

# ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬНАЯ  
АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК 2016 № 1

# ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК 2016 № 1

ЗАСНАВАЛЬНІК – НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

Часопіс выдаецца са студзеня 1956 г.

Выходзіць чатыры разы ў год

## СОДЕРЖАНИЕ

### К 85-ЛЕТИЮ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

<b>Гордиенко А. И., Михлюк А. И., Вегера И. И.</b> Новые направления развития технологий и оборудования индукционного нагрева .....	5
<b>Клубович В. В., Томило В. А., Марусич В. И., Хрущёв Е. В.</b> Ультразвуковая обработка металлических изделий и порошков .....	14
<b>Белый А. В., Жарин А. Л., Карпович А. Н., Тявловский А. К.</b> Работа выхода электрона и физико-механические свойства хромсодержащих ионно-легированных сталей .....	21
<b>Маркевич М. И., Чапланов А. М.</b> Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии .....	28
<b>Анисович А. Г.</b> Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования .....	36
<b>Щукин В. Я., Кожевникова Г. В.</b> Белорусская школа поперечно-клиновой прокатки .....	43
<b>Смягликов И. П., Селифанов С. О.</b> Энергетические параметры катодно-дуговой эрозионной плазмы в процессе синтеза алмазоподобных углеродных покрытий .....	51
<b>Латушкина С. Д., Жижченко А. Г., Романов И. М., Комаровская В. М.</b> Многокомпонентные защитные покрытия, осаждаемые вакуумно-дуговым методом .....	56
<b>Ласковнѳв А. П., Гарост А. И.</b> Использование железосодержащих материалов с органическими загрязнителями в качестве шихты при выплавке серых чугунов .....	62
<b>Чекан Н. М., Акула И. П.</b> Структура износостойких покрытий кабонитрида циркония .....	75
<b>Покровский А. И.</b> Развитие технологий пластического формообразования металлов с использованием промежуточных сред (гидродинамическое выдавливание, гидроударная штамповка) .....	80

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Федосюк В. М., Миргород Ю. А.** Исследование структуры и магнитных свойств наночастиц феррита кобальта, никеля и марганца, синтезированных в системе прямых мицелл ..... 93

## МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Прушак В. Я.** Особенности проявления горного давления в лавах с труднообрушаемой кровлей при бесцеликовой выемке Третьего калийного пласта Старобинского месторождения ..... 99

## ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Лаптёнок С. А., Мехдизадех Муждехи А., Бубнов В. П.** Трёхмерное моделирование средствами географических информационных систем в целях повышения эколого-экономической эффективности объектов энергетики ..... 106

## РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Пинчук В. Г., Короткевич С. В., Чикунов В. В., Ковалев Е. А.** Автоматизация спектрометра ферромагнитного резонанса ..... 111
- Аксенчик А. В., Кураев А. А., Киринович И. Ф.** Моделирование двух-, трехсекционных ЛБВ О-типа терагерцового диапазона частот ..... 119

---

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ 2016 № 1

Серия физико-технических наук

*На русском и белорусском языках*

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,  
свидетельство о регистрации № 391 от 18.05.2009

---

Компьютерная верстка Н. И. К а ш у б а

Здадзена ў набор 25.02.2016. Падпісана да друку 23.03.2016. Выхад у свет 29.03.2016. Фармат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Папера афсетная.

Друк лічбавы. Ум. друк. арк. 14,88. Ул.-выд. арк. 16,4. Тыраж 96 экз. Заказ 68.

Кошт нумару: індывідуальная падпіска – 102 900 руб.; ведамасная падпіска – 252 168 руб.

Выдавец і паліграфічнае выкананне:

Рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства «Выдавецкі дом «Беларуская навука». Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы, распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/18 ад 02.08.2013.

ЛП 02330/455 ад 30.12.2013. Вул. Ф. Скарыны, 40, 220141, г. Мінск.

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICO-TECHNICAL SERIES 2016 N 1

---

FOUNDED BY THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

The Journal has been published since January 1956

Issued four times a year

## CONTENTS

### ON THE 85<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF PHYSICAL TECHNICAL INSTITUTE OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

<b>Gordienko A. I., Mikhlyuk A. I., Viahera I. I.</b> Recent trends in induction heating technology and equipment. . .	5
<b>Klubovich V. V., Tamila V. A., Marusich V. I., Khrushchov E. V.</b> Ultrasonic processing of metal works and powders. . . . .	14
<b>Byeli A. V., Zharin A. L., Karpovich A. N., Tyavlovsky A. K.</b> Electron work function and physic-mechanical properties of chromium-containing ion-doped steels . . . . .	21
<b>Markevich M. I., Chaplanov A. M.</b> Structural transformations in thin metal films at pulse laser effect. . . . .	28
<b>Anisovich A. G.</b> Art of metallography: application of optical staining methods. . . . .	36
<b>Shchukin V. Ya., Kozhevnikova G. V.</b> Belarus cross-wedge rolling school of thought. . . . .	43
<b>Smyaglikov I. P., Selifanov S. O.</b> Energy characteristics of cathodic arc erosion plasma at synthesis of diamond-like carbon coatings . . . . .	51
<b>Latushkina S. D., Zhizhchenko A. G., Romanov I. M., Komarovskaya V. M.</b> Multicomponent protective coatings deposited by vacuum arc technique . . . . .	56
<b>Laskovnev A. P., Harast A. I.</b> Application of iron-containing materials and organic contaminants as charge at grey iron melting . . . . .	62
<b>Chekan N. M., Akula I. P.</b> Structure of wear-resistant zirconium carbonitride coatings . . . . .	75
<b>Pokrovsky A. I.</b> Development of plastic metal forming technologies with use of intermediate media (impact hydroforming and hydrodynamic extrusion.) . . . . .	80

### MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

<b>Fedosuk V. M., Mirgorod Yu. A.</b> Investigation of structure and magnetic properties of cobalt-nickel and manganese ferrites nanoparticles synthesized in direct micelles of sodium dodecyl sulphate system . . . . .	93
---	----

### MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

<b>Prushak V. Ya.</b> Particularities of exhibition of rock pressure in longwalls with poorly caving roof without pillar of excavation at the third layer of potassium salts of the Starobin deposit . . . . .	99
--	----

**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

**Laptyonok S. A., Mehdizadeh Muzhdehi A., Bubnov V. P.** 3D modelling by means of geographic information systems for increase of ecological-economic efficiency of power objects ..... 106

**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

**Pinchuk V. G., Korotkevich S. V., Chikunov V. V., Kovalyov E. A.** Automation of ferromagnetic resonance spectrometer ..... 111

**Aksenchyk A. V., Kurayev A. A., Kirinovich I. F.** Modelling of two-, threesection TWT of O-type of terahertz band frequencies..... 119

*А. И. ГОРДИЕНКО, А. И. МИХЛЮК, И. И. ВЕГЕРА*

## **НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: smto@tut.by*

Рассмотрены актуальные направления развития технологий и оборудования индукционного нагрева. Показаны возможности применения математического аппарата для моделирования процессов индукционного нагрева заготовок сложного переменного сечения из высоколегированных сталей. Рассмотрены аспекты разработки современных технологий индукционного нагрева под операции термообработки и деформации металла. Приведено описание конструкции и принципа работы современных автоматизированных комплексов индукционного нагрева.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, моделирование, технологии индукционного нагрева, автоматизированные комплексы.

*A. I. GORDIENKO, A. I. MIKHLIYUK, I. I. VIAHERA*

## **RECENT TRENDS IN INDUCTION HEATING TECHNOLOGY AND EQUIPMENT**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: smto@tut.by*

Relevant trends in induction heating technology and equipment are analyzed. Capability of application of mathematical tools in simulation of induction heating of high-alloy steel billets with composite variable cross-section is shown. Aspects of development of the modern technology of induction heating with a view to heat treatment and metal straining are examined. Designs and operating principles of modern automated complexes of induction heating are described.

*Keywords:* induction heating, simulation, induction heating technology, automated complexes.

*В. В. КЛУБОВИЧ<sup>1</sup>, В. А. ТОМИЛО<sup>2</sup>, В. И. МАРУСИЧ<sup>1</sup>, Е. В. ХРУЩЁВ<sup>1</sup>*

## **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И ПОРОШКОВ**

*<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: nil\_p@bntu.by*

Эксплуатационные качества упругих элементов изделий автомобильной и сельскохозяйственной техники во многом зависят от состояния поверхностного слоя. Так, прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, долговечность и надежность определяются состоянием поверхностного слоя изделия, с которого обычно начинается разрушение материала. Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием с наложением ультразвуковых колебаний большой мощности позволяет в поверхностных слоях изделий создать сжимающие остаточные напряжения и микро- и наноструктурное состояние. Предложены способы ультразвуковой обработки упругих пластин и внутренних поверхностей тел вращения, а также способы и устройства для диспергирования порошков с применением мощного ультразвука, разработанные авторами.

*Ключевые слова:* ультразвук, диспергирование, механоактивация, поверхностно-пластическое деформирование, волновод-концентратор.

*V. V. KLUBOVICH<sup>1</sup>, V. A. TAMILA<sup>2</sup>, V. I. MARUSICH<sup>1</sup>, E. V. KHRUSHCHOV<sup>1</sup>*

## **ULTRASONIC PROCESSING OF METAL WORKS AND POWDERS**

*<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
<sup>2</sup>Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: nil\_p@bntu.by*

Performance of elastic elements of automobile manufacturing and agricultural machinery is dependent on the state of the surface layer. Thus, strength, wear resistance, corrosion resistance, durability and reliability are determined by the state of surface layer of a product, which usually starts the destruction of material. Strengthening processing by superficial plastic deformation superimposed ultrasonic vibrations of high power allows the surface layers of products to create compressive residual stresses and micro- and nanostructured state. A method of ultrasonic treatment of the elastic plate and the inner surfaces of solids of revolution, developed by the authors, as well as ways and means for dispersing powders using powerful ultrasound are proposed.

*Keywords:* ultrasonic, dispersion, mechanoactivation, surface plastic deformation, sonotrode.

*А. В. БЕЛЫЙ<sup>1</sup>, А. Л. ЖАРИН<sup>2</sup>, А. Н. КАРПОВИЧ<sup>1</sup>, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ<sup>2</sup>*

### **РАБОТА ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

<sup>1</sup> *Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: vmo@tut.by,*

<sup>2</sup> *Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Исследовано изменение работы выхода электрона и ее локального распределения по поверхности применительно к ряду хромосодержащих сталей, обработанных концентрированными потоками ионов азота при различных температурах. Полученные результаты сопоставлены с данными исследования химического состава, микроструктуры и микротвердости изучаемых образцов, испытания стали на износ- и коррозионную стойкость. Обнаружена корреляция изменения значений работы выхода электрона, микроструктуры и физико-механических свойств поверхностных слоев. Показано, в частности, что максимальной скоростью коррозионного разрушения характеризуются участки поверхности с максимальным локальным значением работы выхода электрона. Возникающие при ионно-лучевой обработке дефекты строения создают локальные электрические неоднородности, которые существенно влияют на величину работы выхода электрона.

*Ключевые слова:* ионная имплантация, стали, работа выхода электрона, микроструктура, износостойкость, коррозионная стойкость

*A. V. BYELI<sup>1</sup>, A. L. ZHARIN<sup>2</sup>, A. N. KARPOVICH<sup>1</sup>, A. K. TYAVLOVSKY<sup>2</sup>*

### **ELECTRON WORK FUNCTION AND PHYSIC-MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMIUM-CONTAINING ION-DOPED STEELS**

<sup>1</sup> *Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: vmo@tut.by,*

<sup>2</sup> *Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Variation and local surface distribution of electron work function for a number of chromium steels bombarded with high-current density nitrogen ions beam at different temperatures have been investigated. Data obtained are compared with results of chemical composition analysis, analysis of microhardness and microstructure of blocks, data of wear and corrosion tests. Correlation between electron work function, microstructure and physical-mechanical properties of ion implanted surface layers has been established. It has been demonstrated that surface areas with the biggest local value of electron work function reveal the most intensive corrosion rupture. Ion beam induced structural defects create local electrical disturbances, which significantly influence electron work function.

*Keywords:* ion implantation, steels, electron work function, microstructure, wear resistance, corrosion resistance

*М. И. МАРКЕВИЧ, А. М. ЧАПЛАНОВ*

### **СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: a.chaplanov@gmail.com*

Рассмотрены особенности структурных превращений, происходящих в металлических пленках при импульсном лазерном воздействии, и получение наночастиц в жидкостях методом лазерной абляции. Рассмотрены движущие силы рекристаллизации, вопросы роста зерен, образования канавок термического травления, формирования пор. Отмечена перспективность таких исследований в области сверхкоротких импульсов воздействия.

*Ключевые слова:* структура, тонкие металлические пленки, импульсное лазерное воздействие, рекристаллизация.

*M. I. MARKEVICH, A. M. CHAPLANOV*

### **STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN THIN METAL FILMS AT PULSE LASER EFFECT**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: a.chaplanov@gmail.com*

Processes occurring in metal films by laser irradiation are reviewed. Driving force of recrystallization, grain growth issues, education grooves of thermal etching, the formation of pores are considered. The preparation of nanoparticles in liquids by laser ablation is also addressed.

*Keywords:* structure, the thin metal film, pulsed laser effect, recrystallization.

*А. Г. АНИСОВИЧ*

**ИСКУССТВО МЕТАЛЛОГРАФИИ:  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРАСТИРОВАНИЯ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
anna-anisovich@yandex.ru*

Рассмотрены методы оптического контрастирования в металлографии. Обсуждаются оптические эффекты на поверхности образцов при анализе структуры с применением апертурной диафрагмы, темнопольного освещения, поляризованного света и хроматического освещения. Проиллюстрировано применение дифференциально-интерференционного контраста для анализа сложных поверхностей.

*Ключевые слова:* оптическое контрастирование, поляризованный свет, темнопольная микроскопия, дифференциально-интерференционный контраст.

*G. ANISOVICH*

**ART OF METALLOGRAPHY: APPLICATION OF OPTICAL STAINING METHODS**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
anna-anisovich@yandex.ru*

Methods of optical staining are considered for metallography. Optical effects are reviewed for surfaces of samples during the analysis process using aperture diaphragm, dark-field illumination, polarized light and chromatic illumination. The application of differential interference contrast (DIC) is illustrated for composite surface analysis.

*Keywords:* optical staining, polarized light, dark-field microscopy, differential interference contrast

УДК 621.77

*В. Я. ЩУКИН, Г. В. КОЖЕВНИКОВА*

**БЕЛОРУССКАЯ ШКОЛА ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: fti@tut.by*

В настоящее время белорусская школа исследователей и технологов поперечно-клиновой прокатки признана одним из мировых лидеров по этому направлению. Описаны основные достижения белорусской школы поперечно-клиновой прокатки. Рассмотрены основные направления развития теории поперечно-клиновой прокатки. Представлены новые технологии и оборудование поперечно-клиновой прокатки.

*Ключевые слова:* пластическое деформирование, поперечно-клиновая прокатка, пластичность.

*V. Ya. SHCHUKIN, G. V. KOZHEVNIKOVA*

**BELARUS CROSS-WEDGE ROLLING SCHOOL OF THOUGHT**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: fti@tut.by*

At present Belarus school of thought that unites cross-wedge rolling researchers and manufacturing engineers is recognized as one of the world leading schools of thought in this field. Major achievements of Belarus school of thought have been described. Main tendencies of cross-wedge rolling theory development are investigated. New cross-wedge rolling technologies and equipment have been presented.

*Keywords:* plastic deforming, cross-wedge rolling, plasticity.

*И. П. СМЯГЛИКОВ, С. О. СЕЛИФАНОВ*

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАТОДНО-ДУГОВОЙ ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: ips.imaf@gmail.com*

Рассматривается катодно-дуговая углеродная плазма в вакууме и в атмосфере ацетилена при давлении от 0,2 до 2,0 Па в процессе нанесения алмазоподобных углеродных покрытий. Импульсно-периодические потоки плазмы генерировались в результате распыления графитового катода в четырехэлектродной дуговой системе с самовосстанавливающимся тонкопленочным токопроводом устройства поджига. С применением зондов Ленгмюра установлено, что подложка находится под ускоряющим плавающим потенциалом – (15–35) В. Показано, что функция распределения электронов по энергиям является максвелловской с температурой электронов около 50 эВ. Скорость самых высокоэнергетических электронов плазменного потока превышает 30 км/с, в то время как скорость направленного движения плазмы составляет 20 км/с в вакууме и 8 км/с в атмосфере ацетилена. При импульсном дуговом разряде в атмосфере ацетилена наблюдается существенное уменьшение энергии ионов углерода от 30 до 4 эВ по сравнению с вакуумным катодно-дуговым разрядом.

*Ключевые слова:* плазма, ацетилен, алмазоподобные углеродные покрытия, зонд, температура электронов.

*I. P. SMYAGLIKOV, S. O. SELIFANOV*

## **ENERGY CHARACTERISTICS OF CATHODIC ARC EROSION PLASMA AT SYNTHESIS OF DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: ips imaf@gmail.com*

A cathode arc carbon plasma in a vacuum as well as in an atmosphere of acetylene at a pressure of 0.2 to 2.0 Pa during the deposition of diamond-like carbon coatings is considered. Pulse-periodic plasma fluxes are generated as a result of graphite cathode sputtering in a four-electrode arc system with self-recovering thin-film conductor of ignition device. With the use of Langmuir probes it was found that the substrate is under accelerating floating potential of – (15–35) V. The electron energy distribution function was found to be Maxwellian one with electron temperature of about 50 eV. Velocity of the most high-energy electrons of plasma flux exceeds 30 km/s while the velocity of directional motion of plasma amounts to 20 km/s in vacuum and 8 km/s in acetylene gas. So when applying a pulsed arc in acetylene atmosphere the noticeable decrease of carbon ions energy from 30 down to 4 eV is observed in comparison with a vacuum cathodic arc.

*Keywords:* plasma, acetylene, diamond-like carbon coatings, probe, electron temperature.

*С. Д. ЛАТУШКИНА, А. Г. ЖИЖЧЕНКО, И. М. РОМАНОВ, В. М. КОМАРОВСКАЯ*

## **МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ОСАЖДАЕМЫЕ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь, e-mail: phti@tut.by*

Для формирования защитных наноструктурированных покрытий предложен способ осаждения из сепарированных многокомпонентных потоков. Изучено влияние элементного состава покрытий на их структурно-механические характеристики. Определено, что многокомпонентные покрытия характеризуются плотной, ультрамелкозернистой структурой, обладают улучшенными антифрикционными и антикоррозионными свойствами по сравнению с покрытиями из нитрида титана.

*Ключевые слова:* плазма, многокомпонентные покрытия, структура, микротвердость, коэффициент трения, коррозионная стойкость.

*S. D. LATUSHKINA, A. G. ZHIZHCENKO, I. M. ROMANOV, V. M. KOMAROVSKAYA*

## **MULTICOMPONENT PROTECTIVE COATINGS DEPOSITED BY VACUUM ARC TECHNIQUE**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Belarus, e-mail: phti@tut. by*

A way of generation of protective nanostructural coatings from separated multicomponent plasma flows is suggested. The influence of elemental composition on their structure-mechanical characteristics was studied. It's found, multicomponent coatings are characterized by the dense super fine-grained structure, possess enhanced antifriction and anticorrosion properties in comparison with nitride titanium coatings.

*Keywords:* plasma, multicomponent coatings, structure, microhardness, friction factor, corrosion resistance.



*А. П. ЛАСКОВНЁВ<sup>1</sup>, А. И. ГАРОСТ<sup>2</sup>*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ ЗАГРЯЗНИТЕЛЯМИ В КАЧЕСТВЕ ШИХТЫ ПРИ ВЫПЛАВКЕ СЕРЫХ ЧУГУНОВ**

<sup>1</sup>*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*  
<sup>2</sup>*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,*  
*e-mail: garost-51@tut.by; garost51@mail.ru*

Приведены новые научные данные о процессах химического твердения металлосодержащих отходов с органическим загрязнителем (замасленная чугунная стружка, окалина и шлифовочные шламы с содержанием масла до 10 мас. %) при одновременном окислении масел и переводе его составляющих в экологически более чистое состояние путем пакетирования (без применения высоких давлений), сопровождающегося образованием основных солей типа  $(\text{MgOH})_3\text{PO}_4$  либо  $(\text{MgOHAIO}_2 + (\text{MgOH})_2\text{SiO}_3)$  при совместном смешивании избыточных количеств глины (щелочная среда), недостатке магнезита и наличии кислой среды. При контакте железа с кислотой происходит не только разрушение рыхлой оксидной пленки, но и образование более плотной фосфатной пленки (фосфатирование), способствующей хорошей адгезии и обеспечению требуемой прочности пакетов. Ввод в завалку при выплавке чугуна по разработанной технологии до 30 мас.% пакетов из железосодержащего материала с органическим загрязнителем обеспечивает увеличение до 70% количества перлита в металлической основе чугуна при одновременном повышении его дисперсности до Пд 1,4 – Пд 0,3, а также образование значительного количества мелкодисперсных упрочняющих фаз.

*Ключевые слова:* железоуглеродистые сплавы, чугун, металлосодержащие отходы с органическим загрязнителем, техногенные отходы изделий из полимерных материалов, структурообразование, микросостав и морфология неметаллических включений.

*A. P. LASKOVNEV<sup>1</sup>, A. I. HARAST<sup>2</sup>*

## **APPLICATION OF IRON-CONTAINING MATERIALS AND ORGANIC CONTAMINANTS AS CHARGE AT GREY IRON MELTING**

<sup>1</sup>*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,*  
<sup>2</sup>*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,*  
*e-mail: garost-51@tut.by; garost51@mail.ru*

New scientific data are presented considering chemical hardening of metal-containing wastes with organic contaminants (oily cast iron turnings, scale, and polishing sludge with oil content up to 10 mass%. If oils are oxidized and their components are simultaneously transformed into cleaner condition by baling (without high pressure), it is accompanied by formation of basic salts such as  $(\text{MgOH})_3\text{PO}_4$  or  $(\text{MgOHAIO}_2 + (\text{MgOH})_2\text{SiO}_3)$  at co-mixing of excessive amounts of clay (alkaline), lack of magnesite and the acidic medium. When iron contacts the acid, light acid film is decomposed, and a denser phosphate film is formed (phosphate), it promotes good adhesion and provides the required strength of bales. Introducing up to 30% of bales with metal-containing wastes with organic contaminants into charge of furnace according to the developed technology provides an increase up to 70% of the amount of pearlite in the metal base of iron while its dispersion is improving up to 1.4Pd – 0.3Pd, and a significant amount of fine hardening phases is formed.

*Keywords:* iron-carbon alloys, cast iron, metal-containing wastes with organic contaminants, industrial waste products from polymer materials, structure formation, microcomposition and morphology of non-metallic inclusions.

*Н. М. ЧЕКАН, И. П. АКУЛА*

## **СТРУКТУРА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ КАРБОНИТРИДА ЦИРКОНИЯ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,*  
*e-mail: pec@bas-net.by*

Исследована кристаллическая структура покрытий карбонитрида циркония, полученных катодно-дуговым осаждением в реакционной среде смеси газов азота и ацетилена. Методами рентгенографии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показано, что структура покрытия образована ультрадисперсной  $\delta$ -фазой карбонитрида циркония и аморфного алмазоподобного углерода с большим содержанием  $\text{sp}^3$ -связанных атомов. Покрытия сильно текстурированы с осью текстуры  $\langle 111 \rangle$ . Показано, что на степень текстурирования значительно влияет материал основы, в качестве которой использовалась инструментальная сталь X12M и твердый сплав ВК6.

*Ключевые слова:* карбонитрид циркония, нанокпозиционное покрытие, текстура

*N. M. CHEKAN, I. P. AKULA*

## **STRUCTURE OF WEAR-RESISTANT ZIRCONIUM CARBONITRIDE COATINGS**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: pec@bas-net.by*

A structure of zirconium carbonitride coatings obtained by an arc cathodic deposition in the medium of reactant mixture of nitrogen and acetylene was investigated. Using *X*-ray diffraction and *X*-ray photoelectron spectroscopy it was shown that the coatings consist of both ultra dispersive  $\delta$  phase zirconium carbonitride and amorphous carbon containing considerable amount of  $sp^3$  bonds. The coatings were textured greatly with texture axis (111). The texture degree influenced a substrate material like tool steel X12M and cemented carbide BK6.

**Keywords:** zirconium carbide, nanocomposite coating, texture

УДК 539.214 + 621.7

*А. И. ПОКРОВСКИЙ*

## **РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СРЕД (ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ, ГИДРОУДАРНАЯ ШТАМПОВКА)**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: arturu@tut.by*

Описаны технологии пластического формообразования металлов с использованием жидких и псевдожидких сред применительно к труднодеформируемым, малопластичным и труднообрабатываемым материалам, разработанные в Физико-техническом институте НАН Беларуси. Рассмотрены два технологических направления: 1) горячее гидродинамическое выдавливание изделий из чугуна с применением в качестве квазижидкой среды электродного графита, 2) холодная импульсная гидроударная штамповка листовых материалов с использованием жидких (станочная эмульсия) и псевдожидких (полиуретан) сред. Показаны преимущества каждого из направлений и представлены результаты наиболее значимых достижений института в данных областях за последние годы.

**Ключевые слова:** гидродинамическое выдавливание, чугун, гидроударная штамповка, ниобий.

*A. I. POKROVSKY*

## **DEVELOPMENT OF PLASTIC METAL FORMING TECHNOLOGIES WITH USE OF INTERMEDIATE MEDIA (IMPACT HYDROFORMING AND HYDRODYNAMIC EXTRUSION)**

*Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: arturu@tut.by*

Development of metal forming technologies with the use of fluid or pseudo-fluid media in application to difficult-to-deform and low-plastic materials is described. Two technological directions are considered: (i) hot hydrodynamic extrusion of cast iron articles using electrode graphite as a pseudo-fluid medium, and (ii) cold impact hydroforming of sheet materials using a liquid (a machining emulsion) and pseudo-fluid (polyurethane) medium. The most important achievements of the Physical Technical Institute in both of these directions and their advantages are described.

**Keywords:** impact hydroforming, cast iron, hydrodynamic extrusion, niobium.

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

УДК 537.622:538.216.2:544.653

*В. М. ФЕДОСЮК, Ю. А. МИРГОРОД*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА, НИКЕЛЯ И МАРГАНЦА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СИСТЕМЕ ПРЯМЫХ МИЦЕЛЛ ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТА НАТРИЯ**

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
Минск, Беларусь, e-mail: fedosuk@iftt.bas-net.by,  
Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия, e-mail: yu\_mirgorod@mail.ru*

Представлены результаты исследования кристаллической структуры и магнитных свойств наночастиц ферритов переходных металлов (кобальт, никель, марганец), синтезированных унифицированным способом с использованием прямых мицелл додецилсульфата натрия. Кристаллическая структура образцов исследована методом дифракции рентгеновских лучей на программно-аппаратном комплексе ДРОН-3М (в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении). Размер частиц образцов исследован методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEOL JEM-1011 (ускоряющее напряжение 100 кВ). Все порошки содержат наночастицы одинакового размера в пределах 2–6 нм. Магнитные свойства образцов оценены по температурным и полевым зависимостям удельной намагниченности. Все образцы проявляют свойства суперпарамагнетиков с различными температурами блокировки ниже 45 К.

*Ключевые слова:* феррит-шпинель; наночастицы; кристаллическая структура; магнитные свойства; мицеллы.

*V. M. FEDOSUK, Yu. A. MIRGOROD*

### **INVESTIGATION OF STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF COBALT-NICKEL AND MANGANESE FERRITES NANOPARTICLES SYNTHESIZED IN DIRECT MICELLES OF SODIUM DODECYL SULPHATE SYSTEM**

*Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: fedosuk@iftt.bas-net.by  
South-West State University, Kursk, Russia, e-mail: yu\_mirgorod@mail.ru*

Results of investigation of the crystal structure and magnetic properties of the nanoparticles of transition metals ferrites (cobalt, nickel, manganese) synthesized by unified methods using direct sodium dodecyl sulfate micelles are presented. Crystal structure of the samples was investigated by X-ray diffraction on DRON-3M (in the  $\text{CuK}_\alpha$ -radiation). Particle size was investigated by transmission electron microscopy on microscope JEOL JEM-1011 (accelerating voltage 100 kV). All powders contain nanoparticles of the same size in the range 2–6 nm. Magnetic properties of the samples were estimated from temperature and field dependences of the magnetization. All samples exhibit properties of superparamagnets with different blocking temperatures below 45 K.

*Keywords:* ferrites spinel, nanoparticles, crystal structure, magnetic properties, micelles.

УДК 622.831.1; 622.285

*В. Я. ПРУШАК*

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЛАВАХ С ТРУДНООБРУШАЕМОЙ КРОВЛЕЙ ПРИ БЕСЦЕЛИКОВОЙ ВЫЕМКЕ ТРЕТЬЕГО КАЛИЙНОГО ПЛАСТА СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,  
Солигорск, Беларусь,  
e-mail: ipr@sipr.by*

Представлены результаты исследования состояния и нагруженности призабойного пространства в селективных и валовых лавах с труднообрушаемой кровлей Третьего калийного пласта Старобинского месторождения. Выявлена зависимость основных показателей проявления горного давления от скорости подвигания очистных забоев. Установлен характер распределения горного давления по длине очистных забоев.

*Ключевые слова:* горное давление, труднообрушаемая кровля, лава, Старобинское месторождение калийных солей, пласт, выемка породы.

V. Ya. PRUSHAK

**PARTICULARITIES OF EXHIBITION OF ROCK PRESSURE IN LONGWALLS  
WITH POORLY CAVING ROOF WITHOUT PILLAR OF EXCAVATION AT THE THIRD LAYER  
OF POTASSIUM SALTS OF THE STAROBIN DEPOSIT**

*Closed Joint Stock Company «Soligorsk Institute for Problems of Resource's Saving  
with Experienced Production», Soligorsk, Belarus,  
e-mail: ipr@sipr.by*

Results of a study of state and load of near-the-longwall space in selective and gross longwalls with poorly caving roof without pillar of excavation at the third layer of potassium salts of the Starobin deposit are presented. The dependence of the main indicators of exhibition of rock pressure on mining speed is obtained. The nature of pressure distribution along the length of excavation is determined.

*Keywords:* mountain pressure, poorly caving roof, longwall, the Starobin potash deposit, layer, the excavation of the rock.

УДК 504.06:51–74

*С. А. ЛАПТЁНОК<sup>1</sup>, А. МЕХДИЗАДЕХ МУЖДЕХИ<sup>1</sup>, В. П. БУБНОВ<sup>2</sup>*

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ**

*<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: 267413@mail.ru,*

*<sup>2</sup>Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
в области газоснабжения «ГАЗ-ИНСТИТУТ», Минск, Беларусь, e-mail: vladilen3224@yandex.ru*

Изложена методика применения технологии географических информационных систем для объемного моделирования процесса распространения поллютантов в атмосферном воздухе. Представлена объемная пространственная модель процесса промышленного загрязнения атмосферного воздуха.

*Ключевые слова:* атмосферный воздух; промышленное загрязнение; географические информационные системы; трехмерное пространственное моделирование.

*S. A. LAPTYONOK<sup>1</sup>, A. MEHDIZADEH MUZHDEHI<sup>1</sup>, V. P. BUBNOV<sup>2</sup>*

**3D MODELLING BY MEANS OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS  
FOR INCREASE OF ECOLOGICAL-ECONOMIC EFFICIENCY OF POWER OBJECTS**

*<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: 267413@mail.ru,*

*<sup>2</sup>Gas-Institute, the state Institute of Retraining and Professional Development of gas-service staff,  
Minsk, Belarus, e-mail: vladilen3224@yandex.ru*

A method of application of GIS-technology for space 3D-modelling of process atmosphere pollution was proposed. A space 3D-modell of process of industrial pollution of air was presented.

*Keywords:* atmosphere; industrial pollution; geographic information systems; 3D spatial modelling.

УДК 620.17

*В. Г. ПИНЧУК<sup>1</sup>, С. В. КОРОТКЕВИЧ<sup>2</sup>, В. В. ЧИКУНОВ<sup>3</sup>, Е. А. КОВАЛЕВ<sup>1</sup>*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СПЕКТРОМЕТРА ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА**

*<sup>1</sup>Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь,  
e-mail: eakovalev@gsu.by,*

*<sup>2</sup>РУП «Гомельэнерго», Гомель, Беларусь, e-mail: korotsv@tut.by,*

*<sup>3</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: chivlad\_by@mail.ru*

Описан метод ферромагнитного резонанса (ФМР). Обоснована методика изучения дислокационной структуры поверхности ферромагнетиков на глубине  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м методом ФМР. Описаны принципиальная и электрическая схемы разработанного радиоспектрометра ФМР. С использованием разработанного электронного устройства осуществлено монотонное изменение величины постоянного магнитного поля на индуктивной катушке спектрометра ФМР путем варьирования величины напряжения от 1 до 300 В. Разработано программное обеспечение с применением аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и осуществлена автоматизация регистрируемых параметров.

*Ключевые слова:* поверхность, дислокационная структура, ферромагнитный резонанс, автоматизация, ширина резонансной линии, плотность дислокаций, периодичность прерывных характеристик, оцифровка аналоговых сигналов, микроконтроллер.

V. G. PINCHUK<sup>1</sup>, S. V. KOROTKEVICH<sup>2</sup>, V. V. CHIKUNOV<sup>3</sup>, E. A. KOVALEV<sup>1</sup>

#### **AUTOMATION OF FERROMAGNETIC RESONANCE SPECTROMETER**

<sup>1</sup>Gomel State University of F. Skoriny, Gomel, Belarus, e-mail: eakovalev@gsu.by,

<sup>2</sup>RUP Gomelenergo, Gomel, Belarus, e-mail: korotsv@tut.by,

<sup>3</sup>A. V. Likov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: chivlad\_by@mail.ru

A method of ferromagnetic resonance (FMR) is described. It has been verified and substantiated that the parameters of FMR can be used for studying of dislocation structure of surface of ferromagnetics at depth of  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  m. The schematic and the electric circuit of the FMR radiospectrometer is described. The monotonous change of magnetic field of inductive coil of FMR spectrometer by change of tension from five to three hundred volts is carried out. A software is developed and with use of the analog-digital converter (ADC) automation of the registered parameters is carried out.

*Keywords:* surface, dislocation structure, ferromagnetic resonance, automation, width of the resonant line, density of dislocations, frequency of strength characteristics, digitization of analog signals, microcontroller.

УДК 621.385.6

A. B. АКСЕНЧИК, А. А. КУРАЕВ, И. Ф. КИРИНОВИЧ

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХ-, ТРЕХСЕКЦИОННЫХ ЛБВ О-ТИПА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,  
e-mail: aksenchik@bsuir.by

Проведен анализ физических процессов в ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с последовательным и параллельным расположением секций относительно электронных лучей. Отмечены особенности и преимущества различных конструкций усилителей. Показано, что расчетный коэффициент усиления двух- и трехсекционных ЛБВ может достигать 25–60 дБ в диапазоне частот 0,14–3 ТГц.

*Ключевые слова:* терагерцовый, лампа бегущей волны, ЛБВ, волнообразно изогнутый прямоугольный волновод, двухсекционный, усилитель

A. V. AKSENCHYK, A. A. KURAYEV, I. F. KIRINOVICH

#### **MODELLING OF TWO-, THREESECTIONS TWT OF O-TYPE OF TERAGERTS BAND FREQUENCIES**

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,  
e-mail: aksenchik@bsuir.by

An analysis of physical processes in TWT on folded waveguide with a consecutive and parallel arrangement of sections concerning electronic beams is carried out. Features and advantages of different construction of amplifiers are noted. It is shown, that the calculated gain of two-and threesections TWT can reach 25–60 dB in the band of frequencies 0,14–3 THz.

*Keywords:* teragerts, traveling wave tube, TWT, folded waveguide, two-section, amplifier