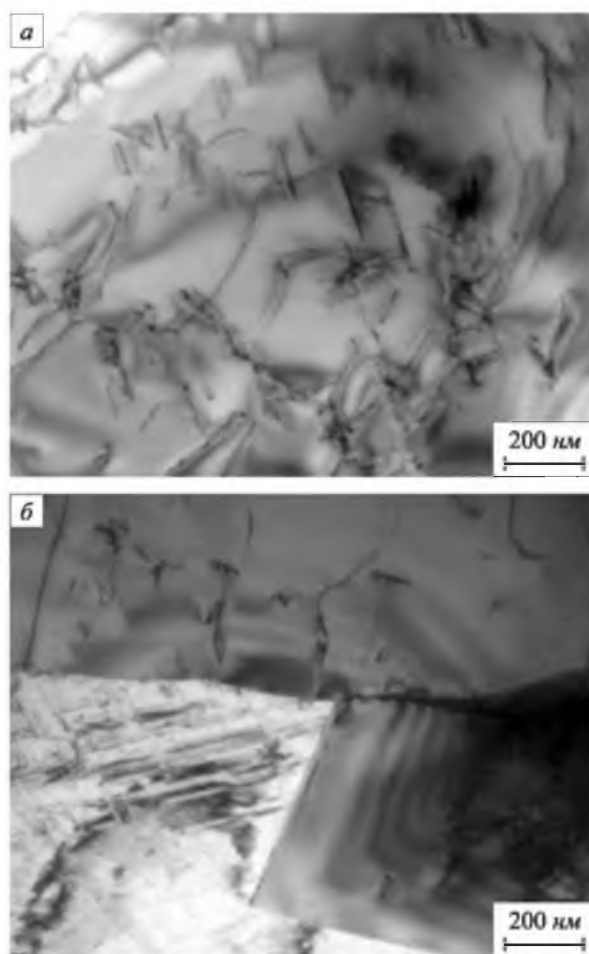


Рис. 3. Структура сплава BK10KC после электровзрывной обработки титаном с бором:

а – поверхность; б – на расстоянии 10 мкм от поверхности

Fig. 3. Structure of VK10KS alloy after electroexplosive treatment with titanium and boron:

а – surface; б – at a distance of 10 μm from the surface

В кобальтовой связующей выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации, а также мелкодисперсные выделения карбидов вольфрама (рис. 3, б). Указанное изменение можно объяснить стабилизацией кубической модификации кобальта, кристаллическая решетка которого обладает большим числом плоскостей скольжения при деформации и большей способностью к упрочнению по сравнению с гексагональной модификацией кобальта [20].

Механизм формирования упрочненного слоя на сплаве ВК10КС, образованного при электровзрывном легировании титаном с бором в высокоэнергетическом режиме, состоит в следующем: при обработке происходит расплавление поверхностного слоя твердого сплава, насыщение этого слоя продуктами взрыва, интенсивное перемешивание под действием плазменной струи, дальнейшее ускоренное охлаждение и кристаллизация расплавленного слоя. В результате на поверхности кристаллизуется слой, состоящий из борида титана TiB_2 и легированного карбида титана $(Ti, W)C$. Эти фазы имеют большую (3230 и 3257 °С) температуру плавления, а также более низкую (4,52 и 4,92 г/см³) плотность соответственно, чем карбиды вольфрама, поэтому кристаллизуются в первую очередь на поверхности твердого сплава. В этом же слое кристаллизуются карбиды W_2C и WC . Под этим слоем располагаются карбиды вольфрама W_2C и WC с уменьшенными (3–4 мкм) размерами по сравнению с исходными (5–7 мкм). Причиной кристаллизации карбида W_2C в данной зоне является недостаток углерода, который был востребован для образования карбида $(Ti, W)C$. Глубже располагается зона, в которой наблюдаются изменения только кобальтовой фазы, связанные с дополнительным ее легированием. Данная зона плавно переходит в основной материал (исходное состояние) твердого сплава.

Трибологические испытания образцов после электровзрывного легирования выявили, что глубина треков

износа спеченных образцов ВК10КС составляет в среднем 58 мкм, а после импульсной обработки титаном с бором 2,42 мкм. Площадь трека у спеченных образцов составляет 12 921 мкм², а после электровзрывного легирования титаном с бором – 155 мкм² (рис. 4).

Коэффициент трения (μ) на стадии приработки исходных образцов в спеченном состоянии составляет 0,41, а обработанных ЭВЛ титаном с бором 0,10.

Очевидно, что незначительный износ упрочненных образцов связан с образованием на поверхности твердого сплава ВК10КС карбидов типа $(Ti, W)C$, B_4C , карбида вольфрама W_2C , а также боридов W_2B_5 , $(Co_{1,25}W_{1,75})B_2$ и борида титана TiB_2 с высокими значениями твердости.

Профилометрические исследования показали, что после обработки ЭВЛ титаном с бором шероховатость увеличивается ($Ra = 2,00$ мкм) по сравнению с исходной ($Ra = 1,32$ мкм), но остается в пределах технических требований ($Ra = 2,50$ мкм). Такое повышение шероховатости можно объяснить формированием покрытия, образованного конденсированными частицами продуктов взрыва титановой фольги, которые, располагаясь в тылу струи, достигают облучаемой поверхности уже на стадии ее кристаллизации, при конденсации на поверхности отдельных капель продуктов взрыва фольги они растекаются по ней и формируют новый рельеф [14].

Выводы

Установлено, что модифицирование поверхности твердого сплава ВК10КС титаном совместно с бором способом ЭВЛ формирует упрочненный слой толщиной 2,0–2,5 мкм с нанотвердостью 27 500 МПа, состоящий из мелкодисперсных высокотвердых фаз TiB_2 , $(Ti, W)C$, W_2C . Ниже располагается упрочненный (с нанотвердостью 17 000 МПа) приповерхностный слой (зона

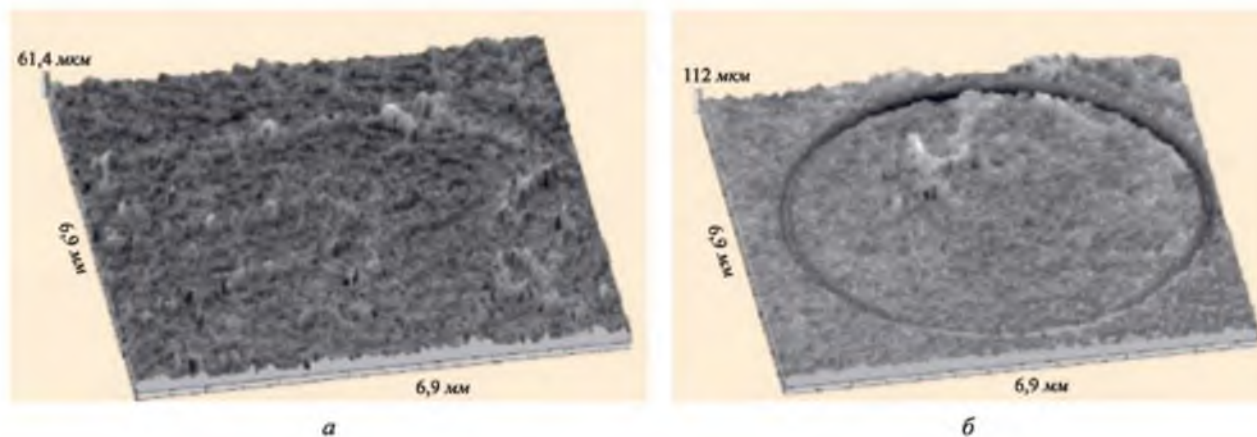


Рис. 4. Внешний вид треков при трибологических испытаниях:
а – сплав ВК10КС после обработки; б – исходный сплав

Fig. 4. Appearance of tracks during tribological tests:
а – VK10KS alloy after treatment; б – initial alloy

термического влияния) толщиной 10 – 15 мкм, идентифицированный карбидами W_2C и WC и легированный кобальтовой связующей. Этот слой плавно переходит в основу. С увеличением поверхностной твердости возрастает износостойкость и уменьшается коэффициент трения до 0,1 (в исходном спеченном состоянии коэффициент трения составляет 0,41).

Исследованиями выявлены изменения, возникающие в поверхностной карбидной и приповерхностной кобальтовой фазах при электровзрывном легировании. В карбидной фазе выявлены скопления дислокаций. Помимо дополнительного легирования в кобальтовой связующей элементами взрывааемых проводников и основного материала выявлены выделения из пересыщенного кобальтового твердого раствора карбидов вольфрама, выявлены деформационные полосы (полосы скольжения), единичные дислокации. Дополнительное легирование кобальтовой связующей положительно повлияет на эксплуатационную стойкость вольфрамкобальтовых твердых сплавов в целом из-за своей стабилизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9 – 18.
2. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
3. Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electroless Ni-P-WC nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 16-17. P. 7246 – 7251.
4. Oskolkova T.N. Wear resistant coating on hard alloy // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 281 – 285.
5. Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrankova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition // Thin Solid Films. 2005. Vol. 476. P. 1 – 29.
6. Ramkumar J., Aravindan S., Malhotra S.K., Krishnamurthy R. Enhancing the metallurgical properties of WC insert (K-20) cutting tool through microwave treatment // Material Letters. 2002. Vol. 53. No. 3. P. 200 – 204.
7. Осколкова Т.Н., Глезер А.М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбидовольфрамовых твердых сплавов (обзор) // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 980 – 991.
8. Тюрин Ю.Н., Кульков С.Н., Колисниченко О.В. Импульсно-плазменное модифицирование поверхности изделия из сплава $WC + 20\% Co$ // Физ. инженерия поверхности. 2009. Т. 7. № 3. С. 262 – 267.
9. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В., Игнатюк В.Д. Термическая обработка неперетачиваемых пластин из твердого сплава T15K6 непрерывным лазерным излучением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 1 (169). С. 26 – 30.
10. Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Исследование влияния температурных полей нагрева при непрерывной лазерной обработке на эксплуатационные свойства пластин твердого сплава T15K6 // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 76 – 84.
11. Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V. Improving the wear resistance of hard-alloy rolling disk by pulsed-plasma treatment // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 10. P. 948 – 951.
12. Kozakov A.T., Yaresko S.I. Using auger electron spectroscopy for studying the composition of the surface of multicomponent alloys under the effect of pulsed laser irradiation // Inorganic Materials: Applied Research. 2011. Vol. 2. No. 3. P. 254 – 260.
13. Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-Resistant Coatings on WC-Co Hard Alloys Synthesized by Concentrated Energy Flows // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 146 – 154.
14. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
15. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Реакции неорганических веществ: справочник. – М.: Дрофа, 2007. – 637 с.
16. Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electro-explosive alloying tungsten carbide hard alloy // Non-Ferrous Metals. 2014. Vol. 55. No. 2. P. 196 – 200.
17. Shourong L., Jianmin H., Liang C., Juntong S. Mechanism of hard-facing alloy's WC-Co boronizing with rare-earth metals // Rare Metal Materials and Engineering. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 305 – 308.
18. Хижняк В.Г., Долгих В.Ю., Король В.И. Строение и некоторые свойства диффузионных покрытий титана, ванадия, хрома и бора на твердых сплавах // Научные вести национ. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт». 2002. № 1. С. 74 – 79.
19. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСиС, 2004. – 464 с.
20. Yaresko S.I. The influence of the composition of cobalt phase of hard alloys on tool wear upon laser hardening // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2009. Vol. 50. No. 5. С. 556 – 562.

Поступила в редакцию 21 января 2020 г.

После доработки 2 марта 2020 г.

Принята к публикации 10 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 351–356.

INFLUENCE OF PULSE-PLASMA MODIFICATION OF VK10KS SOLID ALLOY SURFACE BY TITANIUM AND BORON ON ITS STRUCTURE AND PROPERTIES

T.N. Oskolkova, A.S. Simachev

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Modification of the surface of VK10KS solid alloy with titanium alongside with boron by the method of pulse-plasma exposure (electro-explosive alloying) is considered. In this case, a superhard (27,500 MPa nanohardness) layer is formed with a thickness of 2.0 – 2.5 μm and

a low ($\mu = 0.10$) friction coefficient compared to the friction coefficient of a hard alloy in the sintered state ($\mu = 0.41$). This layer consists of finely dispersed high-hard phases TiB_2 , (Ti, W) C , W_2C (according to scanning, transmission electron microscopy and X-ray phase analysis). Below is a hardened (with a nanohardness of 17,000 MPa) surface layer (heat affected zone) 10 – 15 μm thick, identified by W_2C and WC carbides and alloyed with a cobalt binder. This layer smoothly passes into the base. By profilometric studies it was established that after electroexplosive alloying with titanium and boron, the roughness

increases ($Ra = 2.00 \mu\text{m}$) compared to the initial one ($Ra = 1.32 \mu\text{m}$), but remains within the specifications ($Ra = 2.50 \mu\text{m}$). The authors have revealed changes that occur in the surface carbide and near-surface cobalt phases during electroexplosive alloying. In the carbide phase, accumulations of dislocations were indicated. In the cobalt binder, deformation bands (slip bands), single dislocations, and also finely dispersed tungsten carbide precipitates were found. This change can be explained by stabilization of the cubic modification of cobalt, the crystal lattice of which has a large number of slip planes during deformation and a greater ability to harden compared to the hexagonal modification of cobalt. Additional alloying with a cobalt binder will positively affect the operational stability of tungsten carbide alloys as a whole due to their stabilization.

Keywords: pulse-plasma treatment, hard alloys, nanohardness, wear resistance, exploding conductor, microstructure, cobalt binder.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-351-356

REFERENCES

- Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improvement of the tool effectiveness by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2005, no. 9, pp. 9–18. (In Russ.).
- Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii rezhushchego instrumenta* [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of the cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie. 2008. 311 p. (In Russ.).
- Liu Y., Vid Q., Li Y. Synthesis and tribological behavior of electrodeless Ni-P-WC nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 201, no. 16–17, pp. 7246–7251.
- Oskolkova T.N. Wear resistant coating on hard alloy. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 788, pp. 281–285.
- Veprek S., Veprek-Hejman M.G.J., Kavrunkova P., Prohazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposition. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 476, pp. 1–29.
- Ramkumar J., Aravindan S., Malhotra S.K., Krishnamurthy R. Enhancing the metallurgical properties of WC insert (K-20) cutting tool through microwave treatment. *Material Letters*. 2002, vol. 53, no. 3, pp. 200–204.
- Oskolkova T.N., Glezer A.M. Current state of the scientific problem of WC-Co hard alloys surface hardening (Review). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 47, no. 12, pp. 980–991. (In Russ.).
- Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V. Pulse-plasma modification of surface of product from WC + 20 % Co alloy. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti*. 2009, vol. 7, no. 3, pp. 262–267. (In Russ.).
- Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V., Ignatyuk V.D. Heat treatment of T15K6 solid carbide non-turning plates by continuous laser radiation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2019, vol. 15, no. 1 (169), pp. 26–30. (In Russ.).
- Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Influence of temperature fields of heating during continuous laser processing on the operational properties of T15K6 alloy plates. *Izv. vuz. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2018, no. 2, pp. 76–84. (In Russ.).
- Tyurin Yu.N., Kul'kov S.N., Kolisnichenko O.V. Improving the wear resistance of hard-alloy rolling disk by pulsed-plasma treatment. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 10, pp. 948–951.
- Kozakov A.T., Yaresko S.I. Using auger electron spectroscopy for studying the composition of the surface of multicomponent alloys under the effect of pulsed laser irradiation. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011, vol. 2, no. 3, pp. 254–260.
- Oskolkova T.N., Glezer A.M. Wear-resistant coatings on WC-Co hard alloys synthesized by concentrated energy flows. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 146–154.
- Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Fizicheskie osnovy elektrovzryvnogo legirovaniya metallov i splavov* [Physical fundamentals of electric explosive alloying of metals and alloys]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2007, 301 p. (In Russ.).
- Lidin R.A., Molochko V.A., Andreeva L.L. *Reaktsii neorganicheskikh veshchestv: spravochnik* [Reactions of inorganic substances: Guide]. Moscow: Drofa, 2007, 637 p. (In Russ.).
- Oskolkova T.N., Budovskikh E.A., Goryushkin V.F. Features of structure formation of the surface layer in the course of electroexplosive alloying tungsten carbide hard alloy. *Non-Ferrous Metals*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 196–200.
- Shourong L., Jianmin H., Liangning C., Junting S. Mechanism of hard-facing alloy's WC-Co boronizing with rare-earth metals. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2003, vol. 32, no. 4, pp. 305–308.
- Khizhnyak V.G., Dolgikh V.Yu., Korol' V.I. Structure and some properties of diffusion coatings of titanium, vanadium, chromium and boron on hard alloys. *Nauchnye vesti natsion. tekhn. un-ta Ukrainy "Kievskii politekhnicheskii institut"*. 2002, no. 1, pp. 74–79. (In Russ.).
- Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal'kovskii V.A. *Tekhnologiya i svoystva spechemykh tverdykh splavov i izdelii iz nikh* [Technology and properties of sintered hard alloys and products from them]. Moscow: MISiS. 2004, 464 p. (In Russ.).
- Yaresko S.I. The influence of the composition of cobalt phase of hard alloys on tool wear upon laser hardening. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2009, vol. 50, no. 5, pp. 556–562.

Acknowledgements. The authors are grateful to Budovskikh E.A. Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel for the opportunity to conduct an experiment.

Information about the authors:

T.N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair «Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK» (osolkova@kuz.ru)

A.S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair «Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK», Deputy Director of the Center for Collective Use «Materials Science» (simachev_as@mail.ru)

Received January 21, 2020

Revised March 2, 2020

Accepted March 10, 2020

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 25.05.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

