

ISSN 1997-308X  
eISSN 2412-8767

# ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Научно-технический журнал

Основан в 2007 г.

Выходит 4 раза в год

2023

Том 17 № 1  
Vol. 17 No. 1

# POWDER METALLURGY AND FUNCTIONAL COATINGS

Scientific and Technical Journal

Founded in 2007

Four issues per year

# ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

ISSN 1997-308X  
eISSN 2412-8767



Учредитель:

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСИС»

Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

<https://www.misis.ru>

Главный редактор

Евгений Александрович Левашов

д.т.н., академик РАН, профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 2007 Г.

ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

<http://powder.misis.ru>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ  
для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней.

Журнал включен в базы данных: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ, БД/РЖ ВИНТИ.

## Редакционная коллегия

М. И. Алымов – д.т.н., чл.-корр. РАН, проф., ИСМАН, г. Черноголовка  
А. П. Амосов – д.ф.-м.н., проф., СамГТУ, г. Самара  
Г. А. Баглюк – д.т.н., акад. НАНУ, проф., ИПМ НАН Украины, г. Киев  
И. В. Блинков – д.т.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва  
П. А. Витязь – д.т.н., акад. НАНБ, проф., НАН Беларуси, г. Минск  
В. Ю. Дорофеев – д.т.н., проф., ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск  
А. А. Зайцев – к.т.н., доц., НИТУ МИСИС, г. Москва  
А. Ф. Ильющенко – д.т.н., акад. НАН Беларуси, проф.,  
ГНПО ПМ НАН Беларуси, г. Минск  
Д. Ю. Ковалев – д.ф.-м.н., ИСМАН, г. Черноголовка  
Ю. Р. Колобов – д.ф.-м.н., проф., ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка  
В. С. Комлев – д.т.н., чл.-корр. РАН, проф., ИМЕТ РАН, г. Москва  
Ю. М. Королев – д.т.н., проф., НТА «Порошковая металлургия»,  
г. Москва  
В. И. Костиков – д.т.н., чл.-корр. РАН, проф., НИТУ МИСИС,  
г. Москва  
В. П. Кузнецов – д.т.н., проф., УрФУ, г. Екатеринбург  
С. В. Кузьмин – д.т.н., чл.-корр. РАН, проф., ВолГТУ, г. Волгоград  
Ю. В. Левинский – д.т.н., проф., ИСМАН, г. Черноголовка  
А. Е. Лигачев – д.ф.-м.н., проф., ИОФ РАН, г. Москва  
А. А. Лозован – д.т.н., проф., МАИ (НИУ), г. Москва  
В. Ю. Лопатин – к.т.н., доц., НИТУ МИСИС, г. Москва  
В. И. Лысак – д.т.н., акад. РАН, проф., ВолГТУ, г. Волгоград  
А. В. Макаров – д.т.н., чл.-корр. РАН, ИФМ УрО РАН, УрФУ,  
г. Екатеринбург  
С. А. Оглезнева – д.т.н., проф., ПНИПУ, г. Пермь  
С. С. Орданьян – д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ), г. Санкт-Петербург  
И. Б. Пантелеев – д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ), г. Санкт-Петербург  
М. И. Петржик – д.т.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва  
Ю. С. Погожев – к.т.н., доц., НИТУ МИСИС, г. Москва

В. В. Поляков – д.ф.-м.н., проф., АлтГУ, г. Барнаул  
А. А. Попович – д.т.н., чл.-корр. РАН, проф., СПбГПУ,  
г. Санкт-Петербург  
С. Е. Порозова – д.т.н., проф., ПНИПУ, г. Пермь  
А. А. Ремпель – д.т.н., акад. РАН, проф., ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург  
М. В. Чукин – д.т.н., проф., МГТУ, г. Магнитогорск  
С. Д. Шляпин – д.т.н., проф., МАИ (НИУ), г. Москва  
Д. В. Штанский – д.ф.-м.н., проф., НИТУ МИСИС, г. Москва  
С. Pengwan – Dr. Sci., Prof., Beijing Institute of Technology,  
Beijing, P.R. China  
H. Dannerger – Dr. Sci., Prof., Vienna University of Technology,  
Vienna, Austria  
B. Derin – Dr. Sci. (Phil.), Assoc. Prof., Istanbul Technical University,  
Maslak, Istanbul, Turkey  
Yu. Estrin – Dr. Sci. (Nat.), Prof., Monash University, Clayton, Australia  
F. Peizhong – Dr. Sci., Prof., China University of Mining and Technology,  
Xuzhou, P.R. China  
F. Zhengyi – Dr. Sci., Prof., Wuhan University of Technology, Wuhan,  
P.R. China  
I. Konyashin – Dr. Sci. (Econ.), Prof., Element Six GmbH, Burghaun,  
Germany  
S. A. Kulinich – PhD (Chem.), Associate Prof., Tokai University, Hiratsuka,  
Kanagawa, Japan  
L. L. Mishnaevsky – Dr. Habil. (Eng.), Technical University of Denmark,  
Roskilde, Denmark  
A. S. Mukasyan – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., University of Notre Dame  
College of Engineering, Notre Dame, USA  
R. Orrù – Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of Cagliari, Cagliari, Italy  
F. Rustichelli – Dr. Sci. (Phys.), Prof., University of Marche, Ancona, Italy  
Zh. YongTing – Dr. Sci., Prof., Harbin Institute of Technology, Harbin,  
P.R. China

## Редакция журнала

Адрес: 119049, Москва,  
Ленинский пр-т, 4, стр. 1. НИТУ МИСИС

Тел.: +7 (495) 638-45-35. Эл. почта: [izv.vuz@misis.ru](mailto:izv.vuz@misis.ru)

Свидетельство о регистрации № ФС77-27955 от 12.04.2007 г.  
Перерегистрация 25.09.2020 г. ПИ № ФС77-79230



© НИТУ МИСИС, Москва, 2023



Статьи доступны под лицензией Creative Commons  
Attribution Non-Commercial No Derivatives

Ведущий редактор: А.А. Кудинова  
Выпускающий редактор: О.В. Соснина  
Дизайн и верстка: В.В. Расенец

Подписано в печать 14.03.2023. Формат 60×90 1/8  
Бум. офсетная № 1. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,5  
Заказ 16913. Цена свободная  
Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСИС  
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1  
Тел./факс: +7 (499) 236-76-17

# POWDER METALLURGY AND FUNCTIONAL COATINGS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL  
FOUNDED IN 2007  
FOUR ISSUES PER YEAR

<http://powder.misis.ru>

ISSN 1997-308X  
eISSN 2412-8767



Founder:  
National University of Science  
and Technology "MISIS"

Address: 4 Leninskiy Pros., Moscow 119049, Russian Federation

<http://www.misis.ru>

Editor-in-Chief

Evgeny A. Levashov

Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the RANS, NUST MISIS, Moscow, Russian Federation

Journal is included into the List of peer-reviewed scientific publications recommended by the Highest Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for publishing the results of doctoral and candidate dissertations. Abstracting/Indexing: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Ulrich's Periodicals Directory, VINITI Database (Abstract Journal).

## Editorial Board

- M. I. Alymov** – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the RAS, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences of the RAS, Chernogolovka, Russia  
**A. P. Amosov** – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Samara State Technical University, Samara, Russia  
**G. A. Bagliuk** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the NASU, IPMS NASU, Kiev, Ukraine  
**I. V. Blinkov** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia  
**M. V. Chukin** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia  
**H. Danning** – Prof., Dr. Sci., Vienna University of Technology, Vienna, Austria  
**B. Derin** – Assoc. Prof., Dr. Sci. (Phil.), Istanbul Technical University, Maslak, Istanbul, Turkey  
**V. Yu. Dorofeyev** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk, Russia  
**Yu. Estrin** – Prof., Dr. Sci. (Nat.), Monash University, Clayton, Australia  
**A. Ph. Ilyushchanka** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the NAS of Belarus, State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Belarus  
**Yu. R. Kolobov** – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the RAS, Chernogolovka, Russia  
**V. S. Komlev** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the RAS, Institute of Metallurgy of the RAS, Moscow, Russia  
**I. Konyashin** – Prof., Dr. Sci. (Econ.), Element Six GmbH, Burghaun, Germany  
**Yu. M. Korolyov** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Scientific and Technical Association "Powder Metallurgy", Moscow, Russia  
**V. I. Kostikov** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Corresp. Member of the RAS, NUST MISIS, Moscow, Russia  
**D. Yu. Kovalev** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences of the RAS, Chernogolovka, Russia  
**S. A. Kulinich** – Assoc. Prof., PhD (Chem.), Tokai University, Hiratsuka, Kanagawa, Japan  
**S. V. Kuzmin** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the RAS, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia  
**V. P. Kuznetsov** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia  
**Yu. V. Levinsky** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences of the RAS, Chernogolovka, Russia  
**A. E. Ligachyov** – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia  
**V. Yu. Lopatin** – Cand. Sci., NUST MISIS, Moscow, Russia  
**A. A. Lozovan** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, Russia  
**V. I. Lysak** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the RAS, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia  
**A. V. Makarov** – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the RAS, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia  
**L. L. Mishnaevsky** – Dr. Habil. (Eng.), Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark  
**A. S. Mukasyan** – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), University of Notre Dame College of Engineering, Notre Dame, USA  
**S. A. Oglezneva** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russia  
**S. S. Ordanian** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia  
**R. Orrù** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), University of Cagliari, Cagliari, Italy  
**I. B. Pantelev** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia  
**F. Peizhong** – Prof., Dr. Sci., China University of Mining and Technology, Xuzhou, P.R. China  
**C. Pengwan** – Prof., Dr. Sci., Beijing Institute of Technology, Beijing, P.R. China  
**M. I. Petrzhik** – Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia  
**Yu. S. Pogozhev** – Assoc. Prof., Cand. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia  
**V. V. Polyakov** – Prof., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Altai State University, Barnaul, Russia  
**A. A. Popovich** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Corresp. Member of the RANS, St. Petersburg State Polytechnical University (National Research University), St. Petersburg, Russia  
**S. E. Porozova** – Dr. Sci. (Eng.), Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russia  
**A. A. Rempel** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the RAS, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia  
**F. Rustichelli** – Prof., Dr. Sci. (Phys.), University of Marches, Ancona, Italy  
**S. D. Shlyapin** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, Russia  
**D. V. Shtansky** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), NUST MISIS, Moscow, Russia  
**P. A. Vityaz'** – Prof., Dr. Sci. (Eng.), Acad. of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus  
**A. A. Zaitsev** – Assoc. Prof., Cand. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow, Russia  
**Zh. YongTing** – Prof., Dr. Sci., Harbin Institute of Technology, Harbin, P.R. China  
**F. Zhengyi** – Prof., Dr. Sci., Wuhan University of Technology, Wuhan, P.R. China

## Editorial Staff

Address: NUST MISIS,  
build 1, 4, Leninskiy Pros., Moscow 119049, Russian Federation

Phone: +7 (495) 638-45-35. E-mail: [izv.vuz@misis.ru](mailto:izv.vuz@misis.ru)

Certificate of registration No. FS77-27955 (12.04.2007)

Re-registration PI No. FS77-79230 (25.09.2020)



PM & FC © NUST MISIS, Moscow, 2023



Articles are available under Creative Commons  
Attribution Non-Commercial No Derivatives

Leading Editor: A.A. Kudinova

Executive Editor: O.V. Sosnina

Layout Designer: V.V. Rasenets

Signed print 14.03.2023. Format 60×90 1/8  
Offset paper No. 1. Digital printing. Quires 10.5

Order 16913. Free price

Printed in the printing house of the MISIS Publish House  
4 bld. 1 Leninskiy Pros., Moscow, 119049 Russian Federation  
Phone/fax: +7 (499) 236-76-17

Содержание



Contents

## Теория и процессы формирования и спекания порошковых материалов

Мальцев И.М., Гетмановский Ю.А.

Получение и свойства проката из плакированных порошков НПП-80 и Нибон-20 ..... 5

Мариева М.А., Шацов А.А.

Прогнозирование концентрационной неоднородности порошковых магнитотвердых сплавов на основе системы Fe–Cr–Co–Mo и влияние добавок Sm на их магнитные свойства ..... 12

## Самораспространяющийся высокотемпературный синтез

Лазарев П.А., Бусурина М.Л.,  
Грядун А.Н., Сычев А.Е., Беликова А.Ф.

Получение слоевого (Ti–Al–Si)/(Ti–C)/Ti сплава методом СВС-прессования ..... 21

Вадченко С.Г., Вергунова Ю.С.,  
Рогачев А.С., Ковалев И.Д., Мухина Н.И.

Формирование продуктов при воспламенении, горении и плавлении смесей высокоэнтروпийного сплава FeNiCoCrCu с титаном и углеродом ..... 28

Горшков В.А., Милосердов П.А.,  
Ковалев Д.Ю., Боярченко О.Д.

СВС литых материалов в системе Mo–Al–C ..... 39

## Наноструктурированные материалы и функциональные покрытия

Брякунов С.В., Курлов А.С.

Микроструктура и фазовый состав твердых сплавов, изготовленных из нанокристаллической порошковой смеси WC–6мас.%Co с добавками C, Al и ZrC ..... 49

Черногор А.В., Блинков И.В.,  
Белов Д.С., Сергеев В.С., Демиров А.П.

Влияние никеля на состав, структуру и свойства покрытий Ti–Cr–N ..... 63

## Применение порошковых материалов и функциональных покрытий

Дворник М.И., Власова Н.М.

Сравнительный анализ эксплуатационной стойкости субмикронного твердого сплава WC–10Co, спеченного из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в масле ..... 75

## Theory and Processes of Formation and Sintering of Powder Materials

Mal'tsev I.M., Getmanovsky Yu.A.

Obtaining and properties of rolled products from clad powders NPG-80 and Nibon-20 ..... 5

Marieva M.A., Shatsov A.A.

Prediction of the concentration inhomogeneity of powder magnetic hard alloys based on the Fe–Cr–Co–Mo system and the effect of Sm additions on their magnetic properties ..... 12

## Self-Propagating High-Temperature Synthesis

Lazarev P.A., Busurina M.L.,

Gryadunov A.N., Sytshev A.E., Belikova A.F.

Fabrication of (Ti–Al–Si)/(Ti–C)/Ti – layered alloy by SHS pressing ..... 21

Vadchenko S.G., Vergunova Yu.S.,  
Rogachev A.S., Kovalev I.D., Mukhina N.I.

Formation of products upon ignition, combustion and melting of mixtures of high-entropy alloy FeNiCoCrCu with titanium and carbon ..... 28

Gorshkov V.A., Miloserdov P.A.,  
Kovalev D.Yu., Boyarchenko O.D.

SHS of cast materials in the Mo–Al–C system ..... 39

## Nanostructured Materials and Functional Coatings

Briakunov S.V., Kurlov A.S.

Microstructure and phase composition of hard alloys produced from nanocrystalline powder mixture WC–6wt.%Co with C, Al and ZrC additives ..... 49

Chernogor A.V., Blinkov I.V.,

Belov D.S., Sergevnnin V.S., Demirov A.P.

The influence of Ni on the composition, structure and properties of Ti–Cr–N coatings ..... 63

## Application of Powder Materials and Functional Coatings

Dvornik M.I., Vlasova N.M.

Comparative analysis of the tool life of submicron hard alloy WC–10Co sintered from powder obtained by electro discharge in oil ..... 75