|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **National Academy of Sciences of Belarus**  **Department of Physical and Technical Sciences**  **Национальная академия наук Беларуси**  **Отделение физико-технических наук** |  | **Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research**  **Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований** |  |
|  | **Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus**  **Институт прикладной физики НАН Беларуси** |  | **Belarusian State University**  **Physics Department** **Белорусский государственный университет**  **Физический факультет** |  |
| **ABSTRACTS**  **of the International**  **“Akulov Workshop”**  **АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ**  **Международного семинара**  **“Акуловские чтения”** | | | | |

**Minsk, Belarus Минск, Беларусь**

**15-16. 12. 2020**

UDK 51.001: 621.001

**Akulov Workshop**: abstracts of the International Workshop (Minsk, Belarus, on December 15-16, 2020) / National Academy of Sciences of Belarus [et al.]; Ed. A.P. Laskovnev [et al.]. – Minsk: Belaruskaya navuka, 2020.- p,

The abstracts of papers presented at the International Workshop devoted to the 120th anniversary of Professor Nikolai S. Akulov’s birthday include recollection of his pupils and followers about his personality and fundamental research on ferromagnetism along with the results of research on magnetic properties of a variety of materials, magnetic measurements, magnetic anisotropy and ferromagnetic resonance, current problems in nondestructive inspection and testing, theories of diffusion, dislocations and phase transformations in materials, and application of magnetic fields to surface treatment and strengthening of machine parts.

УДК 51.001: 621.001

**Акуловские чтения**: сборник аннотаций докладов Международного семинара (Минск, 15-16 декабря 2020г.) / Нац. акад. Наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.П. Ласковнев [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2020. - с.

Аннотации презентаций, представленных на международном семинаре, посвященном 120-летию со дня рождения Николая Сергеевича Акулова, включают воспоминания его учеников и последователей о его личности и фундаментальных исследованиях по ферромагнетизму, результаты исследований по магнитным свойствам различных материалов, магнитным измерениям, магнитной анизотропии и ферромагнитному резонансу, современным проблемам неразрушающего контроля и диагностики, теориям диффузии, дислокаций и фазовых превращений в материалах, а также применения магнитных полей для обработки и упрочнения поверхностей деталей.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**CONTENT**

|  |  |
| --- | --- |
| **Труды Н.С.Акулова – основополагающие работы по ферромагнетизму**…………..  В.Л. Венгринович  Институт прикладной физики НАН Беларуси | 9 |
| **N.S.Akulov’ works as fundamentals of ferromagnetism**……………………………....  V.L. Vengrinovich  Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 10 |
| **Н.С. Акулов - основатель кафедры магнетизма** **Московского государственного университета**………………………………………………………………………………..  Н.С. Перов  Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  **N. S. Akulov as founder of the Department of Magnetism at the Lomonosov Moscow State University**…………………………………………………………………………..…  Nikolai Perov  M.V. Lomonosov Moscow State University | 11  11 |
| **ФЕРРОМАГНЕТИЗМ И МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ**  **FERROMAGNETISM AND MAGNETIC ANISOTROPY** |  |
| **Гистерезисные поверхности как инструмент повышения точности магнитных измерений**…………………………………………………………………………………...  И.Т. Скурту, И.И. Брановицкий  Институт прикладной физики НАН Беларуси  **Hysteresis surfaces as a tool for increasing the accuracy of magnetic measurements**….  I.T. Skurtu, I.I. Branovitsky  Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 12  12 |
| **Оценка степени магнитной анизотропии в ферромагнитных сталях и сплавах на основе магнитошумового и импульсного магнитного методов**……………………  В.Н. Бусько, А.А. Осипов  Институт прикладной физики НАН Беларуси  **Estimation of the degree of magnetic anisotropy in ferromagnetic steels and alloys based on magnetic noise and pulsed magnetic methods**…………………………………..  V.N. Busko, A.A. Osipov  Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 13  14 |
| **Прямая и обратная задача ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пластинах с одноосной магнитной анизотропией**………………..  А.О. Шаплов, А.С.Гаркун, Р.Г. Шуляковский, М.Н. Невмержицкий  Институт прикладной физики НАН Беларуси  **Direct and inverse problem of ferromagnetic resonance in thin ferromagnetic plates with uniaxial magnetic anisotropy**…………………………………………………………  A.O. Shaplov\*, A.S. Garkun, R.G. Shulyakovsky, M.N. Nevmerzhitsky  Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 15  15 |
| **Влияние условий cинтеза на структуру, магнитные и магнитокалорические свойства субмикронных частиц иттриевого феррита, синтезированных для магнитотермии**……………………………………………………………………………..  О.В.Костенко1\*, Т.Ю.Киселева1, Ж.Нармандах2, У.Энхнаран2, П.Ю.Тяпкин3, С.И.Жолудев1, И.П.Иваненко1, Г.П.Марков3, Т.Ф.Григорьева4, Д.Сангаа2, А.С.Илюшин1  1Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет  2Институт физики и технологии Монгольской академии наук,  3Институтфизики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН,  4Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН  **Influence of synthesis conditions on the structure, magnetic and magnetocaloric properties of submicron yttrium ferrite particles synthesized for hyperthermia**……….  O.V.Kostenko1\*, T.Yu.Kiseleva1\*\*, D.Sangaa2, J.Narmandakh2, U.Enkhnaran 2, P.Yu.Tyapkin3, S.I.Zholudev4, I.P.Ivanenko1 , G.P.Мarkov4, T.F.Grigoreva3, А.S.Ilyushin1  1 M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty,  2Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Science,  3Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of SB of Russian Academy of Sciences,  4Smidt’s institute of the physics of the earth, Russian Academy of Sciences | 16  16 |
| **Исследование взаимосвязи структуры и магнитных свойств в механосинтезированных композитах (100-***х***) СВМПЭ/***х***MgFe2O4 методами Рамановской и Мессбауэровской спектроскопии**……………………………………  Т.Ю.Киселева1\*, Т.Ф.Григорьева2, П.Ю.Тяпкин2, М.В.Ильин1, Е.В.Лазарева1, Г.П.Марков3, И.П.Иваненко1, С.В.Восмериков2, Е.Т.Девяткина2, Е.В.Якута1, Д.Сангаа4, A.C.Илюшин1  1Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет  2Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  3Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН,  4Институт физики и технологии Монгольской академии наук  **Raman and Mössbauer spectroscopy investigation of the relationship between structure and magnetic properties in mechanically synthesized (100-*x*) UHMWPE / *x*MgFe2O4 composites**………………………………………………………………………  T.Yu. Kiseleva1\*, T.F. Grigoreva2, P.Yu. Tyapkin2, M.V.Il’in1, E.V. Lazareva1, G.P. Markov3, I.P. Ivanenko1, S.V. Vosmerikov2, E.T. Devyatkina2, E.V. Yakuta1 , D. Sangaa4, and A.S. Ilyushin1  1 M.V. Lomonosov Moscow State University, Physical faculty,  2Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  3Smidt’s institute of the physics of the earth, Russian Academy of Sciences,  4Institute of physics and technology, Mongolian Academy of Science | 17  18 |
| **Управление процессами магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки поверхностей деталей**………………………………………….  С.А. Чижик1, Л.М. Акулович2, М.Л. Хейфец3\*,С.А Клименко4, В.И. Лавриненко4,  В.С. Майборода5, А.И. Дикусар6, С. Ивашку6, Н. Казак6  1Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси,  2Белорусский государственный аграрный технический университет  3Институт прикладной физики НАН Беларуси,  4Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины  5Национальный технический университет Украины "КПИ имени Игоря Сикорского"  6Институт прикладной физики Академии наук Молдовы  **Control of magnetic-electric processes of hardening and magnetic-abrasive machining of surfaces**……………………………………………………………………………………  S.A. Chizhik1, L.M. Akulovich2, M.L. Kheifetz3\*, S.A. Klimenko4, V.I. Lavrinenko4,  V.S. Mayboroda5, A.I. Dikusar6, S. Ivascu6, N. Kazak6  1A.V.Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus,  2Belarusian State Agricola Technical University,  3 Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus  4V.N.Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine,  5 National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  6 Institute of Applied Physics, Academy of Sciences of Moldova | 19  19 |
| **МЕТАЛЛОФИЗИКА И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ**  **PHYSICS OF METALS AND PHASE TRANSITIONS** |  |
| **4D компьютерная модель T-x-y-z диаграммы Fe-Ni-Co-Cu**…………………………  M.Д. Парфенова, В.И. Луцык\*, В.П. Воробьева, A.Э. Зеленая  Институт физического материаловедения СО РАН.  **4D сomputer model of T-x-y-z diagram Fe-Ni-Co-Cu**……………………………………  M.D. Parfenova, V.I. Lutsyk\*, V.P. Vorobjeva, A.E. Zelenaya  Institute of Physical Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences | 21  21 |
| **Топологические фазовые переходы в графено-подобных материалах**…………….  Г.В. Грушевская  Белорусский государственный университет, физический факультет  **Topological phase transitions in graphene-like materials**………………………………..  H.V. Grushevskaya\*  Belarusian state university, Physics Faculty | 22  22 |
| **Геометродинамическая характеризация фазовых переходов в ленгмюровских монослоях по поведению сжимаемости**…………………………………………………  Г.В. Грушевская, Н.Г. Крылова\*, И.В. Липневич  Белорусский государственный университет, физический факультет  **Geometrodynamic characterization of phase transitions in Langmuir monolayers by compressibility behavior**……………………………………………………………………  [H.V. Grushevskaya](https://www.researchgate.net/profile/Halina_Grushevskaya_krylova),·[N.G. Krylova](https://www.researchgate.net/profile/Nina_Krylova)\*,·[I.V. Lipnevich](https://www.researchgate.net/researcher/2046198154_I_V_Lipnevich)  Belarusian state university, Physics Faculty | 22  23 |
| **Физико-химическое моделирование фазового разделения в коррозионностойких высокохромистых сталях для деталей парогенераторов**……………………………  С.В. Бобырь\*, Д.В. Лошкарев  Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины  **Physicochemical modeling of phase separation in corrosion-resistant high-chromium steels for steam generator parts**…………………………………………………………….  S.V. Bobyr\*, D.V. Loshcarev  Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine | 23  24 |
| **Анализ количества остаточного аустенита в структуре стальных валков для листовой прокатки**………………………………………………………………………...  С. В. Бобырь1\*, С. С. Захарчук2, И. Ю. Приходько1, П. В. Крот3  1Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины  2ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»  3Вроцлавский университет науки и технологий  **Analysis of the amount of retained austenite in the structure of steel rolls for sheet rolling**…  S. V. Bobyr1\*, S. S. Zakharchuk2, I. Yu. Prikhodko1, P. V. Krot3  Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,  2PJSC "Novokramatorsk Machine Building Plant"  3Wroclaw University of Science and Technology | 24  25 |
| **Разупрочняющая термическая обработка проволоки сварочного назначения из кремнемарганцевой стали**………………………………………………………………...  В.А. Луценко\*, Т.Н. Голубенко, О.В. Луценко  Институт черной металлургии им З.И.Некрасова НАН Украины,  **Softening heat treatment of the welding wire of silicon-manganese steel**………………..  V.A. Lutsenko\*, T.N. Golubenko, O.V. Lutsenko  Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine | 26  26 |
|  |  |
| **ДИФФУЗИЯ, ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**  **И ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ**  **DIFFUSION, DISLOCATIONS AND PROBLEM OF STRENGTH** |  |
| **Теория твердофазной диффузии в металлах, сплавах и полупроводниках при получении передовых материалов**………………………………………………………  Б.Б. Хина  Физико-технический институт НАН Беларуси  **Theory of solid-state diffusion in metals, alloys and semiconductors at synthesis of advanced materials**………………………………………………………………………….  B.B. Khina  Physicotechnical Institute, National Academy of Sciences of Belarus | 27  27 |
| **О точно и квази-точно решаемых уравнениях диффузии и Фоккера-Планка во внешних полях**……………………………………………………………………………...  Г.Г. Крылов\*, В.А. Гайсенок  Белорусский государственный университет, физический факультет  **On exactly and quasi-exactly solvable diffusion and Fokker-Planck equations in external field**…………………………………………………………………………………  G.G. Krylov\* and V.A. Gaisyonok  Belarusian state university, Physics Faculty | 28  28 |
| **Расчет равновесной концентрации вакансий с использованием информации преобразования**…………………………………………………………………………….  А.Г. Колмаков 1\*, М.Л. Хейфец 2  1Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  2Институт прикладной физики НАН Беларуси,  **Calculation of equilibrium vacancy concentration using transformation information**...  A.G. Kolmakov 1\*, M.L. Kheifetz2  1A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences,  2 Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 29  30 |
| **Склерометрия ионно-плазменных покрытий на основе хрома на подложках из стали 42CrMo4**……………………………………………………………………………...  А.А. Миневич\*  Ганноверский центр триботехнологии,  **Scratch testing of chromium based PVD coatings on the steel 42CrMo4 substrates**  A.A. Minewitsch\*……………………………………………………………………………..  TTZH Tribologie & Hochtechnologie GmbH | 31  31 |
| **Испытания прибора ИИК НТ-800 для оценки повторяемости и воспроизводимости результатов измерений**……………………………………………  А.Ю. Кутепов, А.П. Крень, Г.А. Ланцман  Институт прикладной физики НАН Беларуси,  **Testing IIC NT-800 device to determine repeatability and reproducibility of measurement results**……………………………………………………………………...…  A.J. Kutepov, A.P. Kren, G.A. Lantsman  Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 32  32 |
| **Прочность изделий, полученных из цементно-песчаных смесей методом аддитивного производства**………………………………………………………………..  М.Л. Хейфец\*1, Д.В.Семененко2, А.В.Таболич3, Д.C.Ратуцкая4  1Институт прикладной физики НАН Беларуси,  2 ОАО «НПО Центр»  **Durability of the products prepared from cement-sand mixtures by the method of additive manufacture**…………………………………………………………………….  M.L. Kheifetz\*1, D.V. Semianenka2, A.V. Tabolich3, D.S. Ratutskaya4  1Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  2Open Joint Stock Company «NPO Center» | 33  33 |
| **НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА**  **NONDESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS** |  |
| **Метрологические аспекты неразрушающего измерительного контроля**  В.Л. Соломахо1 \*, Б.В. Цитович2…………………………………………………………..  1Белорусский национальный технический университет  2Белорусский государственный институт повышения квалификации по стандартизации, метрологии и управлению качеством  **The metrological aspects of non-destructive measurement control**………………….  V.L. Solomacho\* 1, B.V. Tsitovich2 .  1Belarusian National Technical University,  2Belarusian State Institute “PK” | 35  35 |
| **Импульсно-лазерное возбуждение упругих волн в металлах и магнитных жидкостях для акустического контроля и измерений**………………………………  А.Р. Баев 1, А.Н. Митьковец 2, Г.И. Кулак 3, А.Л. Майоров 1  1Институт прикладной физики НАН Беларуси,  2Институт физики НАН Беларуси,  3Мозырьский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина  **Pulsed laser excitation of elastic waves in metals and magneticliquids for acoustic testing and measurements**…………………………………………………………………..  A.R. Baev1, A.N. Mitskovets2, G.I. Kulak3, A.L. Mayorov1  1Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus,  2Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,  3Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakina | 36  37 |
| **Контроль толщины хромового покрытия вихретоковым методом**………………...  А.В. Чернышев\*, И.Е. Загорский, В.И. Шарандо  Институт прикладной физики НАН Беларуси  **Control of the thickness of chromium coating using eddy current method**………………...  A.V. Chernyshev\*, I.E. Zagorskij, V.I. Sharando  Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 37  38 |
| **Неразрушающий контроль изменений поверхности мембранных диффузионных фильтров при обратимом водородном легировании**………………………………….  Акимова О.В.\*, Терешина И.С., Каминская Т.П.  Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  **Non-destructive control of changes in the surface of membrane diffusion filters during reversible hydrogen doping**…………………………………………………………………  Akimova O. V.\*, Tereshina I. S., Kaminskaya T. P.  Lomonosov Moscow State University | 38  39 |
| **Контроль качества обработки и управление процессом упрочнения деталей наплавкой в электромагнитном поле**…………………………………………………...  Т.А. Алексеева1, П.А. Витязь2, А.И. Гордиенко3, Н.Л. Грецкий4, Н.А. Кусакин5,  М.Л. Хейфец6\*  1Полоцкий государственный университет  2 Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси,  3Физико-технический институт НАН Беларуси  4ОАО «НПО Центр»,  5Институт «Кадры индустрии», Министерство промышленности, Беларусь  6Институт прикладной физики НАН Беларуси  **Quality control of processing and control of the hardening process of parts by surfacing in an electromagnetic field**………………………………………………………  T.A. Alekseeva1, P.A. Vityaz2, A.I. Gordienko3, N.L. Gretsky4, N.A. Kusakin5, M.L. Kheifetz6\*  1Polotsk State University  2Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,  3Physicotechnical Institute, National Academy of Sciences of Belarus  4Open Joint Stock Company «NPO Center»  5Institute “Personnel of the industry”, Ministry of industry, Belarus  6 Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus | 39  40 |
| **Оценка технического состояния комплексов глубокой разработки угля методами вибрационной диагностики**…………………………………………………..  Копытин Д. В.1\* , Герике Б. Л.1,2, Дрозденко Ю. В.1  1 Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  2 Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН  **Assessment of the technical condition of complexes for deep coal mining by vibration diagnostics methods**…………………………………………………………………………  Kopytin D.V.1\*, Gerike B. L.1,2, Drozdenko Yu. V.1  1T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  2The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences | 41  41 |

**Труды Н.С. Акулова – основополагающие работы по ферромагнетизму**

Венгринович В.Л.

Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

12 декабря 2020 г. исполнилось 120 лет со дня рождения выдающегося физика, лауреата государственных премий СССР и Беларуси академика АН БССР, профессора Акулова Николая Сергеевича.

Институтом прикладной физики НАН Беларуси была выпущена книга воспоминаний к столетию Николая Сергеевича Акулова, написанная, для тех, кто его не знал. Но и те, кто знал его, читали с удовольствием и благоговением перед большой личностью и выдающимся ученым. Жаль, что тогда не удалось собрать воспоминания всех его учеников и тех, кто считали себя таковыми: многие уже ушли из жизни. Список защитивших под его руководством докторские диссертации на впервые в мире, созданной им кафедре магнетизма в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, весьма впечатляющий: академики Л.В. Киренский и Р.Г. Аннаев, профессора В.В. Телеснин, К.П. Белов, Н.С. Брюхатов, Е.М. Кондорский, Г.С. Кринчик, Р.П. Дьяков, И.М. Пузей, М.В. Дегтяр, Н.И. Еремин. Все это - мировая школа, цвет науки о магнетизме. С каждым из них связаны открытия в этой области.

Еще в 1932 году (когда Акулову было 32 года) нобелевский лауреат В. Гейзенберг писал в МГУ: «Проведенные господином Акуловым исследования очень способствовали разъяснению проблем ферромагнетизма и я надеюсь, что из этого направления работ может развиться что-то выдающееся». И далее в 1973 году, приглашая Николая Сергеевича в Мюнхен, он пишет: «Времена, когда мы вместе работали над проблемами магнитострикции, давно прошли, но я охотно их вспоминаю».

Законченная теория магнитострикции изложена ими в двух основополагающих статьях.

С именем Н.С. Акулова связаны открытые им законы анизотропии (1928), закон магнитострикции, как функции ориентации оси легкого намагничивания в кристалле (1931), теория кривой намагничивания и ее связь с напряжениями, теория четных эффектов, теория магнитного насыщения, теория магнитной вязкости (с В.В.Телесниным). В великолепно написанной монографии [Ферромагнетизм. – М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1939. – 188 с.: черт., граф.] Акулов описал ферромагнетизм с единых представлений.

На похоронах Н.С. Акулова его ученик профессор МГУ Г.С. Кринчик сказал: «Мир понимает магнетизм таким, каким его описал Акулов». Прошло 44 года со дня смерти Н.С. Акулова, но все, кто работают в магнетизме, знают, что достоверность этого высказывания не потеряна.

Работы по теориям дислокаций и элементарных частиц были выполнены в Минске, сначала в Физико-техническом Институте АН БССР (с 1959), а затем в Отделе физики неразрушающего контроля АН БССР, который Акулов создал на базе лаборатории физических проблем ФТИ в 1963 г., который с 1980 г. стал Институтом прикладной физики АН БССР.

Для Н.С.Акулова всегда было характерно умение схватить главное в проблеме. Кажется, он был чужд многоходовому анализу поставленной задачи и, часто интуитивно, что всегда является свидетельством глубокого знания предмета, формулировал основные принципы. Это было не всегда одинаково удачно, зато всегда было четко и недвусмысленно. По-видимому, именно четкие формулировки помогали ему решать проблемы. В качестве примера приведу его анализ кинетики дислокаций в пластичных кристаллах. Тысячи статей и десятки книг были написаны к тому времени, как Акулов взялся за исследование явления пластичности. Десятки механизмов, описывающих сложное и часто противоречивое поведение дислокаций в процессе деформации, были предложены и исследованы. Акулов отбросил второстепенное и рассмотрел поведение дислокаций как кинетический цепной процесс размножения и аннигиляции последних. К тому времени он уже написал книгу «Кинетика цепных реакций», и предмет был ему хорошо известен. Формула, открытая Акуловым для описания других эволюционных процессов, прекрасно описывала поведение дислокаций, по крупному выделяя главные черты явления: спонтанное зарождение, размножение дислокаций и аннигиляция. На эту формулу затем часто ссылались, иногда без упоминания автора, что свидетельствует о ее признании в качестве основополагающей. Думаю, что именно благодаря простоте и проникновению в суть явления, его трактовки и феноменологические формулы, описывающие явление, в дальнейшем обычно претерпевающие изменения в связи с уточнением механизмов, часто оказывались весьма долговечными.

**N.S.Akulov’ works as fundamentals of ferromagnetism**

V.L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

On December12 we celebrate the 120th anniversary of famous physicist, Laureate of State Prizes of the USSR and Belarus, Academician of NAS of Belarus, professor Nikolay Sergeevich Akulov. To his 100th anniversary the Institute of Applied Physics published a book of remembrances about him, which was wrote for those who did not know him. But I think that even those who knew him have read it with pleasure and reverence to a great individual and famous scientist. In 1932, when N.S.Akulov was 32 years old, Nobel Prize winner Werner Heisenberg wrote, “the research performed by Mr. Akulov has greatly contributed to the clarification of the problems of ferromagnetism and I hope that something outstanding can develop from this line of work”. And later in 1973, when inviting Prof. Akulov to Munich, he wrote, “the days when we worked together on the problems of magnetostriction have gone but I readily remember them”.

The completed theory of magnetostriction is presented by them in two fundamental papers.

It is a pity that at that time we could not collect all the remembrances from his pupils: many of them had passed away. He established the world first Department of Magnetism at the M.V.Lomonosov Moscow State University, and the list of those who defended their doctoral dissertations under his supervision is really impressive. It includes full members of the USSR Academy of Sciences L.V.Kirenskiy and R.P.Annaev, professors V.V.Telesnin, K.P.Belov, N.S.Briukhatov, E.M.Kondorskiy, G.S.Krinchik, R.P.Diakov,I.M.Puzey, M.V.Dekhtiar, and N.I.Eremin. They represent a worldwide known scientific school, the color of the science of magnetism, and each of them is associated with discoveries in this area.

The name of N.S.Akulov is forever associated with the laws of magnetic anisotropy discovered by him in 1928, the law of magnetostriction as a function of the orientation of the easy magnetization axis in a crystal (1931), the theory of the magnetization curve and its connection with stresses, the theory of even effects, the theory of magnetic saturation, and the theory of magnetic viscosity (in co-authorship with V.V.Telesnin). In his brilliantly written monograph “Ferromagnetism” (Moscow-Leningrad, 1939) he described ferromagnetism from a unified concept. At the funeral of N.S.Akulov his puple, Professor Krinchik (Moscow State University) declared, “the world understands magnetism the way Akulov described it.” 44 years have passed since Akulov’s death but everyone who works in the area of magnetism knows that the credibility of this statement is not lost.

His works on elementary particles and the dislocation theory were performed in Minsk, first (since 1959) at the Physico-technical Institute of the Belorussian Academy of Sciences and later at the Department of Physics of Non-destructive Testing, which was established by Prof. Akulov in 1963; in 1980 it the latter was reorganized into the Institute of Applied Physics.

A characteristic feature of Prof. Akulov was the ability to grasp the main thing in a problem. Seemingly it was alien to him to perform a step-by- step analysis of the a problem, but, often intuitively, which is always an evidence of a deep knowledge of the subject, formulated the basic principles that led to a solution. It was not always equally successful, but always clear and unambiguous. It is seemed that clear formulation helped him to solve numerous problems. As an example I can recollect his analysis of crystal plasticity. By that time, thousands of papers and dozens of books had been written, and dozens of mechanisms were proposed and studied to describe inconsistent behavior of dislocations during deformation. Professor Akulov discarded secondary factors and considered the behavior of dislocations as a kinetic chain process of their multiplication and annihilation. By that time he had already written the book “Kinetics of Chain Processes”, thus the subject was well known to him. The formula, which was previously put forward by him for describing evolutionary processes, appeared to adequately describe the dislocations behavior highlighting the main features of the phenomenon: spontaneous generation of dislocations, their multiplication and annihilation. Later this formula was often cited, sometimes without mentioning the author, which indicates its recognition as a fundamental one. It seems to me that due to simplicity and a deep insight into the root of the matter his interpretations and phenomenological formulas, which later usually underwent changes in connection with the refinement of physical mechanisms, often turned out to be very durable.

**Н.С. Акулов - основатель кафедры магнетизма**

**Московского государственного университета**

Н.С. Перов1\*

1Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

\* perov@magn.ru

Выдающийся учёный, имя которого вписано красной строкой в мировую науку, учитель и педагог, создавший многочисленные научные школы, изобретатель и конструктор, человек фантастической эрудиции и работоспособности, один из основателей и первый руководитель первой в Советском Союзе кафедры магнетизма - все это об одном и том же человеке, - Николае Сергеевиче Акулове.

Вклад Н.С. Акулова в учение о магнетизме огромен и высоко оценен мировой научной общественностью. В докладе рассказывается о деятельности Н.С.Акулова в тридцатые годы, о его учениках и соратниках, о научных достижениях кафедры магнетизма с момента её создания.

Заключительная часть доклада посвящена тематике работ кафедры магнетизма МГУ в наши дни.

**N. S. Akulov as a founder of the Department of Magnetism**

**at the Lomonosov Moscow State University**

Nikolai Perov\*

M.V. Lomonosov Moscow State University,

119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia

\* perov@magn.ru

An outstanding scientist whose name is written in red in the world science, a teacher and educator who created numerous scientific schools, an inventor and designer, a man of fantastic erudition and efficiency, one of the founders and first head of the first Department of Magnetism in the Soviet Union, and all this is about the same person, Professor Nikolai Sergeevich Akulov.

N.S.Akulov's contribution to the study of magnetism is huge and highly appreciated by the world scientific community. The report describes the activities of N.S.Akulov in the thirties, his students and colleagues, and the scientific achievements of the Department of Magnetism since its creation.

The final part of the report is devoted to the work of the Department of Magnetism of the Moscow State University in our days.

**ФЕРРОМАГНЕТИЗМ И МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ**

**FERROMAGNETISM AND MAGNETIC ANISOTROPY**

**Гистерезисные поверхности как инструмент повышения точности**

**магнитных измерений**

И.Т. Скурту, И.И. Брановицкий

Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

Корректное описание магнитного гистерезиса является притягательной задачей, которая решалась с различной степенью достаточности в течение многих лет различными исследователями. Это имеет как научное, так и прикладное значение, в частности при решении задач неразрушающего контроля, включая разработку методов магнитного контроля на основе импульсного перемагничивания, быстрого размагничивания, полевых фазовых соотношений, а также быстрые измерения и прецизионные измерения магнитных свойств и т.д.

Семейство петель магнитного гистерезиса на фиксированной частоте может быть представлено как поверхность в трехмерном пространстве (магнитное поле H, магнитная индукция B, удельные магнитные потери Р). Впрочем, в качестве третьей координаты для точек на поверхности можно выбрать, например, максимум магнитной индукции за период либо другой интегральный параметр.

Рассматривается использование поверхности магнитного гистерезиса в качестве априорной информации для повышения точности прецизионных измерений. Стационарные гистерезисные циклы перемагничивания на фиксированной частоте при измерении, например, удельных магнитных потерь при заданной амплитуде магнитной индукции или амплитуды индукции при заданной максимальной величине магнитного поля, представляют собой линии постоянного уровня на гистерезисной поверхности. Перемещение между этими уровнями, происходящее при перемагничивании с постоянной частотой и медленно меняющейся амплитудой (например, при выходе на рабочую точку при измерениях или при медленном сорокасекундном размагничивании), происходит по кривым, принадлежащим данной гистерезисной поверхности.

Наличие такой поверхности для исследуемого материала позволяет фактически устранить ошибки измерения, связанные с неопределенностью магнитных свойств (неопределенность типа A), а конечная неопределенность результата станет зависеть практически только от качества измерения электрических величин.

Это происходит из-за гладкости гистерезисной поверхности, вследствие оптимального ограничения описательной способности (максимальной степени) параметрических полиномов, задающих плоскость, а также требования к монотонности поверхности.

Описываются, разработанные авторами способы извлечения необходимой и достаточной информации, для построения гистерезисной поверхности на основе данных медленного размагничивания, обязательного к выполнению перед измерениями. Показан процесс обучения искусственной нейронной сети на основе спиральной траектории, принадлежащей гистерезисной поверхности. Приведены примеры построения такой поверхности, на основе данных обученной сети.

**Hysteresis surfaces as a tool for increasing the accuracy of magnetic measurements**

I.T. Skurtu, I.I. Branovitsky

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

Correct description of magnetic hysteresis is a profitable problem that has been solved with varying degrees of sufficiency for many years by various researchers. This is of both scientific and applied importance, in particular, in solving problems of non-destructive testing, including the development of magnetic testing methods based on impulse remagnetization, fast demagnetization, field phase relationships, as well as fast measurements and precision measurements of magnetic properties, etc.

A family of magnetic hysteresis loops at a fixed frequency can be represented as a surface in three-dimensional space (magnetic field H, magnetic induction B, specific magnetic losses P). However, as the third coordinate for points on the surface, you can choose, for example, the maximum magnetic induction for a period or another integral parameter.

Discusses the use of a magnetic hysteresis surface as a prior information to improve the accuracy of precision measurements. Stationary hysteresis cycles of remagnetization at a fixed frequency when measuring, for example, specific magnetic losses at a given amplitude of magnetic induction or an amplitude of induction at a given maximum magnetic field, are constant level lines on the hysteresis surface. The movement between these levels, which occurs during remagnetization with a constant frequency and slowly varying amplitude (for example, when reaching the operating point during measurements or during a slow forty-second demagnetization), occurs along the curves belonging to the given hysteresis surface.

The presence of such a surface for the material under study makes it possible to almost completely eliminate measurement errors associated with the uncertainty of the magnetic properties (uncertainty of type A), and the final uncertainty of the result will depend practically only on the quality of measurement of electrical quantities.

This effect is due to the smoothness of the hysteresis surface, due to the optimal limitation of the descriptive ability (maximum degree) of the parametric polynomials defining the plane, as well as the requirement for the monotonicity of the surface.

The methods developed by the authors to extract the necessary and sufficient information for constructing a hysteresis surface based on the data of slow demagnetization (which must be performed before measurements) are described. The process of training an artificial neural network based on a spiral trajectory belonging to a hysteresis surface is shown. Examples of constructing such a surface based on the data of the trained network are given.

**Оценка степени магнитной анизотропии в ферромагнитных сталях и сплавах на основе магнитошумового и импульсного магнитного методов**

В.Н. Бусько, А.А. Осипов

Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

Магнитная анизотропия (МА), как физическое явление, означает изменение различных магнитных свойств (намагниченности, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и др.) ферромагнитного материала в зависимости от выбранного направления намагничивания. Также известно, что магнитные потери, например, в электротехнической стали значительно зависят от анизотропии, а прочность и долговечность стальных конструкций во многом (до 50%) определяются наличием и степенью анизотропии и зависят от направления приложения рабочей нагрузки. Изучение и неразрушающий контроль МА, как одного из видов анизотропии, относятся к актуальным техническим задачам, а с ростом производства в ближайшем будущем материалов, получаемых с помощью аддитивных технологий, приобретет большую остроту и значимость.

Физическую природу МА в ферромагнетике на основе предложенной и разработанной феноменологической теории впервые установил академик Н.С. Акулов в 1928 г. Одним из изучаемых им фундаментальных научных направлений и практически полностью доведенных до логического завершения являются теоретические представления и исследования в области понимания физической сущности и роли анизотропии в теории и практике ферромагнетизма, являющейся энергетической и тензорной характеристикой.

Достаточно вспомнить о разработанном магнитометрическом (на изменении намагниченности) методе и реализованном им в анизометре Акулова, который в свое время был широко распространен для определения магнитных свойств, ферритной фазы, количества остаточного аустенита, изучения фазовых превращений, температурной зависимости, намагниченности насыщения, температуры Кюри и решения других задач.

В настоящее время продолжается изучение МА с помощью различных магнитных методов с целью поиска новых, оптимизации и усовершенствования известных.

В работе в качестве исследуемых методов оценки МА в различных сталях и сплавах использовались метод эффекта Баркгаузена (МЭБ), информативные параметры которого тесно взаимосвязаны с доменной структурой ферромагнетика и метод остаточной намагниченности, давно положительно зарекомендовавший себя как надёжный способ неразрушающего контроля механических свойств ферромагнетиков.

В итоге исследований установлено: сравнение экспериментальных результатов по данным оценки МА с помощью магнитошумового метода и по остаточной намагниченности, являющегося базовым методом, показало качественное совпадение. При оценке механических свойств обоими методами на образцах штампуемой стали установлена взаимосвязь интенсивности магнитного шума (МШ) с коэффициентом нормальной анизотропии. Упругие напряжения растяжения/сжатия при изгибе образца электротехнической стали по данным МШ не меняют текстурированность, или наведенную анизотропию, вызванную прокаткой. Установлена корреляционная зависимость между уровнем и круговыми диаграммами МШ и анизотропией физико-механических свойств ряда сталей и сплавов, обусловленной химическим составом, деформацией, структурой, остаточными напряжениями, текстурой, термической и поверхностной механической обработками.

**Estimation of the degree of magnetic anisotropy in ferromagnetic steels and alloys based on magnetic noise and pulsed magnetic methods**

V.N. Busko, A.A. Osipov

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

Magnetic anisotropy (MA), as a physical phenomenon, means a change in various magnetic properties (magnetization, coercive force, magnetic permeability, etc.) of a ferromagnetic material, depending on the chosen direction of magnetization. It is also known that magnetic losses, for example, in electrical steel, significantly depend on anisotropy, and the strength and durability of steel structures are largely (up to 50%) determined by the presence and degree of anisotropy and depend on the direction of application of the work load. The study and non-destructive testing of MA, as one of the types of anisotropy, are relevant technical problems, and with the growth of production in the near future of materials obtained using additive technologies, it will become more acute and significant.

The physical nature of MA in a ferromagnet based on the proposed and developed phenomenological theory was first established by academician N.S. Akulov in 1928. One of the fundamental scientific directions studied by him and almost completely brought to its logical conclusion is theoretical concepts and research in the field of understanding the physical essence and the role of anisotropy in the theory and practice of ferromagnetism, which is an energy and tensor characteristic.

Suffice it to recall the developed magnetometric (based on the change in magnetization) method and implemented by it in the Akulov anisometer, which at one time was widespread for determining the magnetic properties, ferrite phase, the amount of retained austenite, studying phase transformations, temperature dependence, saturation magnetization, Curie temperature and solving other problems.

At present, the study of MA with the help of various magnetic methods continues with the aim of finding new ones, optimizing and improving the known ones.

In this work, the method of the Barkhausen effect (MBE), the informative parameters of which are closely interrelated with the domain structure of the ferromagnet, and the method of remanent magnetization, which has long since proven itself positively as a reliable method of nondestructive testing of the mechanical properties of ferromagnets, were used as the studied methods for assessing MA in various steels and alloys.

As a result of the research, it was established that a comparison of the experimental results based on the data of MA evaluation using the magnetic noise method and on the residual magnetization, which is the basic method, showed a qualitative agreement. When evaluating the mechanical properties by both methods on samples of stamped steel, the relationship between the intensity of magnetic noise (MN) and the coefficient of normal anisotropy was established. Elastic tensile / compressive stresses during bending of an electrical steel specimen, according to MN data, do not change texturing or induced anisotropy caused by rolling. A correlation has been established between the level and circular diagrams of the MN and the anisotropy of the physical and mechanical properties of a number of steels and alloys, due to the chemical composition, deformation, structure, residual stresses, texture, thermal and surface machining.

**Прямая и обратная задача ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пластинах с одноосной магнитной анизотропией**

А.О. Шаплов\*, А.С. Гаркун, Р.Г. Шуляковский, М.Н. Невмержицкий

Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

\* Yoichi@list.ru

Рассмотрены условия возникновения неоднородного ферромагнитного резонанса в тонких ферромагнитных пластинах с одноосной магнитной анизотропией при произвольной ориентации оси анизотропии. На основе феноменологических уравнений Ландау-Лифшица-Блоха получены дисперсионные уравнения частоты резонанса для ряда важных частных случаев ориентации оси магнитной анизотропии и направления неоднородного ферромагнитного резонанса.

Установлено, что полученные уравнения можно использовать для решения обратной задачи, а именно нахождения параметров ферромагнитной пластины (направление и коэффициент магнитной анизотропии, гироскопическое отношение, коэффициент преломления среды для микроволнового излучения и др.) по наблюдаемому ферромагнитному резонансу.

**Direct and inverse problem of ferromagnetic resonance in thin ferromagnetic plates with uniaxial magnetic anisotropy**

A.O. Shaplov\*, A.S. Garkun, R.G. Shulyakovsky, M.N. Nevmerzhitsky

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

\* Yoichi@list.ru

We considered the conditions for the appearance of inhomogeneous ferromagnetic resonance in thin ferromagnetic plates with uniaxial magnetic anisotropy at an arbitrary orientation of the anisotropy axis. We obtained the dispersion equations of the resonance frequency for a number of important special cases of the orientation of the magnetic anisotropy axis and the direction of the inhomogeneous ferromagnetic resonance on the basis of the phenomenological Landau-Lifshitz-Bloch equations.

We found that the obtained equations can be used to solve the inverse problem to find the parameters of a ferromagnetic plate (direction and coefficient of magnetic anisotropy, gyroscopic ratio, medium refractive index for microwave radiation, etc.) from the observed ferromagnetic resonance.

**Влияние условий cинтеза на структуру, магнитные**

**и магнитокалорические свойства субмикронных частиц иттриевого феррита, синтезированных для магнитотермии**

О.В. Костенко1\*, Т.Ю. Киселева1\*\*, Ж. Нармандах2, У. Энхнаран2, П.Ю. Тяпкин3, С.И.Жолудев1, И.П. Иваненко1 , Г.П. Марков3, Т.Ф. Григорьева4, Д. Сангаа2, А.С.Илюшин1

1Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, 119991, Ленинские горы, стр.1-2, Москва, Россия

2Институт физики и технологии Монгольской академии наук,

Улан Батор, 13330, пр-кт Мира 54B, Монголия

*3*Институтфизики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН,

123995, Малая Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, Россия

4Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,

630128, ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск, Россия

[\*kostenko\_ov@gmail.com](mailto:*Kostenko_OV@gmail.com), \*\*kiseleva.tyu@gmail.com

Ферриты как самостоятельный материал, так и в качестве компонентов композиционных материалов, являются одними из самых привлекательных и интересных смешанных оксидов в связи с их многочисленными функциональными свойствами и большим спектром областей использования в том числе биомедицинских. Свойства ферритов находятся в сильной зависимости от структуры, морфологии, размеров частиц, поэтому практическое применение материалов на их основе неизбежно сталкивается с проблемой контроля этих параметров в процессе синтеза для получения оптимальных функциональных свойств. В нашей работе были синтезированы субмикронные частицы YIG методом обратного соосаждения. Для выявления взаимосвязи влияния условий получения на размер, структуру, магнитные и магнитокалорические свойства частиц проведены исследования методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, мессбауэровской спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света и FORC. Проведен анализ магнитных характеристик и доменного состояния частиц. Выявлены особенности структурного, размерного и доменного состояния частиц, влияющие на достигаемый магнитокалорический эффект. Синтезированные субмикронные частицы иттриевого феррита показали наибольшую способность к разогреву в переменном магнитном поле по сравнению с другими ферритовыми составами, что обуславливает перспективы их использования для магнитной гипертермии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Монг (проект №19-52-44003*)

**Influence of synthesis conditions on the structure, magnetic**

**and magnetocaloric properties of submicron yttrium ferrite particles**

**synthesized for hyperthermia**

O.V.Kostenko1\*, T.Yu.Kiseleva1\*\*, D.Sangaa2, J.Narmandakh2, U.Enkhnaran 2, P.Yu.Tyapkin3, S.I.Zholudev4, I.P.Ivanenko1 , G.P.Мarkov4, T.F.Grigoreva3, А.S.Ilyushin1

1 M.V. Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty,

119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia

2Institute of physics and technology, Mongolian Academy of Science,

Ulaanbaatar, Mongolia

3Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

630128, ul. Kutateladze, 18, Novosibirsk, Russia

4Smidt’s institute of the physics of the earth, Russian Academy of Sciences

123995, Gruzinskaya str., Moscow, Russia

\*kostenko.olesya.v@gmail.com [\*\*kiseleva.tyu@gmail.ru](mailto:*kiseleva.tyu@gmail.ru)

Ferrites, both as an independent material and as components of composite materials, are one of the most attractive and interesting mixed oxides due to their numerous functional properties and a wide range of applications, including biomedical ones. The properties of ferrites are strongly dependent on the structure, morphology, and particle size; therefore, the practical use of materials based on them inevitably faces the problem of controlling these parameters during the synthesis process to obtain optimal functionality. Submicron YIG particles were synthesized by reverse co-precipitation. To reveal the relationship of the influence of the preparation conditions on the size, structure, magnetic and magnetocaloric properties of particles, studies were carried out using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, Mössbauer and Raman spectroscopy, FORC and heat generation ability measuring. The analysis of the magnetic characteristics and the domain state of the particles is carried out. The features of the structural, dimensional, and domain state of particles, which affect the achieved magnetocaloric effect, are revealed. The synthesized submicron yttrium ferrite particles showed the greatest heat generation ability in an alternating magnetic field as compared with other ferrite compositions, which determines the prospects for their application for magnetic hyperthermia.

*The work was supported by RFBR-mong joint project №19-52-44003*

**Исследование взаимосвязи структуры и магнитных свойств**

**в механосинтезированных композитах (100-***х***) СВМПЭ/***х***MgFe2O4**

**методами Рамановской и Мессбауэровской спектроскопии**

Т.Ю. Киселева1\*, Т.Ф. Григорьева2, П.Ю. Тяпкин2, М.В. Ильин1, Е.В. Лазарева1, Г.П.Марков3, И.П. Иваненко1, С.В. Восмериков2, Е.Т. Девяткина2, Е.В. Якута1,

Д. Сангаа4, A.C. Илюшин1

1Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Физический факультет, 119991, Ленинские горы, стр.1-2, Москва, Россия

2Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,

630128, ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск, Россия

3Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, РАН,

123995, Малая Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, Россия

4Институт физики и технологии Монгольской академии наук,

Улан Батор, 13330, пр-кт Мира 54B, Монголия

\*kiseleva.tyu@gmail.com

Проведено исследование композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и частиц феррита магния – прекурсоров для создания материалов защиты от электромагнитных излучений. Композиционные материалы были синтезированы методом механической активации из порошковых смесей СВМПЭ и феррита магния разного состава. В результате синтеза были сформированы порошковые материалы составов (100-*х*) СВМПЭ/*х*MgFe2O4 (x=15, 30, 50), содержащие субмикронные композиционные частицы-прекурсоры для последующего компактирования и горячего прессования.

Аттестация структурно-морфологического состояния композитов и их компонентов проведена ранее методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии. Магнитные свойства композитов изучены путем измерений полевых зависимостей намагниченности насыщения и анализа магнитокристаллической анизотропии. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния и мессбауэровской спектроскопии изучено влияние размерных, структурных и концентрационных эффектов на магнитные характеристики синтезированных композиционных материалов.

Установлено, что формирование структуры композита при интенсивных механических деформациях в процессе активации компонентов с разными механическими характеристиками сопровождается не только увеличением дисперсности частиц феррита и неоднородным их распределением в полимере, но и изменением надмолекулярной структуры полимера Магнитные характеристики синтезированных композиционных частиц определяются, в основном, структурно-морфологическими свойствами частиц феррита, их концентрацией, размером и межчастичными взаимодействиями, обусловленными достигнутым распределением в полимере.

Анализ мессбауэровских и рамановских спектров позволил выявить механохимически индуцированное изменение катионного распределения в структуре частиц феррита в композитах, определяющее магнитный момент частиц и их гистерезисные параметры, провести оценку доли частиц с суперпарамагнитным поведением и ее вклада в интегральные магнитные характеристики композиционного материала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Монг (проект №19-52-44003*)

**Raman and Mössbauer spectroscopy investigation**

**of the relationship between structure and magnetic properties**

**in mechanically synthesized (100-*x*) UHMWPE / *x*MgFe2O4 composites**

T.Yu. Kiseleva1\*, T.F. Grigoreva2, P.Yu. Tyapkin2, M.V.Il’in1, E.V. Lazareva1, G.P. Markov3, I.P. Ivanenko1, S.V. Vosmerikov2, E.T. Devyatkina2, E.V. Yakuta1 ,

D. Sangaa4, and A.S. Ilyushin1

1 M.V. Lomonosov Moscow State University, Physical faculty,

119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia

2Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

630128, ul. Kutateladze, 18, Novosibirsk, Russia

3Smidt’s institute of the physics of the earth, Russian Academy of Sciences,

Gruzinskaya str., Moscow, Russia

4Institute of physics and technology, Mongolian Academy of Science,

Ulaanbaatar, Mongolia

[\*kiseleva.tyu@gmail.ru](mailto:*kiseleva.tyu@gmail.ru)

The study of composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and magnesium ferrite particles-precursors for development of materials for protection against electromagnetic radiation was carried out. Composite materials were synthesized by the method of mechanochemical activation from powder mixtures of UHMWPE and magnesium ferrite of different sizes, as well as at their different mutual concentration. As a result of the synthesis, powder materials of compositions (100-x) UHMWPE/xMgFe2O4 (x = 15, 30, 50) were formed, containing submicron composite particles-precursors for subsequent compaction and hot pressing.

The analysis of the structural and morphological state of the composites and their components was carried out by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The magnetic properties of the composites were studied by measuring the field dependences of the saturation magnetization and analyzing the magneto crystalline anisotropy. In the present work, the influence of size, structural, and concentration effects on the magnetic characteristics of the synthesized composite materials was studied in detail by Raman and Mössbauer spectroscopy.

It was found that formation of the composite structure under intensive mechanical deformations during the activation of the components used with different mechanical characteristics is accompanied not only by an increase in the dispersion of ferrite particles and their inhomogeneous distribution in the polymer, but also by a change in the supramolecular structure of the polymer, important aspects in subsequent sintering processes. The magnetic characteristics of the synthesized composite particles are mainly determined by the structural and morphological properties of ferrite particles, their concentration, size, and interparticle interactions due to the achieved distribution in the polymer.

Analysis of the Mössbauer and Raman spectra made it possible to reveal a mechanochemically induced change in the phase composition, as well as the cationic distribution in the structure of ferrite particles in composites, which determines the magnetic moment of the particle and its hysteresis parameters, and to estimate the fraction of particles with superparamagnetic behavior and its contribution to the integral magnetic characteristics of the composite material.

*The work was supported by RFBR-Mong joint project №19-52-44003*

**Управление процессами магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки поверхностей деталей**

С.А. Чижик1, Л.М. Акулович2, М.Л. Хейфец3\*,С.А Клименко4,В.И. Лавриненко4,

В.С. Майборода5, А.И. Дикусар6, С. Ивашку6, Н. Казак6

1Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАН Беларуси,

220072, ул.П.Бровки, 15, г.Минск, Беларусь

2Белорусский государственный аграрный технический университет

220023, проспект Независимости, 99, г.Минск, Беларусь

3Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

4Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

04074, ул.[Автозаводская](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%83%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%B0_(%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2)&action=edit&redlink=1), 2, г.Киев, Украина

5Национальный технический университет Украины "КПИ имени Игоря Сикорского"

03056 г.Киев, проспект Победы, 37, Украина

6Институт прикладной физики Академии наук Молдовы

MD-2004, Кишинев, бул. Штефан чел Маре, 180, Молдова

\*mlk-z@mail.ru

Рассмотрены методы и технологии нанесения покрытий на металлические поверхности электроискровыми разрядами с последующей упрочняющей абразивной обработкой в магнитном поле. Показаны возможности повышения износостойкости металлических поверхностей совместными методами легирования поверхностного слоя детали и уменьшения его шероховатости. Разработаны математические модели этих процессов, позволяющие оптимизировать технологии формирования упрочняющих покрытий в машиностроении

Математические модели описывают: зависимости производительности процесса упрочнения и сплошности формируемых покрытий из ферромагнитного порошка на поверхностях стальных образцов от технологических факторов магнитно-электрического упрочнения, а также зависимости производительности процесса и изменения шероховатости шлифованных поверхностей этих образцов от технологических факторов магнитно-абразивной обработки.

Рекомендованы упрочняющая технология с нанесением покрытия из порошка ферробора магнитно-электрическим упрочнением с последующим шлифованием и магнитно-абразивной обработкой для пар трения скольжения, и та же технология с нанесением покрытия порошка феррованадия для неподвижных соединений.

**Control of magnetic-electric processes of hardening and magnetic-abrasive**

**machining of surfaces**

S.A. Chizhik1, L.M. Akulovich2, M.L. Kheifetz3\*, S.A. Klimenko4, V.I. Lavrinenko4,

V.S. Mayboroda5, A.I. Dikusar6, S. Ivascu6, N. Kazak6

1A.V.Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus,

15 P.Brovka Street, Minsk 220072, Belarus

2Belarusian State Agricola Technical University,

99 Nezavisimosti Avenue, Minsk 220023, Belarus

3 Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

4V.N.Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine,

2 Avtozavodskaya Str., Kiev 04074, Ukraine

5 National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

03056, 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine

6 Institute of Applied Physics, Academy of Sciences of Moldova

MD-2004, Chisinau, Stefan cel Mare bd., 180

\*mlk-z@mail.ru

Methods and technologies of coating metal surfaces by electric spark discharges with subsequent hardening abrasive treatment in a magnetic field are considered. The possibilities of increasing the wear resistance of metal surfaces by joint methods of alloying the surface layer of the part and reducing its roughness are shown. Mathematical models of these processes have been developed, which make it possible to optimize the technologies of hardening coatings in mechanical engineering.

Mathematical models describe: the dependence of the productivity of the hardening process and the continuity of the formed coatings from ferromagnetic powder on the surfaces of steel samples on the technological factors of magnetic-electric hardening, as well as the dependence of the productivity of the process and changes in the roughness of the polished surfaces of these samples on the technological factors of magnetic-abrasive processing.

Hardening technology with the application of a coating of ferroboron powder by magnetic-electric hardening followed by grinding and magnetic-abrasive treatment for sliding friction pairs, and the same technology with the application of a coating of ferrovanadium powder for fixed joints are recommended.

**МЕТАЛЛОФИЗИКА И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ**

**PHYSICS OF METALS AND PHASE TRANSITIONS**

**4D компьютерная модель T-x-y-z диаграммы Fe-Ni-Co-Cu**

M.Д. Парфенова, В.И. Луцык\*, В.П. Воробьева, A.Э. Зеленая

Институт физического материаловедения СО РАН,

670047, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, Российская Федерация

\* [vluts@ipms.bscnet.ru](mailto:vluts@ipms.bscnet.ru)

Акулов Н.С.[1] исследовал константу энергетической анизотропии в системе Ni-Co-Mo. Изучение четверных систем, формирующих пятерную систему Fe-Ni-Cu-Co-S, необходимо для модернизации технологий извлечения меди, кобальта и никеля. Компьютерная модель, аккумулирующая информацию о фазовых равновесиях в четверной системе Fe-Ni-Co-Cu, или A(A1)-B-C-D, где A(A1) – полиморфные модификации железа, состоит из 7 нелинейчатых гиперповерхностей (2 ликвидуса, 2 солидуса, 2 трансуса и единственная гиперповерхность сольвуса, разграничивающая однофазную область твердого раствора A1(B,C,D) и двухфазную область A1(B,C)+D, а также – из двух триад линейчатых гиперповерхностей с образующим отрезком (в данной диаграмме нет линейчатых гиперповерхностей другого класса – с образующей плоскостью).

В результате, T-x-y-z диаграмма содержит 13 гиперповерхностей, ограничивающих 10 фазовых областей. Она позволяет воспроизводить 2D разрезы, построенные по данным экперимента, а также строить любой 3D разрез четырехмерной модели и его 2D сечения для верификации и дальнейшей коррекции модели, для понимания геометрической структуры T-x-y-z диаграммы, для определения температурных границ этапов кристаллизации.

1. Акулов Н.С., Блохина О.И., Болынова К.М., Чернова А.П. Исследование константы энергетической анизотропии тройных сплавов системы Ni-Co-Mo // Ж. технической физики», 1949, т. 19, вып. 8, с.865-870.

**4D сomputer model of T-x-y-z diagram Fe-Ni-Co-Cu**

M.D. Parfenova, V.I. Lutsyk\*, V.P. Vorobjeva, A.E. Zelenaya

Institute of Physical Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

670047, 6 Sahyanova Str., Ulan-Ude, Russia

\* vluts@ipms.bscnet.ru

Energy anisotropy constant of ternary alloys was studied by N. Akulov et al [1] in the system Ni-Co-Mo. A study of quaternary systems that form the quinary system Fe-Ni-Cu-Co-S is urgent for the modernization of extractive technology of copper, cobalt and nickel. Computer model accumulates information about the phase equilibriums within the Fe-Ni-Co-Cu, or A(A1)-B-C-D, system, where A(A1) – allotropies of Fe. In total, the T-x-y-z diagram consists of unruled hypersurfaces: 2 liquidus and 2 solidus; 2 transus; the only solvus hypersurface, which serves as a border between the 1-phase region of solid solution A1(B,C,D) and 2-phase A1(B,C)+D one. Phase Diagram includes 2 triads of ruled hypersurfaces with generating line (this diagram has not ruled hypersurfaces of other class - with generating plane).

As a result, the T-x-y-z diagram consists of 13 hypersurfaces and 10 phase regions. So, the spatial computer model of the 4-component T-x-y-z diagram makes possible both to reproduce 2D sections constructed by experimental data and to design any given 3D sections and their 2D sections: for the verification and further correction of model, for understanding of the T-x-y-z diagram geometric structure, for determining the temperature boundaries of the stages of crystallization.

1. Akulov N.S., Blokhina О.I., Bolynova К.М., Chernova А.P. J. Technical Physics, 1949, vol. 19, No.8, p. 865-870. (In Russian)

**Топологические фазовые переходы в графено-подобных материалах**

Г.В. Грушевская

Белорусский государственный университет, физический факультет

220030, пр. Независимости, 4, Минск, Беларусь

\* grushevskaja@bsu.by

В настоящее время перспективны разработки квантовых устройств, функционирующих на графеноподобных материалах в топологически нетривиальном фазовом состоянии. На таких устройствах возможна реализации высокоэффективных квантовых вычислений. Мы развиваем представления о фазовой диаграмме двумерных сильно коррелированных электронных систем при спин-орбитальном взаимодействии, как таковое оно не гарантирует существования безщелевой зонной структуры. Мы находим, что явление инверсии зон приводит к появлению класса топологических безщелевых фаз. Соприкосновения дираковских зон таких топологических металлов характеризуются собственными значения оператора петля Вильсона неабелевого калибровочного поля, задаваемого фазой Зака в импульсном пространстве. Топологический анализ и *ab-initio* расчеты зонной структуры в приближении сильной связи выполнены для модельных высокоэнергетических  графеновых гамильтонианов.

**Topological phase transitions in graphene-like materials**

H.V. Grushevskaya\*

Belarusian state university, Physics Faculty

4 Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus

\* grushevskaja@bsu.by

Currently, the design of quantum devices operating on graphene-like materials in a topologically nontrivial phase state is promising. On such devices, it is possible to implement highly efficient quantum computing. We expand a notion of the phase diagram for two-dimensional strongly correlated electron systems at spin-orbital coupling, that do not guarantee gaplessness of the band structure. We find that band inversion leads to a class of topological, gapless phases. We characterize the Dirac band touching of these topological metals by eigenvalues of the operator Wilson loop the non-Abelian gauge field. The field is determined by Zak phase in momentum space. The topological analysis and *ab-initio* tight-binding band structure calculation have been conducted for model high-enegy  graphene Hamiltonians.

**Геометродинамическая характеризация фазовых переходов в ленгмюровских монослоях по поведению сжимаемости**

Г.В. Грушевская, Н.Г. Крылова\*, И.В. Липневич

Белорусский государственный университет, физический факультет,

220030, пр. Независимости, 4, Минск, Беларусь

\*krylovang@bsu.by

Модификация поверхности тонкими наноструктурированными пленками востребована в наноэлектронике и нанофотонике. Проводящие полимеры являются перспективными материалами для эффективной оптимизации электрических и электро-химических характеристик наносенсоров. Один из современных и высокоэффективных методов дизайна ультратонких наноструктурированных полимерных пленок ‒ это их формирование из органических амфифильных соединений по технологии Ленгмюра-Блоджетт. Экспериментально установлено, что протекание двумерного (2D) фазового перехода жидкость - кристаллическое состояние существенно зависит от свойств амфифильных молекул и условий формирования: ионного состава субфазы и скорости сжатия. Однако, в настоящее время не существует эффективных способов диагностики фазовых состояний монослоев Ленгмюра. В работе нами предлагается способ мониторинга формирования ленгмюровского монослоя по динамике сжимаемости в процессе фазового перехода в рамках разрабатываемой Финслер-Лагранжевой геометродинамической модели. Показано, что кривизна Бервальда конфигурационного Финслер-Лагранжевого пространства ленгмюровского монослоя существенно меняется на этапе фазового перехода 2D-жидкости в кристаллическое состояние. Установлено соответствие между поведением кривизны Бервальда и динамикой термодинамических параметров монослоя: поверхностного давления и сжимаемости. Показана согласованность теоретических зависимостей с экспериментальными данными.

**Geometrodynamic characterization of phase transitions in Langmuir monolayers by compressibility behavior**

[H.V. Grushevskaya](https://www.researchgate.net/profile/Halina_Grushevskaya_krylova),·[N.G. Krylova](https://www.researchgate.net/profile/Nina_Krylova)\*,·[I.V. Lipnevich](https://www.researchgate.net/researcher/2046198154_I_V_Lipnevich)

Belarusian state university, Physics Faculty

*4 Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus*

\*krylovang@bsu.by

Surface modification with thin nanostructured films is in high demand in the field of nanoelectronics and nanophotonics. Conducting polymers are perspective materials for effective optimization of electrical and electro-chemical characteristics of nanosensors. One of the promising directions to design ultra-thin films of metal-polymer compounds is their self-organized formation from amphiphilic compounds by Langmuir-Blodgett technique. It has been found out experimentally that the proceeding of two-dimensional (2D) phase transition liquid-crystal state is depended significantly on the properties of amphiphilic molecules and parameters of formation procedure, means, ionic composition of a subphase and monolayer compression rate. However, to date there is no effective way to diagnose the phase states of the Langmuir monolayer. In the work we propose a method to monitor the Langmuir monolayer formation by compressibility dynamics during phase transition. This method is developed in the framework of Finsler-Lagrange geometrodynamic model. We demonstrate that a Berwald curvature of Finsler-Lagrange configuration space of Langmuir monolayer varies significantly at phase transition liquid-crystal state. The correspondence between the Berwald curvature behavior and monolayer thermodynamic parameters (surface tension and compressibility) has been shown. The agreement of theoretical dependencies and experimental data has been demonstrated.

**Физико-химическое моделирование фазового разделения в коррозионностойких высокохромистых сталях для деталей парогенераторов**

С.В. Бобырь\*, Д.В. Лошкарев

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

1 Площадь Академика Стародубова, 49107, Днепр

\*[svbobyr07@gmail.com](mailto:svbobyr07@gmail.com)

Ферритно-мартенситные стали применяются в качестве конструкционного материала для деталей парогенераторов. Для повышения их коррозионной стойкости можно использовать сплавы с большой концентрацией хрома, но содержащие элементы, препятствующие его сегрегации, таким как молибден. Молибден не только упрочняет α-твердый раствор, но и способствует повышению его вязкости, препятствуя высокотемпературному охрупчиванию сплавов системы Fe-Cr. Целью работы является физико-химическое моделирование диффузионного фазового превращения и определения долговременной термической стабильности сплава Fe-21,4 Cr с 1,16 Mo. В качестве эталонного материала применяли сплав Fe-21,4 Cr. В работе предложен интегральный подход к моделированию разделения фаз в хромистых сплавах, объединяющий определение диффузионных коэффициентов и потоков с учетом их зависимостей от концентрации, оценку взаимной диффузии элементов, и использование значений диффузионных потоков для расчета текущей концентрации хрома в сплаве и размеров хромистых включений. Текущие концентрации хрома и углерода в твердом растворе находили путем численного интегрирования дифференциальных уравнений при двух температурах - рабочей 700°К и повышенной - 973°К. Результаты расчетов показывают, что термическая стабильность сплава Fe – 21,4 % Cr с 1,16 % Mo гораздо выше, чем без молибдена. При рабочей температуре 700°К концентрация хрома в твердом растворе сплава Fe – 21,4 % Cr уменьшается с 21,4 % до 16,1 % примерно за 70 лет работы, при этом образуются включения σ-фазы размером около 7 мкм. В сплаве Fe – 21,4 % Cr – 1,16 % Mo концентрация хрома за то же время работы изменяется незначительно. При повышенной рабочей температуре 973°К фазовое разделение наблюдается в обоих сплавах, однако в сплаве Fe – 21,4 % Cr – 1,16 % Mo происходит в три раза медленнее с образованием включений σ-фазы размером около 6 мкм.

**Physicochemical modeling of phase separation in corrosion-resistant high-chromium steels for steam generator parts**

S.V. Bobyr\*, D.V. Loshcarev

Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,

1 Square of Academician Starodubov, 49107, Dnipro

\*[svbobyr07@gmail.com](mailto:svbobyr07@gmail.com)

Ferritic-martensitic steels are used as structural material for parts of steam generators. To increase their corrosion resistance, alloys with a high concentration of chromium, but containing elements that prevent its segregation, such as molybdenum, can be used. Molybdenum not only strengthens the α-solid solution, but also increases its toughness, preventing high-temperature embrittlement of alloys of the Fe-Cr system. The aim of the work is physicochemical modeling of diffusion phase transformation and determination of the long-term thermal stability of the Fe-21.4% Cr alloy with 1.16% Mo. A Fe-21.4% Cr alloy was used as a reference material. The paper proposes an integral approach to modeling phase separation in chromium alloys, combining the determination of diffusion coefficients and fluxes taking into account their dependences on concentration, an assessment of the mutual diffusion of elements, and the use of diffusion flux values to calculate the current concentration of chromium in the alloy and the size of chromium inclusions. The current concentrations of chromium and carbon in the solid solution were found by numerical integration of differential equations at two temperatures - working 700 ° K and elevated - 973 K. The calculation results show that the thermal stability of the Fe-21.4% Cr alloy with 1.16% Mo is much higher than without molybdenum. At an operating temperature of 700 K, the concentration of chromium in the solid solution of the Fe-21.4% Cr alloy decreases from 21.4% to 16.1% after about 70 years of operation, while inclusions of the σ-phase with a size of about 7 μm are formed. In the Fe-21.4% Cr-1.16% Mo alloy, the chromium concentration changes insignificantly during the same operating time. At an elevated operating temperature of 973 K, phase separation is observed in both alloys; however, in the Fe-21.4% Cr-1.16% Mo alloy, it occurs three times slower with the formation of σ-phase inclusions about 6 μm in size.

**Анализ количества остаточного аустенита в структуре стальных валков**

**для листовой прокатки**

С. В. Бобырь1\*, С. С. Захарчук2, И. Ю. Приходько1, П. В. Крот3

1Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

пл. Академика Стародубова 1, 49107 Днепр, Украина

2ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»

ул. Орджоникидзе 5, 84305 Краматорск, Украина

3Вроцлавский университет науки и технологий

На Гробли 15, 50-421 Вроцлав, Польша

\*[svbobyr07@gmail.com](mailto:svbobyr07@gmail.com)

Количество остаточного аустенита в мартенситных валковых сталях является важным технологическим параметром термической обработки, влияющим на эксплуатационные свойства валков. Обнаружить присутствие остаточного аустенита методами магнитной ферритометрии и оптической микроскопии затруднительно. Цель работы заключалась в сравнительном анализе количества остаточного аустенита в структуре валков из легированных сталей рентгеноструктурным и ультразвуковым методом.

В образцах стали марки X37CrMoV5-1, прошедших различные режимы термообработки, рентгеновским методом установлено изменение количества остаточного аустенита с 7,21 % при нормализации до 1,96% после закалки и высокого отпуска. В образцах стали 80Х3МФ и стали 80Х5МФ рентгеновским анализом выявлен наибольший процент остаточного аустенита, 33,3% и 7,8% соответственно, что является недопустимым для валков. Сталь 80Х3МФ имеет высокую твердость – 57,5 HRC, и это свидетельствует о том, что использованный рентгеновский метод завышает значения количества аустенита в образце из этой стали.

Результаты анализа остаточного аустенита по скорости ультразвука в образце показали лучшую сходимость. Количества остаточного аустенита, рассчитанные по эталону из нержавеющей стали (100 % γ-Fe), имели пониженные значения (2,6 - 4,5%). Наиболее точные результаты по количеству остаточного аустенита дало использование установленной регрессионной зависимости с выбранным эталоном (2,7 - 7,8%). Такая зависимость получается при скорости звука в аустените ~4000 м/с.

**Analysis of the amount of retained austenite in the structure of steel rolls**

**for sheet rolling**

S. V. Bobyr1\*, S. S. Zakharchuk2, I. Yu. Prikhodko1, P. V. Krot3

Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,

Academician Starodubov sq. 1, 49107 Dnipro, Ukraine

2PJSC "Novokramatorsk Machine Building Plant"

Ordzhonikidze st. 5, 84305 Kramatorsk, Ukraine

3Wroclaw University of Science and Technology

Na Grobli st. 15, 50-421 Wroclaw, Poland

\*[svbobyr07@gmail.com](mailto:svbobyr07@gmail.com)

The amount of retained austenite in martensitic roll steels is an important technological parameter of heat treatment that affects the performance of rolls. It is difficult to detect the presence of retained austenite by magnetic ferritometry and optical microscopy. The aim of the work was to analyse comparatively the amount of retained austenite in the structure of rolls made of alloyed steels using X-ray diffraction and ultrasonic methods.

In samples of steel grade X37CrMoV5-1, which underwent various modes of heat treatment, the X-ray method revealed a change for retained austenite from 7.21% with normalization to 1.96% after quenching and high tempering. In samples of steel 80Cr3MoV and steel 80Cr5MoV, X-ray analysis revealed the highest percentage of retained austenite, 33.3% and 7.8%, respectively, which is unacceptable for rolls. Steel 80Cr3MoV had a high hardness, 57.5 HRC, which indicates that the X-ray method used overestimates the amount of austenite in a sample of this steel.

The results of the analysis of retained austenite by the ultrasound velocity in the sample showed better convergence. The amounts of retained austenite, calculated using a stainless steel standard (100% γ-Fe), had reduced values (2.6-4.5%). The most accurate results on the amount of retained austenite were obtained using the established regression relationship with the selected standard (2.7-7.8%). This dependence is obtained at the speed of sound in austenite, which is ≈4000 m/s.

**Разупрочняющая термическая обработка проволоки сварочного назначения из кремнемарганцевой стали**

В.А. Луценко\*, Т.Н. Голубенко, О.В. Луценко

Институт черной металлургии им З.И.Некрасова НАН Украины,

49107, пл. Академика Стародубова, 1, г. Днепр, Украина

\*lutsenkovlad2@gmail.com

Металлопрокат из низкоуглеродистой легированной стали широко используется для производства сварочной проволоки путем волочения. В процессе волочения кремнемарганцевая сталь имеет повышенную прочность (до 790 МПа), поэтому её подвергают термической обработке при подкритических температурах (680…700 С), которая повышает пластичность стали.

Выявлены особенности формирования структуры и изменения механических свойств в проволоке из низкоуглеродистой кремнемарганцевой стали после различных режимов термической обработки. Показано, что в исследованной проволоке из кремнемарганцевой стали содержится в структуре значительное количество бейнито-мартенситных участков (~ 35 %), структурные превращения начинаются при пониженных температурах отжига и сопровождаются изменением морфологии карбидов.

На основании полученных данных для низкоуглеродистой кремнемарганцевой стали рекомендованы температурно-временные параметры термической обработки с нагревом до температуры 630 ±10 °С и изотермической выдержкой в интервале 2...2,5 часа, который обеспечивает образование сфероидизированной структуры, прочность 500…510 МПа и повышает технологическую пластичность стали для дальнейшего волочения. Определение свойств после отжига исследованной стали показали в среднем снижение прочности и повышение пластичности на ~ 40%. Сокращенный режим разупрочняющей термической обработки обеспечивает необходимые механические свойства низкоуглеродистой кремнемарганцевой стали для производства проволоки сварочного назначения. Уменьшение длительности и температуры разупрочняющей термической обработки в технологическом цикле производства проволоки позволит в значительной степени сэкономить энергоресурсы.

**Softening heat treatment of the welding wire of silicon-manganese steel**

V.A. Lutsenko\*, T.N. Golubenko, O.V. Lutsenko

Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,

Sq. Academician Starodubova, 1, 49107, Dnipro, Ukraine

\*lutsenkovlad2@gmail.com

Rolled products of low-carbon alloy steel are widely used for production of welding wire by drawing. The silicon-manganese steel has increased strength (up to 790 MPa) during drawing, so it is processed by the heat treatment in the subcritical temperatures (680…700  С), which increases the ductility of steel. Features of structure formation and changes in mechanical properties in the wire of low-carbon silicon-manganese steel after different modes of heat treatment were identified.

It is shown that in the investigated wire of silicon-manganese steel the structure contains a considerable amount of bainite-martensite areas (~35%), structure transformation begins at lower temperatures of annealing and follows with changes in morphology of carbides. Based on the received data for low-carbon silicon-manganese steel was recommended the temperature-time parameters of heat treatment with heating to temperature 630±10 °C and isothermal holding in the range of 2...2.5 hours, which provides the formation of spheroidizing structure, strength 500...510 MPa and increases the technological ductility of the steel for further drawing.

Determination of the properties after annealing of the investigated steel showed an average decrease of strength and increase of ductility ~40%. The shortened mode of softening heat treatment provides the necessary mechanical properties of low-carbon silicon-manganese steel for the production of welding wire. Decrease of duration and temperature of softening heat treatment in the technological cycle of wire production will significantly save energy resources.

**ДИФФУЗИЯ, ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**

**И ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ**

**DIFFUSION, DISLOCATIONS AND PROBLEM OF STRENGTH**

**Теория твердофазной диффузии в металлах, сплавах и полупроводниках**

**при получении передовых материалов**

Б.Б. Хина

Физико-технический институт НАН Беларуси

ул. Купревича, 10, г. Минск, 220141, Беларусь

khina@tut.by

Приведен обзор выполненных автором теоретических работ по твердофазной диффузии в существенно неравновесных условиях. Рассмотрены следующие ситуации, имеющие место в ряде технологических процессов получения новых материалов, покрытий и устройств:

1) реакционная диффузии в бинарных системах с образованием интерметаллического соединения в изотермических условиях (отжиг тонкопленочных систем, начальная стадия химико-термической обработки металлов, например, алитирование);

2) реакционная диффузия в неизотермических условиях при высоких скоростях нагрева применительно к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС) в системах Ti-C и Ni-Al;

3) диффузия в металлах в однофазной системе (образование пересыщенного твердого раствора) в условиях интенсивной периодической пластической деформации (ИППД) при механическом легировании;

4) диффузия в полупроводниках при высокотемпературном отжиге после высокоэнергетической ионной имплантации легирующей примеси применительно к получению ультрамелких *p-n* переходов в монокристаллическом кремнии в сверхбольших интегральных схемах (СБИС).

В разработанных моделях учитываются физические процессы, протекающие при диффузионном массопереносе в конкретных ситуациях – например, роль граничной кинетики на начальных стадиях реакционной диффузии; генерация неравновесных точечных дефектов в металле при ИППД и их взаимодействие со стоками; возникновение, распад и диффузия пар “атом примеси – вакансия” и “атом примеси – собственный межузельный атом кремния” при диффузии имплантированных примесных атомов в кремнии. Показаны различия теоретических подходов к описанию диффузионного массопереноса в металлах и в полупроводниках, которые связаны с различными механизмами диффузии.

**Theory of solid-state diffusion in metals, alloys and semiconductors**

**at synthesis of advanced materials**

B.B. Khina

Physicotechnical Institute, National Academy of Sciences of Belarus

10 Kuprevich Str., Minsk 220141, Belarus

khina@tut.by

A review of theoretical works on solid-state diffusion in strongly non-equilibrium conditions, which were performed by the author, is presented. The following situations are considered, which take place in a number of processes connected with the production of advanced materials, coatings and devices:

(i) reaction-diffusion is binary systems accompanied with the formation of an intermetallic compound in isothermal conditions (annealing of thin films, initial stage of thermochemical treatment of metals such as aluminizing);

(ii) reaction-diffusion in non-isothermal conditions at high heating rates typical of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in the Ti-C and Ni-Al systems;

(iii) diffusion in metals in a single-phase system (formation of a supersaturated solid solution) in the conditions of intensive periodic plastic deformation (IPPD) at mechanical alloying;

(iv) diffusion in semiconductors at high-temperature annealing after high-energy ion implantation of a dopant in the production technology of ultra-shallow *p-n* junctions in monocrystalline silicon in very large scale integration (VLSI) circuits.

The developed models account for the process-specific physical processes that take place during diffusion, e.g., the role of interface kinetics at the initial stages of reaction diffusion; generation of non-equilibrium point defects in metals at IPPD and their interactions with sinks; generation, decomposition and diffusion of pairs “impurity atom-vacancy” and “impurity atom-silicon self-interstitial” at diffusion of implanted dopant atoms in silicon. The differences in theoretical description of diffusion mass transfer in metals and in semiconductors are outlined, which are connected with different mechanisms of diffusion.

**О точно и квази-точно решаемых уравнениях диффузии**

**и Фоккера-Планка во внешних полях**

Г.Г. Крылов\*, В.А. Гайсенок

Белорусский государственный университет, физический факультет,

220030, проспект Независимости, 4, Минск, Беларусь

\* krylov@bsu.by

Поиск точных решений диффузионного и уравнения Фоккера-Планка остается актуальной задачей как инструмента для более глубокого понимания фундаментальной физики процессов переноса на наноуровне, особенно для систем с нетривиальными топологическим свойствами.

Главной причиной является то, что полномасштабное компьютерное моделирование не позволяет уловить особенности поведения системы из-за огромных вычислительных затрат в условиях много-параметрической задачи. Мы обрисовываем проблему и делаем обзор теоретических аспектов и состояния дел в области точно решаемых и так называемых квази-точно решаемых задач для уравнений диффузии и Фоккера-Планка во внешних полях. Некоторые приложения развитого подхода к топологически нетривиальным потенциалам также обсуждаются.

**On exactly and quasi-exactly solvable diffusion**

**and Fokker-Planck equations in external field**

G.G. Krylov\* and V.A. Gaisyonok

Faculty of Physics, Belarusian State University

4 Nezavisimosti Avenue, Minsk 220030, Belarus

\* krylov@bsu.by

Search of the exact solutions of the diffusion and Fokker-Planck equations persists to be actual as an instrument of deeper understanding of underlying physics of transport phenomena on nanolevel especially in systems with non-trivial topological properties.

The main reason is that full scale computer simulations do not allow to catch qualitatively peculiar behaviour due to huge computational cost in many parameters' problem. We outline and review theoretical aspects and the state of art in the field of exactly solvable and the so called quasi-exactly solvable cases for the diffusion and Fokker-Planck equations in external fields. Some applications of the developed approach to topologically non-trivial potentials are discussed.

**Расчет равновесной концентрации вакансий с использованием информации преобразования**

А.Г. Колмаков 1\*, М.Л. Хейфец 2

1Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,

119334, Ленинский проспект, 49, Москва, Россия

2Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

\*[imetranlab10@mail.ru](mailto:imetranlab10@mail.ru)

В состоянии теплового равновесия в идеальном кристалле всегда присутствует определенное количество вакансий. При определенной температуре условием равновесия для кристалла является состояние с минимальной свободной энергией *F* = *U* –*S*,где *U* – внутренняя энергия кристалла, *S* – энтропия, *T* – температура. Равновесная концентрация вакансий будет соответствовать минимуму свободной энергии. Традиционная формула для оценки равновесной концентрации вакансий с учетом пренебрежения изменениями в колебаниях атомов возле вакансий выводится с точки зрения изменения свободной энергии Δ*F* при введении в кристалл *n* вакансий Δ*F* = *U* - *T*🞄Δ*S* = *n*🞄*E*o - *T*🞄Δ*S* путем расчета конфигурационной энтропии Δ*S* [1,2]. При этом осуществляется ряд сложных преобразований с последовательным использованием приближений. В результате формула равновесной концентрации вакансий, имеет вид *С*v=exp[-*E*o/*kT*], где *E*o - энергия образования одной вакансии, *k* - константа Больцмана, *Т* – температура.

Базирующиеся на использовании концепции информации преобразования, как меры нарушения симметрии в системе [3-5], представления в материаловедении, позволяют подойти к расчету равновесной концентрации вакансий в кристалле с другой стороны. В частности, определение изменения энтропии с точки зрения нарушения симметрии в системе "кристалл-вакансии" позволяет избежать приближений и достаточно сложных преобразований.

При принятии положения, что одна вакансия полностью занимает один узел в кристаллической решетке, исходную систему кристалла с числом узлов кристаллической решетки *N* и объемом *V*2 можно рассматривать как систему, состоящую из двух подсистем или частей: 1-я подсистема - идеальный кристалл без вакансий (число узлов кристаллической решетки *N*-*n*); 2-я подсистема - "мнимый" кристалл с объемом V1, в узлах решетки которого находятся n вакансий. При этом получаем: *N*/*V*2 = *n*/*V*1 = (*N-n*)/(*V2* - *V*1), *V*1/*V*2 = n/N, (*V*2-*V*1)/*V*2 = (*N-n*)/*N*.

Изменение энтропии при объединении (смешении) двух частей системы можно записать как: Δ*S* = *k*🞄*n*🞄*I*dir, где *I*dir - информация прямого преобразования [3,4]. После математических преобразований получаем формулу равновесной концентрации вакансий, очень близкую к классической, но более точную: *n*/*N* = *C*v = (1/e)🞄exp[-*E*o/*kT*].

*ИМЕТ РАН работа выполнена в рамках госзадания № 075-00947-20-00, ИПФ НАН Беларуси в рамках задания 2.1.23. подпрограммы «Металлургия», ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении».*

1.Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.

2.Kittel C. Introduction to Solid State Physics. – New Caledonia: John Wiley & Sons, 2005. – 704 p.

3.Vstovky G.V. Transform information: A symmetry breaking measure // Found.Phys., 1997, V.27. №10. P.1413-1444.

4.Встовский Г.В. Элементы информационной физики. - М.: МГИУ, 2002.- 260 с.

5.Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.-116 с.

**Calculation of equilibrium vacancy concentration using transformation information**

A.G. Kolmakov 1\*, M.L. Kheifetz2

1A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences,

49 Leninsky Prospekt, 119334, Moscow, Russia

2 Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

\*[imetranlab10@mail.ru](mailto:imetranlab10@mail.ru)

In a state of thermal equilibrium, an ideal crystal always contains a certain amount of vacancies. At a certain temperature, the equilibrium condition for a crystal is the state with the minimum free energy *F = U –S*, where *U -* is the internal energy of the crystal, *S -* is the entropy, and *T -* is the temperature. The equilibrium concentration of vacancies will correspond to the minimum of free energy. The traditional formula for estimating the equilibrium concentration of vacancies, taking into account the neglect of changes in atomic vibrations near vacancies, is derived from the point of view of the change in free energy Δ*F* when n vacancies are introduced into the crystal Δ*F* = *U* - *T*🞄Δ*S* = *n*🞄*E*o - *T*🞄Δ*S* by calculating the configurational entropy Δ*S* [1,2]. In this case, a number of complex transformations are carried out with the successive use of approximations. As a result, the formula for the equilibrium concentration of vacancies has the form *С*v=exp[-*E*o/*kT*], where *E*o is the energy of formation of one vacancy, *k* is the Boltzmann constant, and *T* is the temperature.

Based on the use of the concept of information transformation as a measure of symmetry breaking in the system [3-5], representations in materials science, allow us to approach the calculation of the equilibrium concentration of vacancies in a crystal from the other side. In particular, the determination of the entropy changes from the point of view of symmetry breaking in the "crystal-vacancy" system allows one to avoid approximations and rather complicated transformations.

Assuming that one vacancy completely occupies one site in the crystal lattice, the initial crystal system with the number of crystal lattice sites *N* and volume *V*2 can be considered as a system consisting of two subsystems or parts: the 1st subsystem is an ideal crystal without vacancies (the number lattice sites *N-n*); The 2nd subsystem is an "imaginary" crystal with volume *V*1, in the lattice sites of which there are n vacancies. In this case, we get: *N*/*V*2 = *n*/*V*1 = (*N-n*)/(*V2* - *V*1), *V*1/*V*2 = n/N, (*V*2-*V*1)/*V*2 = (*N-n*)/*N*.

The change in entropy when combining (mixing) two parts of the system can be written as: Δ*S* = *k*🞄*n*🞄*I*dir, where *I*dir is the direct transformation information [3,4]. After mathematical transformations, we obtain a formula for the equilibrium concentration of vacancies, which is very close to the classical one, but more accurate: *n*/*N* = *C*v = (1/e)🞄exp[-*E*o/*kT*].

*IMET RAN the work was carried out within the framework of state assignment No. 075-00947-20-00, IAP NAS of Belarus within the framework of assignment 2.1.23. subprograms "Metallurgy", SPSR "Mechanics, metallurgy, diagnostics in mechanical engineering".*

1.Novikov I.I., Rozin K.M. Crystallography and Crystal Lattice Defects. - M.: Metallurgy, 1990.- 336p.

2.Kittel C. Introduction to Solid State Physics. - New Caledonia: John Wiley & Sons, 2005. - 704 p.

3. Vstovsky G.V. Transform information: A symmetry breaking measure // Found. Phys., 1997, V.27. No. 10. P.1413-1444.

4. Vstovsky G.V. Elements of Information Physics. - M .: MGIU, 2002. - 260 p.

5.Vstovsky G.V., Kolmakov A.G., Bunin I.Zh. Introduction to Multifractal Parameterization of Material Structures. - Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001.-116 p.

**Склерометрия ионно-плазменных покрытий на основе хрома**

**на подложках из стали 42CrMo4**

А.А. Миневич\*

Ганноверский центр триботехнологии,

TTZH, Bärenhof 26A, D-30823 Garbsen, Bundesrepublik Deutschland

\* alexander.minewitsch@ttzh.de

В докладе обсуждаются некоторые экспериментальные результаты склерометрической оценки свойств поверхностей стали 42CrMo4 (российский аналог 38ХМ), применяемой в приводных тягах, коленвалах, шестернях, пружинах, полотнах пил, ножницах и др.

Ионно-плазменные покрытия были нанесены вакуумно-дуговым методом на плоские полированные диски из стали. Толщина покрытий металлического хрома, а также его карбида, нитрида и оксида составляла 0,5-1,0 мкм. Ионная бомбардировка проводилась в течение 1 мин. при напряжении на подложке 1 кВ, на все образцы в течение 3 мин наносился подслой хрома. Подача газа начиналась при остаточном давлении 0,002 Па, давление реакционного газа (азот, кислород, или пропан) составляло 0,2 Па. При нанесении покрытий ток дуги составлял 80 А, а напряжение 145 В. Точность измерения толщины составляла ± 0,05 мкм, а температура подложки в процессе напыления измерялась с точностью Δt = ± 10°C.

Склерометрическое измерение производили в прецизионном приборе шариковым (радиус 0,5 мм) индентором из стали 100Cr6 (российский аналог ШХ15) под нагрузкой 1 Н, линейной скорости 5 мм / мин, на длине 7 мм.

Сравниваемыми выходными параметрами испытаний были глубина вдавливания, остаточная глубина и коэффициент трения. Например для серии покрытий толщиной 0,5 мкм сравнение металлического хрома с его нитридом и оксидом показало, что минимальный коэффициент сухого трения был зафиксирован на металлическом хроме 0,051, тогда как его значение для оксида составило 0,092, а для нитрида 0,073. Минимальная глубина вдавливания индентора 0,676 мкм была установлена для нитрида хрома, соответственно для хрома она составляла 0,914 мкм, а для оксида хрома 1,154 мкм. Остаточная глубина дорожки трения для нитрида хрома составляла 0,206 мкм, для оксида хрома 0,209 мкм, а для покрытия из чистого хрома 0,342 мкм.

**Scratch testing of chromium based PVD coatings on the steel 42CrMo4 substrates**

A.A. Minewitsch\*

TTZH Tribologie & Hochtechnologie GmbH, Bärenhof 26A, D-30823 Garbsen,

Federal Republic of Germany

\* alexander.minewitsch@ttzh.de

Presented are some experimental results of scratch surface testing of steel 42CrMo4 used in drive rods, crankshafts, pinions, gearwheels, springs, saw blades, scissors, etc.

PVD coatings were deposited onto the flat polished discs by means of cathodic arc evaporation in vacuum. The thickness of metallic chromium and also its carbide, nitride and oxide was in the range 0,5-1,0 µm. Ion bombardment was carried out during 1 min. at the voltage on the substrate 1kV, chromium sublayer was deposited on all samples during 3 min. Gas supply was started at the residual pressure 0,002 Pa, and the applied reactionary gas (nitrogen, oxygen, or propane) pressure was 0,2 Pa. During the deposition of coatings the arc current was 80 A and voltage 145 V. Accuracy of the thickness measurement was ±0,05 µm, and substrate temperature during the deposition was measured with an accuracy Δt=±10°C.

The scratching in a high precision device was done using a ball (radius 0,5 mm) indenter made of steel 100Cr6 under the load 1 N, linear speed 5 mm/min, on the length 7 mm.

The compared output parameters of the tests were penetration depth, residual depth and friction coefficient. E.g. for the series of coatings with a thickness of 0,5 μm, a comparison of metallic chromium with its nitride and oxide showed that the minimum coefficient of dry friction was observed on metallic chromium 0,051, while its value for oxide was 0,092, and for nitride 0,073. The minimum indenter penetration depth of 0,676 μm was found for chromium nitride, respectively, for the pure chromium it was 0,914 μm, and for chromium oxide 1,154 μm. The residual depth of friction tracks for chromium nitride was 0,206 µm, while for chromium oxide 0,209 µm, and for a pure chromium coating 0,342 µm.

**Испытания прибора ИИК НТ-800 для оценки повторяемости и воспроизводимости результатов измерений**

А.Ю. Кутепов, А.П. Крень, Г.А. Ланцман

Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

ales.kutepov@gmail.com

Работа посвящена оценке точности и стабильности работы прибора ИИК НТ-800 с чувствительными элементами в виде магнитов, предназначенных для измерения толщины и оценки напряжений. Оценка точности проводились через установление пределов повторяемости и воспроизводимости с целью установления необходимого числа измерений для расчёта достоверного среднего арифметического.

Вычислялись меры статистики Менделя *h* и *k*, которые показали отсутствие выбросовых операторов и наличие незначительное количество выбросов среди базовых элементов измерений (согласно СТБ ИСО 5725 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений».). Был проведен расчет и анализ дисперсий повторяемости и воспроизводимости результатов измерений. Проведенные испытания показали высокую прецизионность результатов измерений прибора. Действия оператора оказывают малое влияние на показания прибора. Коэффициенты вариации измеренных значений, рассчитанные по дисперсиям повторяемости и воспроизводимости, на всех уровнях не превышают 1,05%.

На основании значений дисперсий повторяемости и воспроизводимости рассчитаны пределы повторяемости и воспроизводимости измеренных значений. Данные характеристики позволяют при контроле реальных изделий оперативно исключить из выборки ошибочные результаты отдельных измерений, а также уменьшить количество измерений, необходимое для достоверного определения контролируемых величин прибора: толщины и уровня напряжений.

**Testing IIC NT-800 device to determine repeatability and reproducibility of measurement results**

A.J. Kutepov, A.P. Kren, G.A. Lantsman

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

ales.kutepov@gmail.com

The work is devoted to the assessment of the accuracy and stability of the IIC NT-800 device with sensitive elements in the form of magnets, intended for measuring the thickness and stress levels. Accuracy assessment was carried out through the establishment of the repeatability and reproducibility limits in order to get the required number of measurements to calculate the reliable arithmetic mean.

The Mendel statistics measures h and k were calculated, which showed the absence of outlying operators and the presence of an insignificant amount of outliers among the basic measurement elements (according to ISO 5725 “Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results”.). The calculation and analysis of dispersions of repeatability and reproducibility of measurement results was carried out. The tests have shown a high precision of the instrument's measurement results. Operator actions have little effect on the device readings. The coefficients of variation of the measured values, calculated from the repeatability and reproducibility variances, at all levels do not exceed 1.05%.

The repeatability and reproducibility variances were used to calculate the repeatability and reproducibility limits of the measured values. These characteristics allow to promptly exclude from the sample erroneous results of individual measurements, when testing real products, as well as to reduce the number of measurements required to reliably determine the controlled values of the device: thickness and stress levels.

**Прочность изделий, полученных из цементно-песчаных смесей методом аддитивного производства**

М.Л. Хейфец\*1, Д.В.Семененко2, А.В.Таболич2, Д.C.Ратуцкая2

1Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

2 ОАО «НПО Центр»,

220018, ул. Шаранговича, 19, г. Минск, Беларусь

\*[mlk-z@mail.ru](mailto:mlk-z@mail.ru)

Основной целью исследований было определение влияния гранулометрического состава исходных компонентов цементно-песчаных смесей на прочностные характеристики изделий, получаемых методом аддитивного производства. В качестве исходных материалов были выбраны: цемент (*Ц*) марки ПЦ500-Д0 и песок (*П*) двух фракций – 0,5÷1,25 мм (*П*1) и 1,25÷2,5 мм (*П*2). Для приготовления смесей использовались фракции цемента со следующими гранулометрическими характеристиками (удельной поверхностью *S* и средним размером частиц *d*): *S*1 = 10624 см2/см3, *d*1 = 7,28 мкм (*Ц*1), *S*2 = 5651,3 см2/см3, *d*2 = 15,87 мкм (*Ц*2), *S*3 = 5175,2 см2/см3, *d*3 = 18,4 мкм (*Ц*3) и *S*4 = 4230,3 см2/см3, *d*4 = 21,59 мкм (*Ц*4). При этом выдерживалось соотношение цемента и песка *Ц*/*П* = 1:2,4. Воды к смеси сухих компонентов добавлялось такое количество, чтобы водоцементное соотношение *В*/*Ц* = 0,5. В качестве формуемых изделий были кубики с длиной ребра 70,7 мм, которые затем испытывались на прочность согласно ГОСТ 5802-86 в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток.

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что для строительного 3D-принтера следует применять расходный материал на основе цемента с удельной поверхностью не менее 10 000 см2/см3, благодаря чему скорость набора прочности готовой продукцией будет в 1,5÷2 раза выше, чем при использовании цемента марки ПЦ500-Д0 ГОСТ 10178-85. Гранулометрический состав песка в исследованном диапазоне размеров его частиц не оказывает серьезного влияния на прочностные характеристики изделий. Поэтому выбор его фракции для приготовления цементно-песчаной смеси целесообразнее всего осуществлять с учетом лишь экономических факторов производства.

**Durability of the products prepared from cement-sand mixtures by the method of additive manufacture**

M.L. Kheifetz\*1, D.V. Semianenka2, A.V. Tabolich2, D.S. Ratutskaya2

1Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,

16 Akademicheskaya st., 220072, Minsk, Belarus

2Open Joint Stock Company “NPO Center”

19 Sharangovich st., 220018, Minsk, Republic of Belarus

\*[mlk-z@mail.ru](mailto:mlk-z@mail.ru)

The main objective of this research was to determine the effect of the granulometric composition of initial components of cement-sand mixtures on the strength characteristics of products obtained by the method of additive manufacturing. As starting materials we have chosen cement (C) grade PC500-D0 and two fractions of sand (S), viz. 0,5÷1,25 mm (S1) and 1,25÷2,5 mm (S2).

For the preparation of mixtures, the cement fractions with the following characteristics (specific surface *Ss* and average particle size *d*) were used: *Ss*1 = 10624 cm2/cm3, *d*1 = 7,28 μm (*C*1), *Ss*2 = 5651,3 cm2/cm3, d2 = 15,87 μm (*C*2), *Ss*3 = 5175,2 cm2/cm3, *d*3 = 18,4 μm (*C*3) and *Ss*4 = 4230,3 cm2/cm3, *d*4 = 21,59 μm (*C*4). The cement-to-sand ratio of 1:2,4 was maintained. . Воды к смеси сухих компонентов добавлялось такое количество, чтобы водоцементное соотношение *В*/*Ц* = 0,5. В качестве формуемых изделий были кубики с длиной ребра 70,7 мм, которые затем испытывались на прочность согласно ГОСТ 5802-86 в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток. Water (W) was added to the mix of dry components to provide the cement-to water ratio W/C = 0.5. The mixtures were formed into cubical samples with the edge length of 70.7 mm and subjected to strength test according to standard agree GOST 5802-86 after curing for 3, 7, 14 and 28 days.

From the obtained results a conclusion is drawn that for a 3D printer used in construction it seems necessary to utilize a cement-base mixture with a specific surface area of no less than 10,000 cm2/cm3. Due to this factor, the strength gain rate for finished products will be by the factor of 1.5–2 higher than with the use of cement grade PC500-D0 GOST 10178-85.

The granulometric composition of sand in the range of particle sizes studied in this work do not have a profound effect on the strength characteristics of the products. Therefore, it is advisable to choose the fraction of sand for preparation of a cement-sand mix on the basis of economic factors only.

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА**

**NONDESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS**

**Метрологические аспекты неразрушающего измерительного контроля**

\*В.Л. Соломахо 1 , Б.В. Цитович Б.В2.

1Белорусский национальный технический университет

Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65

2Белорусский государственный институт повышения квалификации по стандартизации, метрологии и управлению качеством

ул. Мележа, 3-314, 220113, г. Минск, Беларусь

\*v.solomakho@gmail.com

Классическая метрология обеспечивает возможности достижения удовлетворительного решения разных измерительных задач, возникающих в процессе неразрушающего измерительного контроля параметров, представляющих собой нормированные физические величины. Общий алгоритм решения задачи при измерительном контроле можно представить следующим образом:

1. Получение действительного значения контролируемого свойства объекта.

2. Сопоставление полученной информации с требованиями к этому свойству для обнаружения соответствия/несоответствия действительного значения нормам.

Возникновение разных типов задач связано с особенностями нахождения действительного значения измеряемой величины при измерительном контроле. Для задач измерительного контроля параметра с двухпредельным ограничением (параметр с допуском) установлено соотношение допустимой погрешности измерения и допуска контролируемого параметра. При однопредельном ограничении задача считается некорректно поставленной, но разработаны рекомендации для выбора допустимой погрешности измерения, исходя из экономических соображений. Более сложной задачей является измерение с целью обнаружения наличия/отсутствия контролируемого свойства (номинально нулевой параметр), когда норма установлена по типу «трещины не допускаются». В такой ситуации допустимая погрешность измерения при контроле должна гарантировать обнаружение величины, которая больше нуля, при том, что любая обнаруженная величина обязательно будет больше нуля. В этом случае вознкает фактическая возможность необнаружения значимого свойства (пропуск брака) или ложного обнаружения свойства при его отсутствии (ложный брак). Выход из данной сложной ситуации состоит в нормировании пренебрежимо малого значения контролируемого параметра, которое можно признать равным нулю и выбора допустимой погрешности измерения, позволяющей гарантировано обнаружить контролируемый параметр, имеющий значение больше «нулевого».

**The metrological aspects of non-destructive measurement control**

V.L. Solomacho\* 1, B.V. Tsitovich2 .

1 Belarusian National Technical University,

65 Nezavisimosti Avenue, 220013, Minsk, Belarus.

2Belarusian State Institute for advanced training on standardization, metrology and quality management

3 Melezh str., 220113, Minsk, Belarus.

[\*vsolo@bntu.by](mailto:*vsolo@bntu.by)

Classical metrology provides an ability to achieve a satisfactory solution to various measurement problems arising in the process of non-destructive measurement control of parameters that are normalized physical quantities. The general algorithm for solving the problem during measurement control can be represented as follows:

1. Getting the actual value of the controlled property of the object.

2. Comparison of the received information with the requirements for this property to detect compliance / non-compliance of the actual value with the standards.

The emergence of different types of tasks is associated with the peculiarities of finding the actual value of the measured value during measurement control. For the tasks of measuring control of a parameter with a two-limit limitation (parameter with a tolerance), the ratio of the permissible measurement error and the tolerance of the controlled parameter is established. With a one-limit limitation, the problem is considered to be incorrectly posed, but recommendations have been developed for choosing the permissible measurement error based on economic considerations. A more difficult task is to measure in order to detect the presence / absence of a controlled property (nominally zero parameter), when the norm is set as “no cracks allowed”. In such a situation, the permissible measurement error during control must guarantee the detection of a value that is greater than zero, while any detected value will necessarily be greater than zero. In this case, the actual possibility of non-detection of a significant property (omission of marriage) or false detection of a property in its absence (false marriage) arises. The way out of this difficult situation consists in normalizing the negligible value of the monitored parameter, which can be considered equal to zero, and choosing the permissible measurement error, which makes it possible to reliably detect the monitored parameter with a value greater than "zero".

**Импульсно-лазерное возбуждение упругих волн в металлах и магнитных**

**жидкостях для акустического контроля и измерений**

А.Р. Баев1, А.Н. Митьковец2, Г.И. Кулак3, А.Л. Майоров1

1Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, Академическая 16, Минск

2Институт физики НАН Беларуси,

220072, пр-т Независимости 68, **,**Минск

3Мозырьский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина

247760, Студенческая 28, Мозырь.

[baev@iaph.bas-net.by](mailto:h.bandarenka@gmail.com)

Теоретически и экспериментально изучены возможности комбинированного оптоакустического (ОА) контроля металлов на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов волнами Рэлея и Лэмба. Получены зависимости амплитуды **A** возбуждаемых волн от положения центра *x* пятна лазерного луча (ЛЛ) относительно усталостной трещины и геометрии пятна. Установлен резонансный характер зависимости **A**(x) при пересечении пятном ЛЛ трещины как в отсутствие, так и при наличии загрязнения поверхности объекта. Причем максимальный рост величины **A** составляет ~6-7 раз при оптимальном значении поперечного размера d пятна ЛЛ, имеющего форму длинной полосы или круглого пятна. Данные расчетов хорошо согласуются с опытными данными. Подобный эффект достигается и при ОА возбуждении волн Лэмба в металлических пластинах с искусственными трещинами. Максимальная чувствительность метода достигается, прежде всего, при приеме волн преобразователем под углом, соответствующим 1-му критическому углу β1. В этом случае наряду с наиболее быстрой симметричной s0 модой наблюдается сопутствующая мода - наиболее “чувствительная” (~16-20 дБ) к выявлению дефектов. Ее рабочая частота превышает частоту s0 моды в 3 раза.

Для повышения эффективности выявления объемных дефектов предложено использовать магнитные жидкости (МЖ) в качестве управляемого магнитным полем преобразователя света в звук и для создания акустического контакта с контролируемым объектом. Представлена теоретическая трактовка и экспериментально показано, что функция прохождения сигнала N измерительного ОА тракта в зависимости от концентрации магнитной фазы q имеет пологий максимум при q→q\*. Величина Nmaх и q\*, а также спектр возбуждаемых волн существенно зависят от упругих свойств световода ЛЛ и дисперсионной основы коллоида. Даны рекомендации и предложены схемы применения МЖ: а) для управления направленностью возбуждаемых импульсно-лазерным излучением волн в твердых и жидких средах путем их фокусировки или изменения угла ввода-приема; б) измерения интенсивности лазерного излучения в широком диапазоне световых волн.

**Pulsed laser excitation of elastic waves in metals and magneticliquids for acoustic testing and measurements**

A.R. Baev1, A.N. Mitskovets2, G.I. Kulak3, A.L. Mayorov1

1Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus,

220072, Akademicheskaya 16, Minsk

2Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,

220072, Nezavismosti Avenue, 68, Minsk

3I.P.Shamyakin Mozyr State Pedagogical University

28 Student’s St., Mozyr 247760,s Belarus

The possibilities of the application of combined optoacoustic (OA) method to detect surface and subsurface defects by Rayleigh and Lamb waves have been studied theoretically and experimentally. The dependences of the amplitude **A** of the excited waves vs. the laser beam (LB) spot position x in regard to the fatigue crack and the spot geometry are studied. It was found that the resonant character of the dependence **A**(x) take place when LB spot moving through the crack independently on the absence ore presence of the layer contamination on the object surface. Moreover, the maximum increase in the **A** value is of ~6-7 times when the optimal value of the transverse dimension d of the LB spot to be. Its form may be of a long strip or a round spot. The theory calculated data are in a good agreement with the experimental data. A similar effect is observed when OA excited Lamb waves propagate in metal plates with artificial cracks. The maximum sensitivity of the combined testing method is achieved when the ultrasonic probe receives waves at an angle close to the first critical angle β1. In this case two the more intensive modes are observed. The first one is the fastest symmetric s0 mode the measured frequency of which is close to the operating frequency of the ultrasonic probe.

But the second accompanying mode is the more “sensitive” to defect detection (by ~15-20 dB). It is interesting to note that the measured frequency of the s0 mode in ~3 time lesser then frequency of the second mode.

To increase the efficiency of the flaw detection in solids it is proposed to use magnetic fluids (MF) as a field-controlled transducer of light into sound and to create an acoustic contact with a controlled object. A theoretical interpretation is presented and it is experimentally shown that the signal transmission function ***N*** of the measuring OA path, depending on the concentration of the magnetic phase q, has a gentle maximum at q→q \*. The values of Nmaх and q\*, as well as the spectrum of the excited waves, depend on the elastic properties of the ***LB*** fiber and thermophysic properties of the MF dispersion base.

Recommendations are given and schemes for using MF are proposed: a) to control the directivity of elastic waves excited by pulsed-laser radiation in solid and liquid media by focusing them or changing the input-receiving angle; b) measuring the intensity of the laser radiation in a wide range of light waves.

**Контроль толщины хромового покрытия вихретоковым методом**

А.В. Чернышев\*, И.Е. Загорский, В.И. Шарандо

Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, Беларусь, г. Минск, ул.Академическая, 16

\* [lab1@](mailto:lab1@)iaph.bas-net.by

Рассмотрен вопрос контроля толщины *d* хромового покрытия на ферромагнитном основании при фазовом способе вихретокового контроля. Фаза φ вносимой в преобразователь ЭДС, при неизменных остальных параметрах, зависит от удельной электропроводности σ покрытия. Электролитически осажденный хром характеризуется непостоянством величины σ даже при строгом соблюдении технологии его нанесения. Удельная электропроводность может также изменяться при выполнении после осаждения термической обработки изделия ввиду сильной зависимости размеров зерен хрома от температуры этой обработки, из-за образования на границах зерен оксидов, в результате возникновения в покрытии микротрещин. Соответственно, важной проблемой при вихретоковой толщинометрии является учёт σ покрытия, так как без такого учета погрешность определения толщины покрытия может быть недопустимо большой. На основе аналитических расчетов и экспериментальных данных определены погрешности измерения *d*, возникающие при вариациях величины σ, а также удельной электропроводности и магнитной проницаемости основания.

**Control of the thickness of chromium coating using eddy current method**

A.V. Chernyshev\*, I.E. Zagorskij, V.I. Sharando

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus,

Akademicheskaya Str, 16, 220072, Minsk,

\* [lab1@iaph.bas-net.by](mailto:lab1@iaph.bas-net.by)

The issue of control of the thickness *d* of a chromium coating on a ferromagnetic base at the phase method of eddy current control is considered. The phase φ of the EMF introduced into the eddy current transducer depends on the electrical conductivity σ of the coating. Electrolytically deposited chromium is characterized by variability of the σ value even with strict adherence of the technology of its deposition. Electrical conductivity can also change when performing heat treatment of products after deposition due to the strong dependence of the size of the chromium grains on the temperature of this treatment, due to the formation of oxides at the grain boundaries, as a result of the occurrence of microcracks in the coating. Accordingly, an important problem in eddy current thickness measurement is taking into account the σ of the coating, since without such consideration, the error in determining the thickness of the coating can be unacceptably large. On the basis of analytical calculations and experimental data, the measurement errors of *d* have been determined that arise with variations in the value of σ, as well as with variations in the values of the electrical conductivity and magnetic permeability of the base.

**Неразрушающий контроль изменений поверхности мембранных диффузионных фильтров при обратимом водородном легировании**

Акимова О.В.\*, Терешина И.С., Каминская Т.П.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Россия, Москва, 119991, Ленинские горы, д.1, стр. 2

\* akimova@physics.msu.ru

Выполнено исследование морфологии поверхности мембранного диффузионного фильтра из сплава Pd-5.3 ат. % In-0.5 ат. % Ru, востребованного в процессах диффузионной сепарации водорода высокой степени чистоты [1] в обратно рассеянных и вторичных электронах на растровом электронном микроскопе Supra\_MSU при ускоряющем напряжении 10 кВ с детектором высокого разрешения Inlense и методом атомно силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) “Smena-A” (платформа “Solver” производства ЗАО НТ-МДТ, Россия). Мембранный сплав Pd-5.3 ат. % In-0.5 ат. % Ru разработан и выполнен из материалов высокой степени чистоты исследовательской группой Института металлургии им. А.А. Байкова (ИМЕТ РАН) [1].

АСМ исследования поверхности проведены как в контактной, так и полуконтактной моде с применением стандартных кремниевых кантилеверов HA\_NC ETALON длиной 80-110 мкм с резонансными частотами 130-250 кГц и радиусом закругления острия 10 нм. АСМ-изображения обрабатывались программными средствами визуализации и анализа Nova 873 Grain Analysis.

Цель работы состояла в получении сведений о различиях изменений поверхности металлических мембран, работающих в направленных потоках водорода.

Получены АСМ-изображения (фазовый контраст) поверхности мембранных фильтров из сплава Pd-5.3 ат. % In-0.5 ат. %Ru после электролитического гидрирования [2]. Выявлены изменения в топологии поверхности мембранного фильтра и различия деформационных процессов со стороны входа и выхода потока водорода.

1. Burkhanov G.S, Gorina N.B., Kolchugina N.B., Roshan N.R.Palladium-Based Alloy Membranes for Separation of High Purity Hydrogen from Hydrogen-Containing Gas Mixtures // Platinum Metals Rev. 2011. V. 55. Iss. 1. P. 3–12.

2.Авдюхина В.М., Акимова О.В., Левин И.С, Ревкевич Г.П. Особенности α → β превращения в системе Pd–In–Ru–H // Поверхность*.* Рентгеновские,синхротронные инейтронные исследования*.* 2014. № 1.С. 44–48.DOI:10.7868/S0207352814010065

**Non-destructive control of changes in the surface of membrane diffusion filters during reversible hydrogen doping**

Akimova O. V.\*, Tereshina I. S., Kaminskaya T. P.

Lomonosov Moscow State University,

Moscow, Russia, 119991, Leninskiye Gory, 1, 2

\* akimova@physics.msu.ru

The surface morphology of membrane diffusion filter of composition Pd-5.3 at.% In-0.5 at.% Ru is studied. This alloy is in demand in the processes of diffusion separation of high-purity hydrogen [1] and surface morphology of the membrane is studied in backscattered and secondary electrons on the Supra\_MSU scanning electron microscope at an accelerating voltage of 10 kV with a high-resolution detector Inlense and atomic force microscopy (AFM) on a Smena-A scanning probe microscope (SPM) (Solver platform manufactured by NT-MDT, Russia). The membrane of Pd-5.3 at.% In-0.5 at.% Ru alloy was developed and prepared from high purity materials by the research group of the Baikov Institute of Metallurgy (IMET RAS) [1]. AFM surface studies were performed in both contact and semi-contact modes using standard HA\_NC ETALON silicon cantilevers with a length of 80-110 microns with resonant frequencies of 130-250 kHz and a rounded tip radius of 10 nm. Analysis of AFM images was carried out using software package Nova 873 Grain Analysis Visualization and Analysis.

The aim of this work is to obtain information about the differences in surface changes of metal membranes operating in the directed hydrogen flows.

The AFM images (phase contrast) of the membrane filters surface of Pd-5.3 at % In-0.5 at. % Ru alloy after electrolytic hydrogenation are obtained [2]. Changes in the surface topology of the membrane filter and differences in deformation processes from the input side and output side of the hydrogen flow are revealed.

1. Burkhanov G.S, Gorina N.B., Kolchugina N.B., Roshan N.R.Palladium-Based Alloy Membranes for Separation of High Purity Hydrogen from Hydrogen-Containing Gas Mixtures // Platinum Metals Rev. 2011. V. 55. Is. 1. P. 3–12.

2.Avdyukhina V.M., Akimova O.V., Levin I.S., and Revkevich G.P. Peculiarities of α → β Tansformations in the Pd–In–Ru–H System // Journal of Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. Vol. 8. No. 1. P. 40–44.DOI:10.1134/S1027451014010066.

**Контроль качества обработки и управление процессом упрочнения деталей наплавкой в электромагнитном поле**

Т.А.Алексеева1,П.А.Витязь2, А.И.Гордиенко3, Н.Л.Грецкий4, Н.А.Кусакин5, М.Л.Хейфец6\*

1Полоцкий государственный университет

Ул. Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь

2 Объединённый институт машиностроения НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 12, г. Минск, Беларусь

3Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. Купревича, 10, г.Минск, 220141, Беларусь,

4ОАО «НПО Центр», 220018, ул. Шаранговича, 19, г. Минск, Беларусь

5Институт «Кадры индустрии», Министерство промышленности, Беларусь

220119, г. Минск, ул. Карбышева, 25, Беларусь

6Институт прикладной физики НАН Беларуси,

220072, ул. Академическая, 16, г. Минск, Беларусь

\*mlk-z@mail.ru

Предложена методология управления качеством, основанная как на применении традиционных методов статистического контроля и его корреляционных оценок для объектов и процессов производства, так и на построении нелинейных многофакторных регрессионных моделей технологических и метрологических процессов, и использовании дисперсионного анализа точности параметров. Исследования процессов упрочнения и восстановления деталей наплавкой в электромагнитном поле, при совмещении нанесения покрытий с упрочняющим деформированием, позволили выделить особенности управления процессами, а также выработать рекомендации по их техническому контролю.

При совмещенной обработке прослеживается строгая иерархия технологических воздействий – от термоэлектрических, через механические, к электромагнитным влияние воздействий падает. Это заметно при исключении из рассмотрения взаимовлияния воздействий через факторы, определяющие производительность обработки. Для стабилизации процесса, управление совмещенной термомеханической обработкой в электромагнитном поле при формировании структуры материала с обеспечением рельефа поверхности, целесообразно проводить, используя последовательность факторов, обеспечивающих сначала интенсивность, а затем производительность обработки.

При нанесении износостойких покрытий электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием целесообразно следить за устойчивостью процесса и проводить экспресс-оценку твердости покрытия, а контроль физико-механических, геометрических и эксплуатационных параметров качества осуществлять после совмещенной обработки с помощью контрольных карт.

**Quality control of processing and control of the hardening process of parts**

**by surfacing in an electromagnetic field**

T.A. Alekseeva1, P.A. Vityaz2, A.I. Gordienko3, N.L. Gretsky4, N.A. Kusakin5, M.L. Kheifetz6\*

1Polotsk State University, 29 Blokhin Str., Novopolotsk, 211440, Belarus

2Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,

12 Akademicheskaya Str., Minsk 220072, Belarus

3Physicotechnical Institute, National Academy of Sciences of Belarus

10 Kuprevich Str., Minsk 220141, Belarus

4Open Joint Stock Company «NPO Center» 19 Sharangovich st., 220018, Minsk, Republic of Belarus

5Institute “Personnel of the industry”, Ministry of industry, Belarus

220119, Minsk, Karbysheva str., 25, Belarus

6 Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus

220072, Minsk, Akademicheskaya, 16

\*mlk-z@mail.ru

A quality management methodology is proposed, based both on the use of traditional methods of statistical control and its correlation estimates for objects and production processes, and on the construction of nonlinear multivariate regression models of technological and metrological processes, and the use of analysis of variance for the accuracy of parameters. Studies of the processes of hardening and restoration of parts by surfacing in an electromagnetic field, when combining the deposition of coatings with hardening deformation, made it possible to highlight the features of process control, as well as to develop recommendations for their technical control.

With combined processing, a strict hierarchy of technological influences is traced - from thermoelectric, through mechanical, to electromagnetic influence of influences decreases. This is noticeable when excluding from consideration the mutual influence of influences through the factors that determine the processing performance. To stabilize the process, the control of the combined thermomechanical treatment in an electromagnetic field during the formation of the structure of the material with the provision of the surface relief, it is advisable to carry out using a sequence of factors that first provide the intensity and then the productivity of the processing.

When applying wear-resistant coatings by electromagnetic surfacing with surface plastic deformation, it is advisable to monitor the stability of the process and conduct an express assessment of the hardness of the coating, and control the physical-mechanical, geometric and operational quality parameters after combined processing using control charts.

**Оценка технического состояния комплексов глубокой разработки угля методами вибрационной диагностики**

Копытин Д. В.1\*, Герике Б. Л.1,2 , Дрозденко Ю. В.1

1 Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

650099 г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

2 Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

650056 г. Кемерово, проспект Ленинградский, 10

\*kopytin.denis@mail.ru

Применение принципиально новых комплексов типа SHM при открыто-подземной разработке угольных пластов остро ставит проблему перехода от системы планово-предупредительных ремонтов к системе профилактического обслуживания по фактическому техническому состоянию узлов и агрегатов комплексов, определяемому на основе анализа механических колебаний, поскольку при изменении технического состояния машины вибрационная сигнатура также изменится, что может быть использовано для обнаружения зарождающихся дефектов до того, как они станут критическими.

На основе результатов диагностического обследования комплекса глубокой разработки угля построены опорные спектральные маски для каждого из узлов и агрегатов, нормирующие уровень интенсивности вибрации в различных частотных областях спектров, которые были использованы для оценки их технического состояния.

Мониторинг технического состояния комплексов глубокой разработки угля на протяжении двух лет на разрезах Кузбасса подтвердил эффективность использования разработанного подхода для перехода на систему профилактического обслуживания с использованием метода анализа виброакустических сигналов, генерируемых в различных узлах и агрегатов.

*Результаты получены в рамках работы по договору РФФИ 13-05-98022 «Фундаментальные исследования в области совершенствования техники и технологии выемки забалансовых запасов угля с применением комплексов глубокой разработки пласта».*

**Assessment of the technical condition of complexes for deep coal mining by vibration diagnostics methods**

Kopytin D.V.1\*, Gerike B. L.1,2, Drozdenko Yu. V.1

1T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,

650000 Russian Federation, Kemerovo, Vesennaya st., 28.

2The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

650065 Russian Federation, Kemerovo, Leningradskiy ave.,10.

\*kopytin.denis@mail.ru

The use of fundamentally new complexes of the SHM type in open-pit mining of coal seams raises the problem of transition from the system of scheduled preventive maintenance to the system of preventive maintenance based on the actual technical condition of the units and assemblies of the complexes, determined on the basis of the analysis of mechanical vibrations. When the technical state of the machine changes, the vibration signature will also change, which can be used to detect incipient defects before they become critical.

Based on the results of a diagnostic survey of the SHM complex , reference spectral masks were constructed for each of the units and assemblies, normalizing the level of vibration intensity in various frequency ranges of the spectra, which were used to assess their technical condition.

Monitoring of the technical condition of complexes of deep coal mining for 2 years at the open-pit mines of Kuzbass confirmed the effectiveness of using the developed approach to switch to a preventive maintenance system using the method of analyzing vibroacoustic signals generated in various units and machines.

*The reported study was funded by RFBR and Kuzbass’s «Fundamental research of improving the equipment and technology of unrecoverable coal reserves extraction with Highwall mining systems», project number 13-05-98022.*