

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина”

8 - 10
АПРЕЛЯ
2025 г.

II НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
“ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ”
ПОСВЯЩЕНА 60-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА

СБОРНИК ТЕЗИСОВ



г. Донецк

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»
Физико-технический факультет Донецкого государственного университета

II НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ»
ФКС-2025

посвящена 60-летию
Донецкого физико-технического института
им. А.А. Галкина

8-10 апреля 2025 г.

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Донецк

ПРОГРАММНЫЙ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Решидова И.Ю.	к.ф.-м.н., ст.н.с.	председатель
Головчан А.В.	к.ф.-м.н., доц.	зам. председателя
Прокофьева О.В.	к.т.н.	секретарь
Варюхин В.Н.	д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. НАНУ	
Малашенко В.В.	д.ф.-м.н., проф.	
Тарасенко С.В.	д.ф.-м.н., проф.	
Ткач В.И.	д.ф.-м.н., ст.н.с.	
Юрченко В.М.	д.ф.-м.н., проф.	
Петренко А.Г.	д.ф.-м.н., проф. ФГБОУ ВО «ДонГУ»	

Физика конденсированного состояния : сборник тезисов II Научной конференции (8-10 апреля 2025 г., г. Донецк). – Донецк: ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», 2025. – 103 с.

Представлены тезисы II Научной конференции «Физика конденсированного состояния». Тезисы охватывают актуальные направления физики конденсированного состояния, связанные с экспериментальными и теоретическими исследованиями новых функциональных материалов, фазовых переходов и критических явлений, магнитных явлений, электронных и кинетических свойств. Отдельные направления конференции были посвящены разработке физических основ новых технологий обработки материалов, исследованию процессов деформации и физико-механических свойств под действием высоких давлений и внешних воздействий, разработке новых перспективных устройств и технологий.



ВЛИЯНИЕ ДОПИРОВАНИЯ САМАРИЕМ НА ПРОВОДИМОСТЬ КЕРАМИКИ $\text{La}_{5-x}\text{Sm}_x\text{Mo}_3\text{O}_{16+\delta}$, ПОЛУЧЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СООСАЖДЕНИЯ

**Барбашов В.И., Юрченко В.М., Прилипко С.Ю., Брюханова И.И.,
Бурховецкий В.В., Волкова Г.К.**

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
v.barbashov@mail.ru

Молибдаты редкоземельных элементов с флюоритоподобной структурой показывают в среднетемпературном интервале (400-700 °С) достаточно высокую ионную проводимость, сравнимую со стабилизированным иттрием диоксидом циркония, что делает актуальным поиск стабильных соединений этого класса материалов, в частности молибдатов лантаноидов. С целью расширения функциональных свойств данных материалов в последние годы стало активно развиваться направление, предполагающее дополнительное допирование различными химическими элементами путем частичного замещения ими лантаноидов либо молибдена [1].

Исследования импедансной методикой проводимости керамики состава $\text{La}_{2,5}\text{Sm}_{2,5}\text{Mo}_3\text{O}_{16+\delta}$, синтезированной твердофазным методом из смесей оксидов, показали, что керамические образцы находятся преимущественно в флюоритоподобной фазе заявленного состава, а содержание примесной фазы $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ не превышает 9,5 %. Полученные значения удельной проводимости $9,1 \cdot 10^{-3} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ и энергии активации $E = 0,91 \text{ eV}$ близки к значениям для керамики стабилизированного иттрием циркония. Обнаруженное на два порядка превышение величины зернограничного сопротивления по сравнению с объемной частью полного импеданса стало обоснованием проведения специальных исследований керамик $\text{La}_{2,5}\text{Sm}_{2,5}\text{Mo}_3\text{O}_{16+\delta}$ и $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$, полученных с использованием золь-гель технологии и методом соосаждения солей из водных растворов [2].

На рис. 1 представлены зависимости удельной проводимости от обратной температуры керамики состава $\text{La}_{5-x}\text{Sm}_x\text{Mo}_3\text{O}_{16+\delta}$ для $x = 0,3; 0,5; 1,0; 2,5$. С ростом концентрации самария наблюдается увеличение ионной проводимости. При температуре примерно 560 °С обнаруживается излом на зависимостях $\lg \sigma - 1/T$, который соответствует фазовому переходу из моноклинной в кубическую сфалеритоподобную фазу, наблюдающемуся для соединения $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ (LAMOХ).

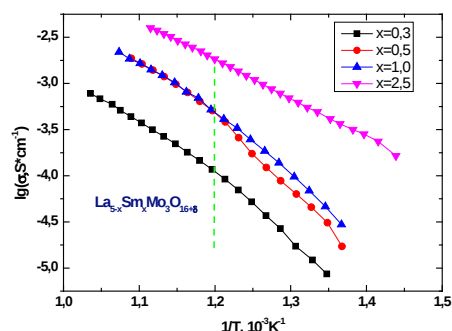


Рис.1. Зависимость удельной проводимости от температуры керамики $\text{La}_{5-x}\text{Sm}_x\text{Mo}_3\text{O}_{16+\delta}$

1. Подвижность кислорода материалов твердооксидных топливных элементов и каталитических мембран (обзор).

Электрохимия. 2019. Т.55. №8. С.899-918. DOI: 10.1134/S0424857019080140

2. В.И. Барбашов, В.М. Юрченко, Т.С. Бережная, Э.В. Чайка. ФТВД. Т. 33. № 3. 58-65 (2023).



ВЛИЯНИЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ YSZ

Беличко Д.Р.¹, Волкова Г.К.¹, Малецкий А.В.^{1,2}, Исаев Р.Ш.^{1,2}, Якименко М.Н.¹, Носолев И.К.¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

²ММО «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна

danil.belichko@yandex.ru

Поиск радиационно-резистивных материалов является принципиальной задачей ведущих научных центров. Получение радиационно-устойчивых материалов может способствовать развитию энергетической и аэрокосмической отраслей народного хозяйства. Одним из претендентов на роль такого материала могут выступить керамические материалы на основе нанопорошков стабилизированного диоксида циркония (YSZ) [1]. Наличие большого количества кислородных вакансий в YSZ способствует ионизационной устойчивости такого рода материалов [2].

В настоящей работе были проведены комплексные исследования процесса структурообразования керамики из нанопорошков состава $ZrO_2 + n \text{ mol. } Y_2O_3$ (где $n = 2, 3, 4, 8 \text{ mol. } \%$), облученных потоком протонов дозой $D_p = 10^{17} \text{ ед/см}^2$ и энергией 2 МэВ.

В ходе экспериментов обнаружен радиационно-индуцированный мартенситный m-t фазовый переход в образцах, легированных 2,3,4 mol.% Y_2O_3 , обусловленный распадом твердого раствора $ZrO_2 - Y_2O_3$ и последующей радиационно-индуцированной диффузией ионов Y^{3+} (рис.1).

Установлено укрупнение кристаллитов порошков YSZ, что подтверждается ростом энергии активации спекания примерно на 10% (рис.2), а также изменениями значений величин удельных площадей в дисперсных материалах. Методами ИК-Фурье спектроскопии и полной изотермы показано, что при облучении исследуемые порошки частично и полностью стабилизированного диоксида циркония адсорбируют на своей поверхности влагу, что свидетельствует об образовании мезопор (с диаметром более 20 нм) в наночастицах ZrO_2 .

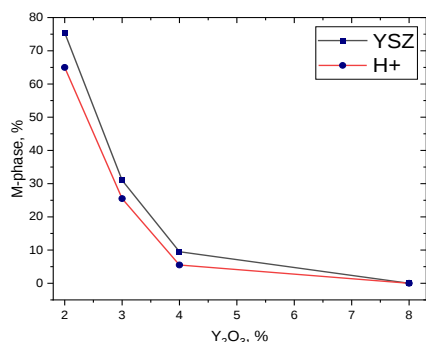


Рис.1. Содержание моноклинной модификации ZrO_2 в зависимости от содержания Y_2O_3 в исходном состоянии (черный) и после облучения (красный)

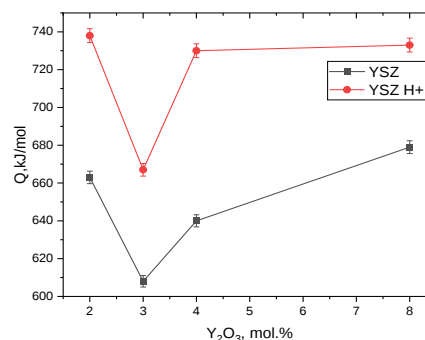


Рис.2 Энергия активации спекания нанопорошков ZrO_2 в зависимости от содержания Y_2O_3 в исходном состоянии (черный) и после облучения (красный)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10072.

1. Беличко Д.Р., Малецкий А.В., Волкова Г.К., Исаев Р.Ш. // Вопросы материаловедения, Т.119, №3, С.46-56, (2024).
2. Maletskii A, Volkova G, Belichko D. // Ceramics international, V.50, №.22, P. 46506-46515, (2024).



МЕХАНОАКТИВАЦИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ФАКТОРЫ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

Брюханова И.И., Глазунова В.А., Волкова Г.К., Головань Г.Н., Прилипко С.Ю.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
suprilipko@mail.ru

Целью работы являлось изучение влияния механоактивации и температуры отжига на переход оксида алюминия из гамма- в альфа-модификацию.

Альфа-оксид алюминия – наиболее термодинамически стабильная форма оксида алюминия. Обычно используется в конструкционной керамике и футеровочных материалах. На переход оксида алюминия в альфа-фазу влияют температура отжига порошка, длительность термической обработки, наличие примесей, механоактивация и промежуточное прокаливание порошков. Механоактивация представляет собой механическое воздействие, которое создает дефекты в кристаллической решетке, что способствует ускорению фазового перехода, снижению его температуры.

В работе исследованы порошки гидроксида алюминия промышленного производства, полученные методом химического осаждения из сульфата алюминия.

Часть порошков подвергалась предварительному отжигу при температурах 500 и 900°C.

При 500°C прокаливание способствует удалению адсорбированной воды и органических примесей, а также начальной кристаллизации метастабильных фаз. Прокаливание при 900°C может уменьшить дефекты структуры и улучшить однородность порошка.

Исследуемые порошки подвергались механоактивации в планетарной мельнице в течение 2 и 8 часов. Основной отжиг проводился при температурах 950°C, 1000°C, 1100°C.

Обработанные порошки исследовались методами рентгенофазового анализа (РФА) и электронной микроскопии. Результаты исследования по РФА представлены в таблице 1.

Таблица 1. Фазовый состав порошка после механоактивации и прокаливания

Предварительное прокаливание	0		500°C, 4ч ($\gamma_{н.т.}$)		900°C, 1ч ($\gamma_{в.т.} + \theta$)	
Основное прокаливание	1000°C, 1ч	1100°C, 1ч	1000°C, 1ч	1100°C, 1ч	1000°C, 1ч	1100°C, 1ч
Без помола	γ	$\alpha(20), \gamma(80)$	γ	$\alpha(33), \gamma(67)$	γ	$\alpha(37), \gamma(63)$
Помол 2ч	–	–	$\gamma + \theta$	$\alpha(46), \gamma(54)$	$\gamma + \theta$	$\alpha(51), \gamma(49)$
Помол 8ч	–	–	$\gamma + \theta$	$\alpha(49), \gamma(51)$	$\gamma + \theta$	$\alpha(42), \gamma(58)$

Выводы: механоактивация является эффективным методом снижения температуры перехода оксида алюминия в альфа-модификацию. Оптимальные результаты получены при механоактивации в течение 8 часов. Предварительный отжиг порошков при 500°C и 900°C способствует увеличению доли корунда при дальнейшей термообработке. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации процесса получения альфа- Al_2O_3 в промышленных условиях, что позволит снизить энергозатраты и улучшить качество конечного продукта.



ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОГО ПЕРОВСКИТА ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СТАБИЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Джаманбаева Г.Т., Махамбет И.А.

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, НИИ ЭТФ, Алматы, Казахстан

В современном мире, стремящемся к устойчивому развитию и сокращению углеродного следа, солнечная энергетика занимает все более важное место. Однако, несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение солнечных батарей сдерживается прежде всего высокой стоимостью их производства. На сегодняшний день подавляющее большинство (около 90%) представленных на рынке солнечных батарей изготавливаются из кремния. Этот материал, обладающий достаточно высоким коэффициентом полезного действия (КПД) (20-25%), требует, однако, сложных и энергоёмких производственных процессов [1-2]. Эти процессы включают в себя высокотемпературные обработки в вакууме, использование специального оборудования и высокочистых материалов, что существенно увеличивает конечную стоимость продукта. Оставшиеся 10% рынка занимают солнечные батареи на основе CIGS (медь-индий-галлий-селен), которые, хотя и обладают несколько меньшим КПД, также не отличаются дешевизной производства.

Высокая стоимость кремниевых и CIGS-батарей является серьезным препятствием для их повсеместного использования, особенно в развивающихся странах. Переход на солнечную энергетику в этих регионах замедляется из-за недоступности соответствующих инвестиций и инфраструктуры [3].

Несколько лет назад учёные обратили внимание на высокий потенциал перовскитных солнечных батарей. Они предположили, что производство таких батарей может быть значительно дешевле существующих технологий. Целью данной работы является проведение исследований и разработка методов формирования перовскитных солнечных батарей.

Структура перовскитной солнечной батареи напоминает слоёный "сэндвич", состоящий из нескольких тонких слоёв с различными функциями. Фотоактивный слой, содержащий перовскит, поглощает солнечный свет и генерирует электрический заряд в виде положительных и отрицательных носителей заряда – электронов и дырок. Транспортные слои, расположенные с обеих сторон фотоактивного слоя, эффективно собирают и переносят эти заряды к электродам – аноду (плюс) и катоду (минус). Оптимизация толщины и состава каждого слоя имеет критическое значение для достижения высокого КПД батареи. Установлено, что структура и свойства каждого из этих слоёв влияет на повышение долговечности и стабильности перовскитных солнечных батарей, что является ключевым фактором для их широкого внедрения на рынке.

1. H Wang, SC Liu, B Balachandran et.al. Nanoimprinted perovskite metasurface for enhanced photoluminescence // Optics express V.25 (24), A1162-A1171
2. G Ermolaev, AP Pushkarev, A Zhizhchenko. Giant and tunable excitonic optical anisotropy in single-crystal halide perovskites // Nano Letters V. 23 (7), 2570-2577
3. DS Muratov, AR Ishteev, DA Lypenko et.al. Slot-Die-Printed Two-Dimensional ZrS_3 Charge Transport Layer for Perovskite Light-Emitting Diodes // ACS Applied Materials & Interfaces V.11 (51), 48021-48028.



ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ НА СВОЙСТВА ФЕРРИТА НИКЕЛЯ

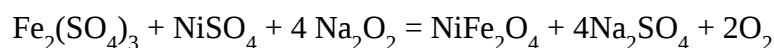
Журавлев С.В., Капитанчук Е.Ю.

ФГБНУ «НИИ «Реактивэлектрон», г. Донецк

iguana-igu@yandex.ru

Среди шпинель-ферритов, никелевые ферриты стали одним из лучших вариантов для использования в таких направлениях как: медицина, электронные устройства, материалы для поглощения электромагнитного излучения, очистка воды. Востребованность этих ферритов обусловлена такими свойствами как: высокие проницаемости, удельное сопротивление, намагниченность насыщения. Нано частицы ферритов интересны для терапевтических и диагностических целей.

Взаимодействие в системе $\text{NiSO}_4 - \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 - 4\text{Na}_2\text{O}_2$ сопровождается мощным экзотермическим эффектом, протекающим в режиме горения. По данным рентгенофазового анализа, основными продуктами реакции являются NiFe_2O_4 , модификации Na_2SO_4 , и следы NiO и Fe_2O_3 . Количество последних уменьшается с увеличением размера образцов. Образование феррита свидетельствует о высокой активности образующихся в результате твердофазного обмена оксидов никеля и железа. Суммарно взаимодействие компонентов в системе $\text{NiSO}_4 - \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 - 4\text{Na}_2\text{O}_2$ можно представить уравнением:



Образующийся феррит NiFe_2O_4 , по данным проведенного седиментационного анализа, подтвержденного микроструктурным анализом, показывает основное содержание частиц с эффективным размером менее 3,43 мкм (70-80%).

После нагрева образцов до 950°C и выдержке в течение 2 часов, происходит их рекристаллизация с укрупнением частиц. По данным седиментационного анализа доля частиц с размером более 5 мкм увеличивается с 18 % до 38%, а доля частиц с размером менее 3,43 мкм уменьшается с 73 до 52%.

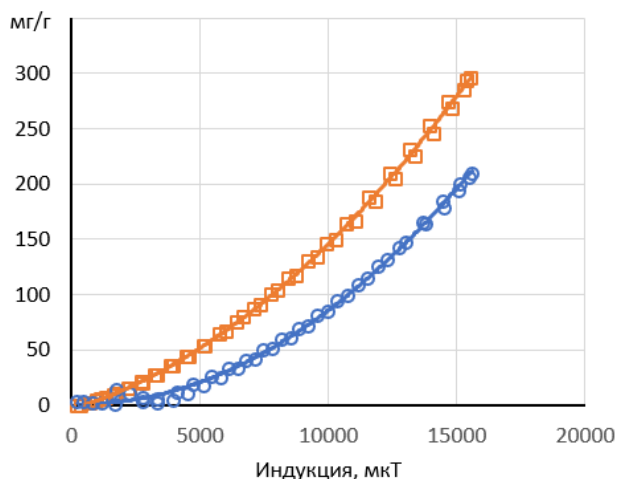


Рис.1. Изменение магнитных свойств NiFe_2O_4 , полученного в режиме горения (окружности) и выдержанного при 950°C в течение 2-х часов (квадраты).

С укрупнением частиц при прокатке увеличились магнитные характеристики исследуемых образцов, что указывает на влияние размера частиц на его магнитные свойства (рис. 1). Таким образом, с помощью термической обработки полученного в режиме горения NiFe_2O_4

можно влиять на размеры частиц и магнитные свойства.

1. S. Bindra Narang, K. Pubby // JMMM, V.519, P.167163 (2020).

2. Xuemin He, Wei Zhong, Chak-Tong Au, Youwei Du. // Research Letters V.8, P.446(2013).



MECHANICAL, CORROSION AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ELECTRODEPOSITED IRON-BASED COMPOSITION COATINGS

Zellele D. M.^{1, 2}, **Yar-Mukhamedova G. S.**¹

¹ Faculty of Physics and Technology, al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan

² Bahir Dar University, Ethiopia

danielmekonnenz@gmail.com

Iron-based composition coatings have emerged as promising materials for various industrial applications due to their excellent mechanical properties, corrosion resistance and cost effectiveness [1,2]. This research investigates the electrochemical synthesis of iron-based composite coatings, emphasizing the optimization of deposition parameters and their impact on structural and functional properties. The study systematically examines the effects of electrolyte composition, current density, pH, and temperature on the morphology, phase structure and performance of the coatings on the substrate.

A comprehensive characterization of the synthesized coatings was conducted using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive spectroscopy (EDS) to analyze their microstructural features and elemental composition. Electrochemical techniques such as potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were employed to evaluate the corrosion resistance of the coatings under different environmental conditions. Additionally, tribological properties, including hardness and wear resistance were assessed to determine their mechanical durability. The results indicate that optimized iron-based composite coatings exhibit superior corrosion protection and mechanical performance. The incorporation of reinforcing phases and alloying elements significantly enhances coating properties, demonstrating the potential of electrochemical deposition as a versatile and scalable method for developing high-performance coatings [3]. This research provides valuable insights into the design and application of iron-based coatings for protective and functional surface engineering.

1. Arrighi, C., et al. // *Materials Chemistry and Physics* V.263 P. 124366 (2021).

2. Okokpujie, Imhade P., et al. // *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion* V.10, №1 P.2 (2024).

3. Lebedeva O. et al. // *Metals* V.13, №4 P.657 (2023).



ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ АЛЮМОЦИНКОВОЙ ШПИНЕЛИ

Кара А.В., Громенко В.О., Журавлев С.В., Серховец А.А., Боднарюк С.

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон», г. Донецк

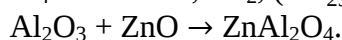
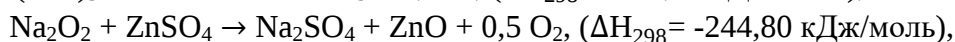
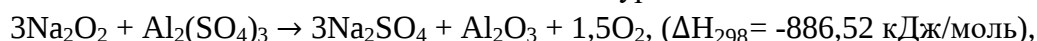
berestova865@mail.ru

Алюминат цинка (ZnAl_2O_4) имеет химическую формулу AB_2O_4 и структуру нормальной шпинели, обладает высокой химической и термической стабильностью, высокой механической стойкостью и низкой кислотностью поверхности и подходит для широкого спектра применений, таких как оптическое покрытие или основная матрица, высокотемпературный керамический материал, катализатор и подложка для катализатора. В настоящее время методы синтеза ZnAl_2O_4 включают твердофазные методы, золь-гель методы, методы сжигания и методы с использованием растворов.

Целью данной работы является исследование возможности образования наноразмерной алюмоцинковой шпинели в системе $\text{ZnSO}_4\text{--Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{--Na}_2\text{O}_2$ методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Рассмотренный тип взаимодействия представляет значительный интерес для синтеза неорганических наноразмерных оксидных материалов [1,2].

Взаимодействие в системе $\text{ZnSO}_4\text{--Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{--Na}_2\text{O}_2$ можно представить следующими термодинамически обоснованными основными уравнениями:



Расчеты характеристик предлагаемых реакций проводились на основе фундаментальных основ химической термодинамики. Рентгенофазовый анализ материалов выполнен на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance, качественный анализ фазового состава осуществляли с помощью базы данных PDF-2 в программном комплексе Jade 6.5, микрофотографии образцов были получены на растровом электронном сканирующем микроскопе TESCAN AMBER GMH (рис.1).

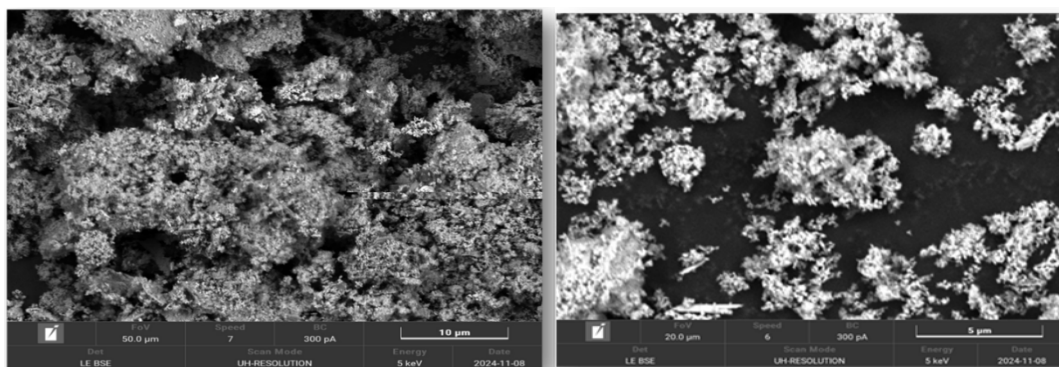


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение частиц продукта системы $\text{ZnSO}_4\text{--Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{--Na}_2\text{O}_2$

1. Берестовая А. А., Шаповалов В. В., Байло А. А. // *Инновационные перспективы Донбасса, Т. 4: Перспективные направления развития экологии и химической технологии*. С. 12–15(2022).

2. Берестовая А. А., Шаповалов В. В. // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*, № 3, С. 57–64 (2022).



ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК $CN_x:Eu_yO_z$ С ЛИНЕЙНЫМИ УПОРЯДОЧЕННЫМИ ПУЧКАМИ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Лавренюк А.С.^{1,2}, Недёркин В.В.^{1,2}, Шемченко Е.И.²

¹ФГБОУВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
alina2003626@mail.ru

Для получения различных перспективных композитных материалов применяются углеродные нанотрубки. На их основе возможно получение твёрдотельных неохлаждаемых кубитов (NV⁻-вакансия), совместимых с современными электронными вычислительными системами. Легирование редкоземельными материалами углеродных нанотрубок позволяет получать перспективный материал для создания однофотонных лазеров, необходимых для квантовых компьютеров, а также приёмники излучения таких лазеров. Таким образом, на основе углеродных нанотрубок возможно получение твёрдотельных квантовых вычислительных ячеек типа «излучатель-кубит-приёмник», совместимых с современной полупроводниковой электроникой.

На свойства нанотрубок влияют их геометрические характеристики, меняя которые во время роста нанотрубок, возможно управлять свойствами композитного материала [1].

Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) было проведено исследование морфологии поверхности углеродных плёнок, выращенных в атмосфере азота и легированных трёхвалентным оксидом европия ($CN_x:Eu_yO_z$), состоящих из плотноупакованных пучков углеродных нанотрубок [2, 3]. Обнаружено, что на поверхности присутствуют выраженные линейные структуры вертикальных углеродных нанотрубок в виде упорядоченных полос (рис.1).

Целью работы было исследовать явления, повлиявшие на морфологию поверхности плёнок $CN_x:Eu_yO_z$ с необычным, линейно-упорядоченным расположением пучков углеродных нанотрубок.

Изображения пленок $CN_x:Eu_yO_z$ [4] были получены методами АСМ с помощью зондовой лаборатории NTEGRA Aura. Обработку и анализ АСМ-изображений осуществляли в программе «ImageAnalysis», которая позволяет выделять по заранее заданным параметрам геометрические характеристики зерна, являющегося частями нанотрубок, выступающих над сплошной поверхностью пленки. Высота зёрен определяется относительно общего нулевого уровня, т.е. базовой поверхности, ниже которой лежит сплошной слой плотноупакованных нанотрубок.

При измерении геометрических характеристик зёрен по выделенным направлениям выполнялся срез на некотором заданном уровне, определяемом коэффициентом k_{SL} равным отношению заданной высоты сечения к высоте глобального максимума поверхности пленки. Вычисленные параметры были получены при $k_{SL} = 0.5$.

1. Окунев В.Д., Самойленко З.А. и др. // ФТВД, Т. 34, №2, с.37-51 (2024).
2. Schultrich B. *Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films*, Berlin: Springer 2018, 752 с.
3. Ferrari A.C., Rodil S.E., Robertson J. // *Physical Review (B)*, Т.67, 155306 (2003).
4. Шемченко Е.И., Петренко А.Г., Лихтенштейн И.Я // *Вестник Луганского национального университета им. Владимира Даля* № 5(11), с.151 (2018).

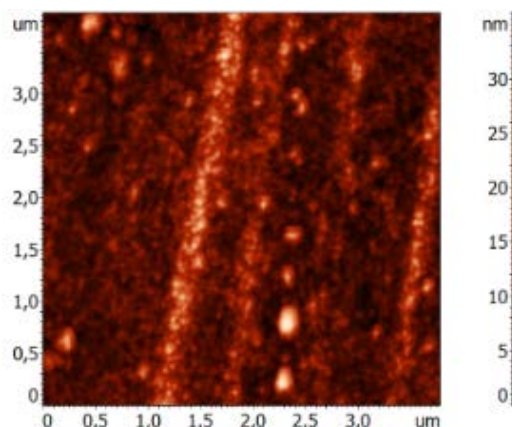


Рис.1. 2D-поверхность плёнки, состоящей из упорядоченных рядов углеродных нанотрубок.



КИНЕТИКА СПЕКАНИЯ КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ Al – Al₂O₃

Лоладзе Л.В., Брюханова И.И., Головань Г.Н., Прилипко С.Ю.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
loladzeftia@mail.ru

Композиты – искусственно созданные материалы с двумя или более компонентами, обладающими разными физическими и химическими свойствами. Такие материалы вызывают повышенный интерес благодаря уникальным свойствам, в том числе малому весу, высокой прочности, устойчивости к коррозии и пр. С развитием новых технологий ученые всего мира трудятся над созданием таких материалов [1].

В нашем случае исследования направлены на выявление возможностей получения композита на основе порошкообразного металлического алюминия в соотношении 70:30 (подбор компонент, параметров внешнего воздействия на систему, режимов термической обработки).

Исходные порошки готовились следующим образом: порошкообразный металлический алюминий смешивали с нанопорошками оксида алюминия Al₂O₃ размером частиц 50 нм и немногим более 100 нм в соотношении (70% Al + 30% Al₂O₃, подвергали сухому смешиванию в планетарной мельнице в течение 30 мин. Полученные порошки формовали методом одноосного сжатия в стальной пресс-форме, давление прессования составляло 250 МПа. Прессовки представляли собой столбики размером 6×6×14 мм, которые затем подвергали гидростатическому обжатию (P=2, 6 и 10 кбар).

Одной из наиболее ответственных технологических процедур получения композитов, в результате которой малопрочные заготовки преобразуются в прочные тела, является процесс спекания. Для исследования кинетики спекания вышеуказанных образцов выбран метод дилатометрии, который позволяет наблюдать за процессами, происходящими в материале при спекании.

Анализ полученных нами кинетических кривых позволил выявить температурный интервал (300÷700⁰С), в котором происходит перестройка структуры, о чем свидетельствуют характер тепловое расширение и появившиеся на кривых спекания пики (рис.1).

Выявленные эффекты наглядно отражены на кривых спекания композита Al-Al₂O₃ и указывают на корреляцию между давлением, размером частиц и свойствами спеченного материала.

Представляет интерес дальнейшее изучение структуры, теплофизических, электрических и механических свойств исследуемого материала, после чего могут быть даны рекомендации по оптимизации режимов термообработки и соотношения компонент системы с целью формирования заранее заданной структуры.

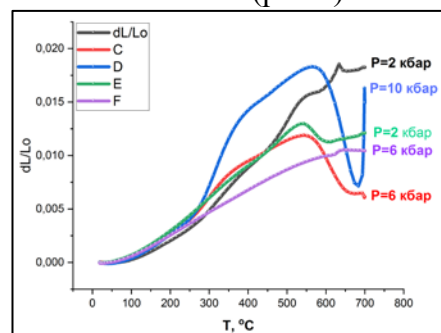


Рис.1. Кинетические кривые спекания композита 70% Al + 30% Al₂O₃



**МЕТАЛЛООКСИДНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ
МОНОКСИДА УГЛЕРОДА И ВОЗМОЖНОСТЬ НАСТРОЙКИ ИХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОСРЕДСТВОМ ОБЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ**

Магкоев Р.Т.^{1,2}, Пухаева Н.Е.,^{1,3} Такаев А.А.¹, Григорян Г.Г.¹, Хекилаев Р.А.¹, Григоркин Д.В.¹, Нугзарова М.Р.¹, Бестаева З.Н.¹, Магкоев Т.Т.¹, Men Y.⁴, Behjatmanesh-Ardakani R.⁵

¹Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, г.С.-Петербург

²ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет», г. Владикавказ

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

⁴Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, P.R. China

⁵Ardakan University, Ardakan-Yazd, I.R. Iran

t_magkoev@mail.ru

Установление закономерностей формирования и свойств неоднородных наноразмерных металлооксидных систем имеет важное как фундаментальное, так и прикладное значение для широкого спектра применений от нанoeлектроники и медицинской техники до нанохимии и гетерогенного катализа [1,2]. В связи с этим целью настоящей работы являлось установить закономерности формирования систем рассматриваемого типа, а именно наноразмерных кластеров Ni и Cu на поверхности оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(0001)$ для достижения каталитической эффективности в реакциях окисления CO, сопоставимой с таковой, характерной для платиноидных катализаторов. С применением широкого взаимодополняющего комплекса методов анализа поверхности в условиях сверхвысокого вакуума с *in-situ* пробоподготовкой в сочетании с первопринципными теоретическими расчетами методом функционала плотности показано, что эффективность реакции кардинальным образом зависит от размера кластера металла. Для обоих металлов можно условно выделить пограничную область размера кластера порядка 2 нм, ниже которой активность наблюдаемых реакций ($\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$; $\text{CO} + \text{NO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{N}$) существенно превышает наблюдаемую при большем размере кластера и сопоставима с той, которая характерна для соответствующих платиноидных катализаторов. При уменьшении размера кластера ниже 2 нм и в предельном случае одиночных атомов металлов наблюдается рекордная удельная активность реакций, в несколько раз превышающая таковую для платиноидных катализаторов. Это обусловлено особым электронным состоянием одиночных и сверхмалых кластеров металлов, обусловленным действием потенциала Маделунга поверхности оксида и процессами переноса заряда на границе раздела металл/оксид. Такое состояние способствует активации молекулярных орбиталей CO, O₂, NO и, следовательно, повышению каталитической активности. Рост размера кластера приводит к снижению каталитической активности за счет усиления межатомного латерального взаимодействия. С практической точки зрения обозначенная возможность замены драгоценных металлов менее дорогостоящими материалами позволит существенно снизить себестоимость производства катализаторов, как минимум без потери качества, и обеспечить экономию редких и быстро исчерпаемых ресурсов благородных металлов. Дальнейшая настройка эффективности катализаторов возможна посредством их облучения высокоэнергетическими частицами, в частности, на установке класса Мегасайнс NICA ОИЯИ, Дубна.

Работа выполнена в рамках Госзадания СОГУ Минобрнауки РФ (код научной темы FEFN-2024-0002) и коллаборации ARIADNA NICA, FEFN-2024-0006 (ОИЯИ, Дубна).

1. Luo N., Turberg, M., Leutzsch, M. et al. // *Nature* (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07757-7>.
2. Zoric M.R, Basera P., Palmer L.D. et al. // *ACS Nano*, V.18, P.19538-19548 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c02088>.



ВЛИЯНИЕ БЕНЗОТРИАЗОЛА НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНО-КРЕМНЕЗЕМНЫХ КОМПОЗИТОВ

Наймушина Д.Е.^{1,2}, Лыга Р. И.¹, Беличко Д.Р.², Брюханова И.И.²

¹ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

musia.2014@yandex.ru

Алюминиевые сплавы широко применяются в строительстве, авиа- и автомобилестроении, но подвержены коррозии, особенно содержащие медь. Коррозия снижает прочность, ухудшает внешний вид и сокращает срок службы изделий. Шестивалентный хром замедляет этот процесс, но из-за его токсичности разрабатываются альтернативы. Перспективными считаются гибридные золь-гель покрытия благодаря низкотемпературному отверждению, высокой адгезии и долговечности [1].

Авторы данного исследования предлагают повысить эффективность защиты гибридных золь-гель покрытий путем использования ингибитора коррозии металлов – 1,2,3-бензотриазола. Последний вводится в состав композитного покрытия, где присутствующий кремнеземный нанонаполнитель мог бы «удерживать» бензотриазол, что пролонгировало бы защитное действие покрытия. Поэтому целью работы было исследовать влияние ингибитора коррозии металлов на различные свойства композитов, в том числе на антикоррозионные свойства эпоксидно-кремнеземных покрытий.

Композиты синтезировали из триэпоксида 1,1-диметил-3-циклогексена, полиамина Ancamine 2579 и тетраэтоксисилана, как прекурсора для формирования частиц кремнезема (в концентрационном диапазоне 0,5–10 %). Получено две серии образцов: без ингибитора коррозии металлов и содержащие бензотриазол. Установлено, что синтезированный *in situ* кремнеземный наполнитель армирует полимерную матрицу композитов: уже при низких концентрациях наполнителя многократно снижается удлинение образцов после перехода в высокоэластичное состояние (рис.1), что объясняется формированием пространственной неорганической сетки, образованной частицами SiO₂. Присутствие 1,2,3-бензотриазола в составе композитов оказывает пластифицирующее влияние на полимерную матрицу.

Формирование кремнеземного наполнителя изменяет устойчивость эпоксидных композитов к термоокислительной деградации. Процессы высокотемпературного окисления, термической и термоокислительной деструкции наполненных образцов протекают медленнее, и, как результат, замедляется скорость потери массы композитов.

Проводили потенциодинамические исследования и климатические испытания (выдерживали 2 месяца при температурах 20–50 °С над 3 %-ным водным раствором NaCl) композитных покрытий на поверхности алюминиевого сплава Д16. Более высокая эффективность антикоррозионной защиты наблюдается при введении ингибитора коррозии металлов в состав композитного покрытия, что является более эффективным, чем в состав ненаполненного полимерного покрытия. Концентрация бензотриазола не должна превышать 1 % по массе.

1. Gautam A., Soma Raju K. R. C., Gobi K. V., R. Subasri R. Effect of transition metal and different rare-earth inhibitors-based sol-gel coatings on corrosion protection of mild steel, 2023. 17 p.

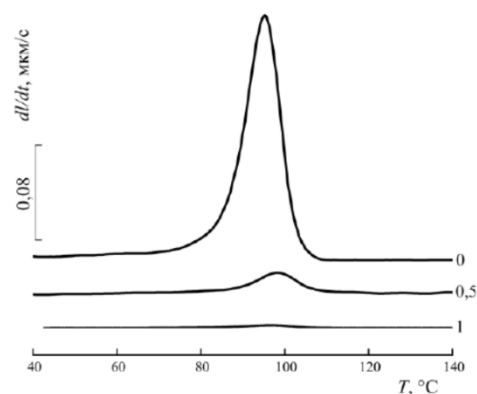


Рис.1. Дифференциальные термо-механические кривые.

РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ В УПРОЧНЕНИИ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ КОМПОЗИТОВ

Прилипко С.Ю., Гангало А.Н., Кудрявцев Ю.А., Бурховецкий В.В., Брюханова И.И., Головань Г.Н., Глазунова В.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
suprilipko@mail.ru

Прочность металл-керамических композитов определяется несколькими факторами: составом и соотношением компонентов, их механическими свойствами, структурой и морфологией. В первую очередь на механические свойства влияют пропорции металла и керамики – увеличение содержания керамики может повысить твердость, но снизить ударную вязкость.

Для исследования прочности после горячего прессования были выбраны керметы системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$ с массовой долей металла 80%. Поскольку пластичность алюминия в значительной степени зависит от его температуры, представляется важным выбор режимов горячего прессования. Целью работы было установление влияния давления и температуры горячего прессования на плотность, структуру и прочность при четырехточечном изгибе.

Для получения керметов использовались порошок дисперсного алюминия (10–20 мкм) и нанокристаллический оксид алюминия (30–50 нм). После смешивания образцы нагревались до температуры 450 и 600°C и прессовались давлением 600, 800 и 1000 МПа (таблица 1).

Таблица 1. Плотность образцов после горячего прессования

Температура прессования	Давление прессования, МПа		
	600	800	1000
450°C	2,48	2,54	2,53
600°C	2,68	2,71	2,80

Из таблицы видно, что повышение температуры до 600°C в большей степени способствует уплотнению композита, чем увеличение давления в выбранном диапазоне.

На рис. 1 приведены значения прочности полученных образцов. Обращает внимание нелинейная зависимость прочности от давления для образцов, полученных при 600°C. Такой характер зависимости может быть связан с наличием напряжений в материале в состоянии, близком к его теоретической плотности.

Таким образом, экспериментально установлена возможность получения композитного материала $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, имеющего прочность выше прочности его компонентов, и обнаружены пути повышения его конструктивных характеристик.

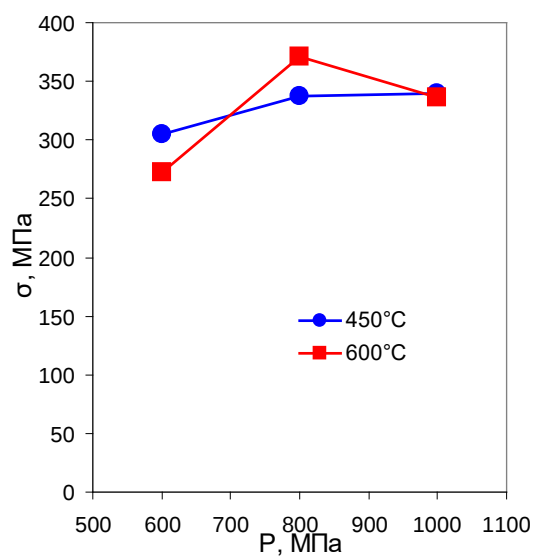


Рис.1. Прочность при четырехточечном изгибе образцов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$, полученных при различных температурах горячего прессования



КОМПРЕССИОННАЯ ЭЛЕКТРОАКТИВНОСТЬ СЛОИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПРОТОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН

Прохоров И.Ю.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
iprokh@mail.ru

Полимерные протоннообменные мембраны в последние годы стали одним из главных направлений исследований в мире не только как основа новых устройств хранения энергии (таких, как топливные элементы, проточные батареи и твердотельные суперконденсаторы), но и как электроактивные материалы для искусственных мускулов и коллекторов механической энергии. Мембраны на основе поливинилового спирта (ПВС) и суперкислот представляют особый интерес, поскольку образуют электрохимическую систему, в которой может запасаться энергия в виде пространственных зарядов.

Аморфные и кристаллические мембраны из ПВС, сшитого дисульфоглянтарной кислотой и допированные протонированным монтмориллонитом, были получены литьем из растворов [1] и исследованы методом цифровой осциллографии [2].

Обнаружено, что пространственные заряды после формирования их сверхпороговым током сохраняются в течение многих лет, что приводит к поляризации мембран с потенциалом до 100 мВ. При включении в сеть без источника питания они выдают собственные импульсные сигналы со среднеквадратичной амплитудой порядка 10 мВ (рис. 1, слева).

Впервые обнаружено, что сжатие мембран при давлении свыше некоторого критического приводит к усилению собственных сигналов, причем в случае кристаллических мембран возникает синусоидальный переменный ток с амплитудой 100 мВ и мощностью свыше 12 нВт/см² с постоянной компонентой (рис. 1, справа). Следовательно, компрессионная электроактивность кристаллических полимеров позволяет исследовать их как потенциальные твердотельные источники тока.

Фурье-анализ собственных сигналов в сравнении с индуцированными подпороговым меандром показал, что в генерации собственных сигналов при стандартном сжатии в силу, по-видимому, малой разности потенциалов участвуют не все структурные компоненты мембраны, а только один или два слоя. Собственные сигналы от сжатых мембран выявляют большее число компонент, но полное совпадение с индуцированными демонстрируют только сжатые кристаллические мембраны.

Таким образом, компрессионная электроактивность протоннообменных полимеров, возможно, является путем к созданию твердотельных источников тока нового типа, не содержащих редких поливалентных металлов и регулируемых в широких пределах ввиду полного контроля структуры и состава.



Рис.1. Собственные сигналы при стандартном и сильном сжатии

1. Прохоров И.Ю. Протонные мембраны на основе поливинилового спирта. Beau Bassin, Mauritius: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 71 p.
2. Прохоров И.Ю. // Электрохимическая энергетика, Т.23, №1, С.3-25 (2023).



СИНТЕЗ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ Ni – Al В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Садовая И.В., Алехов Ю.А., Сагдеева Ф.Н., Кара А.В.

ФГБНУ «НИИ «Реактивэлектрон», г. Донецк

sadovaya@bk.ru

На лабораторной установке по разработанной математической модели процесса синтеза [1] из мелкодисперсных порошков никеля (68 масс.%) и алюминия (32 масс.%) в режиме горения в поле центробежных сил [2] получены образцы высокопористых (50 – 60 %) металлокерамических фильтровальных материалов цилиндрической формы (рисунок). Новизна заключается в том, что вектор центробежных сил направлен перпендикулярно волновому фронту процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в отличие от параллельного вектора поля центробежных сил, используемого в других исследованиях. Это позволило мягко управлять процессом порообразования в ходе химического взаимодействия компонентов и получать образцы в одну стадию, исключаящие трещинообразование в конечном продукте. Исследованы их фазовый состав и микроструктура, а также физико-химические свойства: плотность, пористость, прочность, жаростойкость и стойкость в агрессивных средах. Установлены закономерности формирования фильтровальных материалов. Область применения: производство металлокерамических фильтров с широким спектром структурных и каркасных свойств. В литературе отсутствуют сведения о применении подобных решений на практике.



а

б

Рисунок. Внешний вид (а) и микроструктура (увеличение x16) (б) фильтроэлемента

1. Садовая И.В., Шаповалов В.В., Алехов Ю.А., Афанасьев В.В. // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия, Т. 56, №2, С. 26-33. (2024).
2. Полищук В.С., Садовая И.В., Алехов Ю.А., Сагдеева Ф.Н. // Инновационные перспективы Донбасса: материалы X Международной научно-практической конференции (Донецк, 28–30 мая 2024 г.). – Т 3. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2024. – С. 71-75. – EDN OKQQND.



СПЛАВЫ С НЕСКОЛЬКИМИ ОСНОВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

Салищев Г.А.

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород
Salishchev_g@bsuedu.ru

В отличие от традиционных сплавов, содержащих обычно один основной элемент, в последние два десятилетия разрабатываются сплавы с несколькими основными элементами [1]. Они состоят из 3-5 или более элементов, взятых в приблизительно эквивалентных концентрациях, и довольно неожиданно в ряде случаев сохраняют структуру твердого раствора, а не образуют интерметаллидные фазы. Первоначально им было дано название «высокоэнтропийные», исходя из предполагаемого высокого уровня конфигурационной энтропии и, соответственно, ее влияния на предпочтительное образование твердых растворов, а не интерметаллидных фаз в таких многокомпонентных сплавах. Однако ярко выраженного эффекта обнаружено не было, очевидно, из-за больших на порядок величин энтальпии образования интерметаллидных фаз.

Между тем интерес к таким системам сохранился, так как подобного рода сплавы по элементному составу находятся в малоизученных центральных областях многоэлементных фазовых диаграмм и могут обладать неожиданными структурами и свойствами. В частности, известны сплавы с относительно стабильной однофазной структурой на основе твердого раствора. Вместе с тем многие сплавы имеют значительно более сложную структуру, включая одну или несколько упорядоченных (интерметаллидных) фаз. Предложена их классификация по химическому и фазовому составам. Основные группы таких сплавов образованы 3d-переходными (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti, V) и тугоплавкими (Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, V, W, Zr) металлами. Среди них можно выделить две наиболее изученные композиции, а именно CoCrFeMnNi и HfNbTaTiZr с однофазной структурой на основе ГЦК- и ОЦК-твердых растворов соответственно.

Важнейшая особенность сплавов с несколькими основными элементами состоит в том, что каждый атом какого-либо элемента окружен чужеродными атомами других. Возникающая из-за этого дисторсия кристаллической решетки влияет как на механические, так и электрические, оптические и химические свойства. С другой стороны, созданное искажениями поле упругих напряжений воздействует на развитие диффузионно-контролируемых фазовых превращений, тормозя диффузию и влияя на зарождение, рост, распределение и морфологию фаз, повышая их стабильность при высоких температурах [2]. И еще одно качество, характерное для них, получившее название «коктейль» эффект [3], проявляющееся в том, что взаимодействие элементов в образующемся неупорядоченном твердом растворе может оказывать более сильное влияние на макроскопические свойства, чем только их сумма.

Перспективные сплавы с несколькими основными элементами отличают их выдающиеся механические и функциональные свойства, которые зачастую превышают характеристики промышленных сплавов, что делает их привлекательными материалами для потенциальных применений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 19-79-30066) с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы" НИУ БелГУ.

1. Yeh J. W. et al. // *Advanced Engineering Materials*, V. 6, P. 299-303 (2004).
2. Yan X. // *Scripta Materialia*, V. 187, P. 188-193 (2020).
3. Ranganathan S. // *Current Science*, V. 85, P. 1404-1406 (2003)



ВАРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ

Самсоненко С.Н.

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
г.Макеевка

snsamsonenko@mail.ru

Современные электронные устройства требуют надежной защиты от перенапряжений, которая обеспечивается с помощью варисторов. Эти компоненты играют ключевую роль в обеспечении безопасности и долговечности электронных схем. Алмазные пленки, обладая уникальными электрическими, термическими и механическими свойствами, представляют собой перспективный материал для создания новых типов варисторов.

Поликристаллические алмазные пленки (ПАП) выращивались нами методом высокоградиентной химической транспортной реакции из газовой фазы на подложках из монокристаллического кремния без введения легирующих примесей.

Для идентификации полученных образцов и исследования их внутренней структуры мы использовали метод рентгеновской дифрактометрии. Обработка дифрактограмм позволила нам оценить локальную плотность дислокаций в исследуемых образцах.

После проведения исследований ПАП методом рентгеновской дифрактометрии образцы были подготовлены для проведения электрических измерений. На все образцы были напылены омические электрические контакты.

Комплекс структурных исследований ПАП позволил построить их структурные модели. ПАП состоят из отдельных кристаллитов, разделенных большеугловыми межкристаллитными границами, образованными неалмазной фазой углерода. Каждый кристаллит, в свою очередь, состоит из блоков мозаики, разделенных малоугловыми дислокационными границами. Блоки мозаики представляют собой области изолирующего алмаза.

Во всех рассматриваемых образцах были установлены зависимости силы тока от приложенного напряжения. Все вольт-амперные характеристики (ВАХ) имеют симметричную форму. Начиная с некоторого значения напряжения, начинается сильный нелинейный подъем силы тока. С использованием линейного участка ВАХ проведена оценка удельного сопротивления рассматриваемых образцов при низких напряжениях. Поскольку электрические контакты имеют омический характер, нелинейность ВАХ определяется материалом, из которого изготовлены варисторы. Величина удельного сопротивления всех исследуемых образцов уменьшается с увеличением локальной плотности дислокаций.

Изменение межатомных расстояний в ядрах дислокаций приводит к формированию дислокационной зонной структуры, локализованной в области ядер дислокаций. В результате появляется возможность движения электрических зарядов вдоль осей дислокаций. Дислокации можно рассматривать как проводящие каналы. Электропроводность ПАП определяется проводящими каналами, состоящими из отдельных дислокаций, входящих в состав малоугловых дислокационных границ. Дислокации в кристаллах могут образовывать петли, выходить на поверхность кристалла или обрываться на границах блока мозаики. Образование проводящих дислокационных каналов – это вероятностный процесс. Если на границах блоков мозаики встречаются две дислокации, то образуется проводящий дислокационный канал. По всей вероятности, при низких напряжениях таких проводящих каналов будет не много, и будет соблюдаться закон Ома. По мере увеличения напряжения будут образовываться новые проводящие каналы за счет перехода носителей заряда с одной дислокации на другую. В этом случае проводящие каналы будут образовываться дислокациями, находящимися на некоторых расстояниях друг от друга. ВАХ будет представлять собой возрастающую нелинейную функцию.

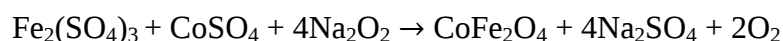


МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО ФЕРРИТА КОБАЛЬТА В СИСТЕМЕ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CoSO}_4 + \text{Na}_2\text{O}_2$

Светлаков О.Ю., Громенко В.О.

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон», г. Донецк
berestova865@mail.ru

Микронные, субмикронные и наноразмерные порошки и материалы на их основе перспективны как компоненты для получения сверхтвердых, сверхпрочных и высокотемпературных материалов; добавки в смазочные материалы, катализаторы, средства защиты растений, микроудобрения; фотокатализаторы, магнитные материалы. Среди методов получения наноразмерных ферритов выделяются твердофазные, жидкофазные и газофазные. Каждый из классов методов отражает агрегатное состояние реагирующих веществ. Для твердофазных методов характерна реакция между порошками, для жидкофазных – реакция в растворах, для газофазных – реакция реагентов в виде пара, плазмы или газа. Широкое распространение получили методы: керамический, золь-гель метод, химическое соосаждение, гидротермальный. Однако применение этих методов ограничено только оксидными соединениями [1]. К перспективным методам синтеза материалов с малыми размерами частиц относится метод твердофазного обмена с помощью которого можно получать не только оксидные соединения, но и карбиды, нитриды, бориды металлов. Особенностью твердофазного обмена является реализация таких условий, при которых целевой продукт синтезируется в твердом состоянии, а «поддерживающие его соединения Na_2SO_4 и O_2 » могут находиться в разных агрегатных состояниях и препятствуют укрупнению частиц. Реакции твердофазного обмена протекают в режиме низкотемпературного горения, в котором достигаемая температура ниже температуры агломерации и плавления образующихся функциональных материалов [2]. Нами с помощью метода твердофазного обмена реализован способ получения наноразмерного магнитного материала – феррита кобальта.



Седиментационным анализом и электронной микроскопией установлено, что с увеличением размера частиц магнитные свойства материала увеличивается. Седиментационный анализ (таблица) показал, что около 59% частиц имеют эффективный размер менее 2 мкм.

Таблица. Распределение по размерам частиц в образце порошка феррита кобальта.

Диаметр зерна, мкм	Относительное содержание суспензии, %	Диаметр зерна, мкм	Относительное содержание суспензии, %	Диаметр зерна, мкм	Относительное содержание суспензии, %
6,6	8	3,4 – 3,0	1	2,4 – 2,3	3
6,6 – 4,8	5	3,0 – 2,7	4	2,3 – 2,2	1
4,8 – 3,9	6	2,7 – 2,5	6	≤2,2	59
3,9 – 3,4	5	2,5 – 2,4	2		

1. Зирник Г.М., Чернуха А.С., Некорысова Н.С. и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия», Т. 14, № 4, С. 127–139 (2021).

2. Уэндландт У., Термические методы анализа, Москва: Мир, 1978, 526 с.



ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЁНОК $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\delta}$

Тихий А.А.¹, Жихарев И.В.²

¹ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», г. Луганск

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

ea0000ffff@mail.ru

Оптические методы играют важную роль в исследовании тонкоплёночных покрытий благодаря своей высокой чувствительности и неразрушающему характеру. Они позволяют получать информацию о структурных и оптических свойствах плёнок – толщине слоёв, морфологии поверхности, спектрах показателей преломления и поглощения. Одним из наиболее универсальных методов оптических исследований является эллипсометрический [1]. Важная особенность этого метода – возможность измерения толщин, существенно меньших длины волны зондирующего излучения.

Применение многоугловых эллипсометрических измерений позволило нам произвести измерение толщин ряда поликристаллических наноразмерных плёнок состава $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\delta}$, полученных методом dc-магнетронного распыления [2] на подложках из сапфира и гадолиний-галлиевого граната. Также для них были определены показатели преломления, коэффициенты поглощения и оптическая проводимость. Эти данные позволили косвенно оценить дефицит кислорода δ в исследованных образцах [3].

Существенным дополнением к многоугловым эллипсометрическим измерениям являются измерения оптического пропускания. Они не только позволяют получить соответствующие спектры, но также могут быть использованы совместно с результатами эллипсометрических измерений для повышения точности определения параметров исследуемой системы. Так, при исследованиях плёнок состава $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_{3-\delta}$ учёт результатов измерений оптического пропускания позволил не только повысить точность определения толщин и показателей поглощения, но и контролировать наличие в спектрах максимума, соответствующего переносу заряда между разновалентными ионами марганца [4].

1. Tompkins H.G., Irene E.A. *Handbook of Ellipsometry, USA, William Andrew Publishing, 2005, 902 p.*
2. Николаенко Ю.М., Мухин А.Б., Чайка В.А., Бурховецкий В.В. // ЖТФ, Т. 80, №8. С. 115–119, (2010).
3. Тихий А.А., Кара-Мурза С.В., Николаенко Ю.М., Грицких В.А., Корчикова Н.В., Жихарев И.В. // Неорганические материалы, Т. 51, №9, С. 1008–1012 (2015).
4. Тихий А.А., Грицких В.А., Кара-Мурза С.В., Корчикова Н.В., Николаенко Ю.М., Ревенко Ю.Ф., Решидова И.Ю., Жихарев И.В. // ФНТ, Т. 40, №8, С. 968–974 (2014).



СИНТЕЗ ШПИНЕЛИ CuAl_2O_4 В СИСТЕМЕ $\text{CuSO}_4 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{Na}_2\text{O}_2$ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Шавшина А.Н., Берестова А.А., Светлаков О.Ю., Фидинчик Е.Ю., Моряков В.В.

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон», г. Донецк

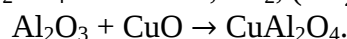
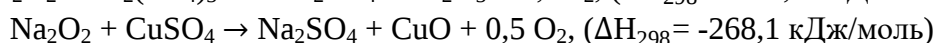
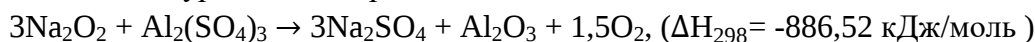
berestova865@mail.ru

Шпинели на основе алюминия представляют собой интересный класс оксидной керамики, имеющий важное технологическое применение. Они обладают оптическими (например, CoAl_2O_4 хорошо известен как Тенарова синь) и химическими (каталитическое применение) свойствами. Свойства алюминатов переходных металлов представляют значительный интерес в качестве нанопигментов и катализаторов.

Материалы на основе оксидов меди и алюминия находят широкое применение в качестве катализатора различных процессов превращения органических и неорганических соединений. Как правило, каталитическая активность определяется составом и структурой медьсодержащего соединения, а механическая прочность, термическая стабильность, в некоторых случаях селективность, зависят от морфологии, пористой структуры, кислотно-основных свойств оксида алюминия, выполняющего роль носителя [1]. Алюминаты переходных металлов обычно получают с помощью твердофазной реакции, метода совместного осаждения, гидротермальной реакции, сжигания и золь-гель реакции [2].

В настоящем исследовании шпинель CuAl_2O_4 была получена методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследования характеристик были проведены с использованием термогравиметрического анализа (ТГА), рентгеновской дифракции (РФА), растровой сканирующей электронной микроскопии (РЭМ).

Образование шпинели в системе $\text{CuSO}_4\text{-Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-Na}_2\text{O}_2$ можно представить следующими основными уравнениями реакций:



Рентгенофазовый анализ показал (рис. 1), что при постепенном нагреве образуется алюминат меди состава CuAl_2O_4 со структурой шпинели и с примесью CuO , что подтверждается, в том числе, электронно-микроскопическими исследованиями.

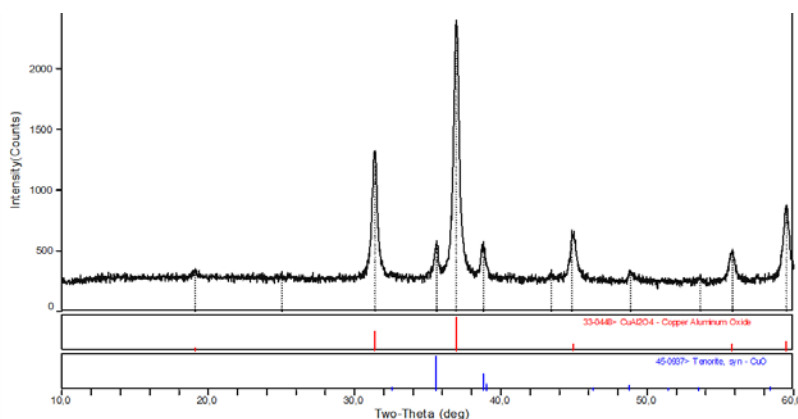


Рис.1. Рентгенограмма образовавшийся шпинели CuAl_2O_4

1. Wenting Hu, Felix Donat, S. A. Scotta and J. S. Dennis. // RSC Adv., 2016, 6, P. 113016–113024.
2. Баян, Е. М., Волкова М.Г. Методы получения наноразмерных оксидных материалов : учебное пособие, ЮФУ, Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2022, 174 с.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ КОБАЛЬТА Co^{2+} В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЛИТИЙ-ГАЛЛИЕВОЙ ШПИНЕЛИ $\text{Li}_{0.5}\text{Ga}_{2.5}\text{O}_4$ Шаповалов В.А., Токий Н.В.,ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
vashapovalov1@mail.ru

Активное изучение шпинелей в настоящее время обусловлено их широкими научными и технологическими применениями. Данная работа является продолжением исследований спектров ЭПР в монокристаллах литий-галлиевой шпинели $\text{Li}_{0.5}\text{Ga}_{2.5}\text{O}_4$ с ионами: $3d^3\text{-Cr}^{3+}$; $3d^5\text{-Mn}^{2+}$; $3d^7\text{-Co}^{2+}$; $3d^8\text{-Ni}^{2+}$; $3d^9\text{-Cu}^{2+}$. Мы показали на примере монокристаллов, что вводимые примесные ионы распределяются равномерно. Но в случае получения пленок и др. порошковых материалов того же состава, что и монокристаллы, свойства будут другие и зависят от технологии получения образцов, т.к. распределение вводимых примесных ионов происходит неравномерно.

Спектр ЭПР ионов Co^{2+} исследовался на частоте 37 ГГц в интервале температур 4.2 К ÷ 77 К. Было обнаружено и изучено два октаэдрических центра Co^{2+} , которым соответствуют спектры аксиальной и ромбической симметрий. Соотношение интенсивностей спектров октаэдрических Co^{2+} акс.: Co^{2+} ромб. = 2:1 при $T=4.2$ К. Третий тип спектров обязан иону Co^{2+} , находящемуся в тетраэдрическом окружении. Структурная и магнитная неэквивалентности формируют многомимимумность потенциала

кристаллического поля в элементарной ячейке монокристалла (рис. 1). Ионы Co^{2+} находятся в комплексах с тетраэдрическим и октаэдрическим окружениями ионами кислорода. Обнаружены и исследованы три типа спектров ЭПР ионов Co^{2+} . Спектр $\text{Co}^{2+}_{\text{тетр}}$ обязан иону Co^{2+} , замещающему ион Ga^{3+} , находящийся в тетраэдрическом кислородном окружении. Спектр $\text{Co}^{2+}_{\text{окт}}$, находящегося в кристаллическом поле аксиальной симметрии, принадлежит иону Co^{2+} , замещающему ион Li^+ , находящийся в октаэдрическом кислородном окружении. Спектр $\text{Co}^{2+}_{\text{окт}}$, находящегося в кристаллическом поле низкой симметрии, принадлежат иону Co^{2+} , замещающему ион Ga^{3+} , находящийся в октаэдрическом кислородном окружении. Ближайшее катионное окружение иона создает ромбические искажения за счет разной валентности Li^+ и Ga^{3+} . На рис. 1 показана зависимость потенциала кристаллического поля E от расстояния R в относительных единицах. Расстояние R отложено в относительных единицах, т. к. концентрация ионов Co^{2+} мала и расстояния между ионами в элементарных ячейках различны.

В элементарной ячейке монокристалла $\text{Li}_{0.5}\text{Ga}_{2.5}\text{O}_4$ допированные ионы кобальта Co^{2+} имеют различные предпочтительные возможности для распределения в четырех тетра-узлах, замещая ионы Ga^{3+} , четырех окта-узлах аксиальной симметрии, замещая ионы Li^+ , и в двенадцати окта-узлах низкой симметрии, замещая ионы Ga^{3+} . Таким образом, в случае неравномерного распределения примесных ионов существует возможность получения, как минимум, двадцати типов материалов литий-галлиевой шпинели $\text{Li}_{0.5}\text{Ga}_{2.5}\text{O}_4$, допированной ионами Co^{2+} .

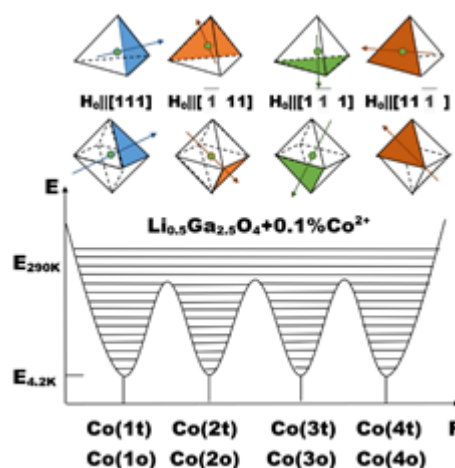


Рис.1. Зависимость потенциала кристаллического поля E от расстояния R . Минимумы расположены вдоль осей типа $[111]$. Показаны тетраэдрические (t) и октаэдрические (o) узлы с ионами Co^{2+} в элементарной ячейке..



МОДИФИКАЦИЯ ЗАКОНА ХОЛЛА–ПЕТЧА В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И КРУПНОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ: РОЛЬ МЕЖЗЕРЕННЫХ И МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА

Варюхин В.Н., Мельник Т.Н., Фельдман Э.П., Юрченко В.М.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
vmyurchenko@mail.ru

Механопрочностные свойства материалов описываются при помощи либо статического (Гриффитс А., Иоффе А.Ф., Баренблатт Г.И.) либо кинетического (Журков С.Н., Френкель Я.И.) подхода. Описание экспериментальных данных требует умения отделять поверхностные эффекты, которые связаны с наличием интерфейсов, от объемных, определяемых размером частиц. Нанокристаллические материалы обладают, как правило, высокой твердостью, которая характеризует их сопротивление пластической деформации; твердость в основном определяется пределом текучести σ_y . Параметры структурных элементов оказывают существенное влияние на микротвердость: зависимость предела текучести от размера зерна описывается законом Холла–Петча: $\sigma_y = \sigma_0 + k_y D^{-1/2}$. Здесь σ_0 – внутреннее напряжение, препятствующее движению дислокаций; k_y – постоянная; D – размер зерна. Данное соотношение справедливо для зерен диаметром более 1 мкм.

В реальных агрегатах упругие модули, а часто и плотность, скачкообразно изменяются, преодолевая барьеры в виде границ раздела фаз и кристаллитов. Этот факт сказывается на процессах развития трещин, двойников и полос скольжения, имеющих либо плоскости, либо оси симметрии. В работе проведен анализ развития тонкой трещины или упругого двойника в среде с двумя границами раздела. Получено интегрально-дифференциальное уравнение равновесия дислокации (моделирующей трещину или двойник) и найдена разрешимость этого уравнения в нужном классе функций (используется условие ортогональности). Упругие поля, порождаемые дислокацией в среде с двумя границами, позволяют записать интегральное уравнение равновесия, не имеющее особых точек в виде вычетов или точек ветвления. Его анализ дает искомую связь между внешней нагрузкой и длиной трещины (двойника). Отличие трещины от двойника состоит лишь в различии сил неупругого происхождения вблизи конца скопления дислокаций (Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич В.М.). Из эксперимента известно, что трещина поддерживается однородной нагрузкой в раскрытом состоянии, тогда как упругий двойник возникает и распространяется при наличии сосредоточенной нагрузки. Связь между длиной трещины R и сосредоточенной нагрузкой P дается следующим выражением:

$$\frac{P}{M_c \sqrt{R}} = \left(1 + \frac{d}{l}\right) \sqrt{1 - \frac{l}{R}} \left/\left(\frac{R}{l}\right)^{v_3 - \frac{1}{2}} + \frac{d}{l} \left(\frac{R}{l}\right)^{v_2 - \frac{1}{2}}\right.$$

Для однородной нагрузки σ^e и длины трещины R интерполяционная формула имеет вид:

$$\frac{\sigma^e \sqrt{R}}{M_c} = \left(1 + \frac{d}{l}\right) / 2 \sqrt{1 - \frac{l}{R}} \left[\left(\frac{R}{l}\right)^{v_3 - \frac{1}{2}} + \frac{d}{l} \left(\frac{R}{l}\right)^{v_2 - \frac{1}{2}}\right],$$

где $v_2 = \pi^{-1} \arccos((\mu_2 - \mu_1)/(\mu_2 + \mu_1))$, $v_3 = \pi^{-1} \arccos((\mu_3 - \mu_1)/(\mu_3 + \mu_1))$; здесь μ_1 , μ_2 , μ_3 – соответственно упругие модули левой среды, прослойки толщины d между средами и упругие модули правой среды; l – расстояние от прослойки до двойника и/или трещины; M_c – константа, зависящая только от свойств материала (для трещины называемая модулем сцепления). В пределе оба полученных выражения дают классический результат Гриффитса. Сценарий развития событий в такой комбинированной среде существенно зависит от соотношения между упругими модулями и отношения $(R-l/d)$. Становится возможным существование устойчивых двойников, потеря их устойчивости, реализация гистерезисных явлений и скачкообразное распространение как двойников, так и трещин.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЗЁРЕН НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИКИ ZrO_2

Якименко М.Н.^{1,2}, Беличко Д.Р.², Малецкий А.В.^{2,3}, Лоладзе Л.В.¹, Зозуля А.А.^{1,2}

¹ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

³ММО «Объединенный институт ядерных исследований», г.Дубна

nicksonn11@gmail.com

Керамические материалы на основе диоксида циркония (ZrO_2) играют ключевую роль в современных технологиях благодаря высокой прочности, термостойкости и коррозионной устойчивости, что делает их востребованными в электронике, медицине и аэрокосмической отрасли. Температура синтеза и тепловой обработки существенно влияет на их механические свойства и структурообразование. Условия синтеза керамики, в частности температура обжига, определяют моноклинную, тетрагональную или кубическую модификации, каждая из которых имеет свою стабильность, механические характеристики, а также размер зерна [1-2]. Поэтому изучение влияния температуры на свойства керамики ZrO_2 является важным направлением исследований.

В рамках работы предполагалось проведение серий экспериментов, в ходе которых будут варьироваться температуры спекания и исследоваться их влияние на фазовый состав, микроструктуру и механические характеристики керамических материалов.

В работе проводились: синтез керамики с разнообразными размерами зерен при различных температурах; получение субмикронного зерна; анализ влияния температуры на процесс зернообразования; сравнение физических свойств керамических образцов с разными размерами зерен. На рис. 1 показаны снимки поверхности, полученные при помощи СЭМ-микроскопии, материала Z8Y при спекании при разных температурах.

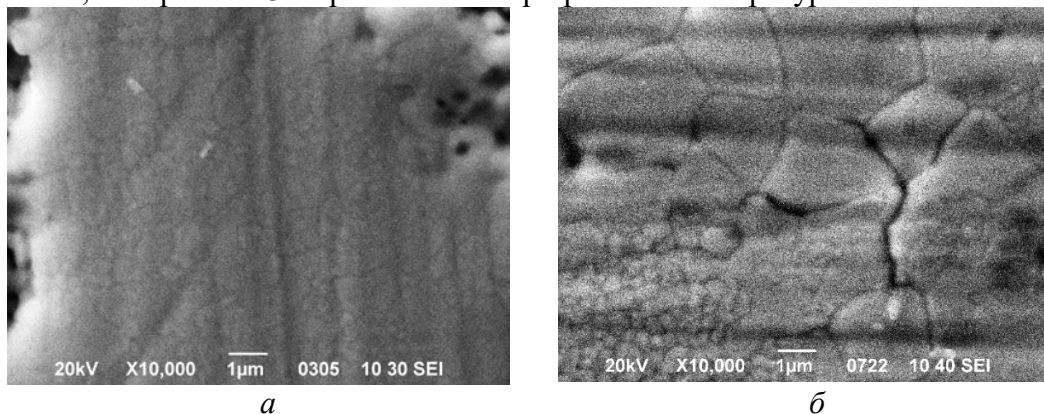


Рис. 1. Сравнение поверхности при материалов Z8Y давлении 3 МПа и спекании при 1350°C (а) и 1500°C (б)

Вывод. Обнаружено, что в Z3Y наблюдается немонотонная зависимость плотности и пористости от давления, тогда как в Z8Y зависимость монотонно возрастающая. Обнаружено, что в Z8Y при спекании 1500°C происходит изменение фазовой структуры материала. Появляются островковые включения с меньшим размером зерна.

Механика процесса образования островковых включений не изучена до конца, что создает множество вопросов и открывает перспективы для дальнейших исследований.

1. Физическое металловедение. Под ред. Р. Кана. Вып. 2. М.: Мир, 1968. 490 с.

2. Maletskii A.V., Volkova G.K., Belichko D.R.// *Ceramics International*, V.50, №22, P.46506-46515 (2024).



ВЛИЯНИЕ ФОНОВОЙ ПОПРАВКИ КОСМОЛОГИЧЕСКОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ НА АМОРФНОЕ СОСТОЯНИЕ НАНООБЪЕКТОВ

Абрамов В.С.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
vsabramov2018@gmail.com

Методом численного моделирования в [1] исследовано влияние различных кубитных состояний отдельных фрактальных структур на комплексное поле деформации связанной структуры. Показано, что поведение поля деформации связанной структуры зависит от упорядочения операторов полей деформации отдельных фрактальных структур и наличия стохастического фона.

Спонтанная деформация и её влияние на состояния электронов, дырок, пар электрон-дырка, локализованных на активных нанобъектах и микробъектах в углеродных материалах с фрактальной структурой (муаровые сверхрешетки, многослойные структуры на основе графена, границы металл-полупроводник), теоретически исследованы в [2].

Энергетические состояния активных нанобъектов расположены внутри запрещенной зоны вблизи уровня Ферми. При описании структуры отдельных модельных нанобъектов используются выпуклые многогранники и формула Эйлера, которая связывает числа граней, вершин, ребер модельного структурного объекта. Рассмотрены особенности структуры углеродных пленок с модельными структурными объектами типа графита, алмаза, графена. Показано влияние толщины углеродной пленки на основные параметры модельных структурных объектов. Для толстых углеродных пленок характерно появление различных дефектов с объемной структурой (типа агрегатов, кластеров). В тонких углеродных пленках возможно появление различных модельных объектов с квазидвумерной структурой (типа графена).

Теоретически обсуждаются особенности нового материала с фрактальной структурой на основе ромбоэдрического пятислойного графена. Экспериментально этот новый материал был исследован методом рамановской спектроскопии в ряде работ. Обсуждается возможность управления основными параметрами структурных объектов в этом материале. Показано, что роль внешнего канала управления могут выполнять изменения длины волны возбуждающего лазера, приводящие к изменениям энергии накачки. Изменения барионного поля Хиггса выполняют роль внутреннего канала управления. Показано, что температура, внешние статические поля также могут выполнять роль внешнего канала управления структурой объектов в этом материале.

Для исследования электронных, дырочных состояний и состояний пар электрон-дырка, различных времен релаксаций из этих состояний активных нанобъектов в материалах с фрактальной структурой предложено использовать современные методы импульсной лазерной спектроскопии. Показано, что для активных нанобъектов характерно наличие коротких и длинных времен релаксаций.

Однако наблюдаемые особенности поведения энергетических и температурных спектров в новых материалах не описываются в рамках существующих теоретических модельных представлений. Возникает необходимость создания новых теоретических моделей.

В данной работе предложена новая модель, учитывающая влияние фоновой поправки космологического красного смещения (стохастического фона) на аморфное состояние нанобъектов в материалах с фрактальной структурой.

1. Абрамова О.П. // Вестник ДонНУ, Сер.А: Естественные науки, №1., С.45-57 (2023).
2. Абрамов В.С. // ФТВД, Т.34, №1, С.41-54 (2024).



КИНЕТИКА МАГНИТОСТРУКТУРНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ УЧЕТЕ ИНВАРИАНТА 5-ГО ПОРЯДКА

Гордей М.М., Метлов Л.С.ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
gordei-maksim@mail.ru

В настоящее время исследование фазовых переходов в сплавах Гейслера представляет большое значение при создании интеллектуальных материалов. Для описания фазовых переходов, в том числе и в сплавах Гейслера, часто используют теорию фазовых переходов Ландау [1]. Представляет интерес дополнительно к инвариантам, учитываемым в [1], учесть также инвариант 5-го порядка

$$K'(m_1^2 m_2^2 \varepsilon_{zz} + m_1^2 m_3^2 \varepsilon_{yy} + m_2^2 m_3^2 \varepsilon_{xx}), \quad (1)$$

отвечающий за ориентацию вектора намагниченности вдоль главной диагонали искаженной в результате фазового перехода кубической элементарной ячейки [2].

При совместном учёте смешанных инвариантов 3-го и 5-го порядков [3], при структурном фазовом переходе, будет происходить изменение равновесного значения вектора намагниченности от направления [111] к направлению [001], что соответствует результатам, полученным в [1].

Причём данное изменение будет отличаться от структурного перехода при учёте только смешанного инварианта 3-го порядка. А именно, сперва будет происходить небольшое отклонение от направления [111], а затем резкий скачок к направлению [001], что показано на рис. 1.

Из зависимости компонент вектора намагниченности и деформаций от температуры, показанной на рис. 1, можно сделать вывод, что учёт смешанного инварианта 5-го порядка, делает систему более устойчивой к слабым искажениям, стараясь повернуть вектор намагниченности, вдоль диагонали искаженной решётки.

Поэтому, вследствие слабых искажений, данное изменение вектора намагниченности облегчает фазовый переход при совместном учёте инвариантов 3 и 5-го порядка.

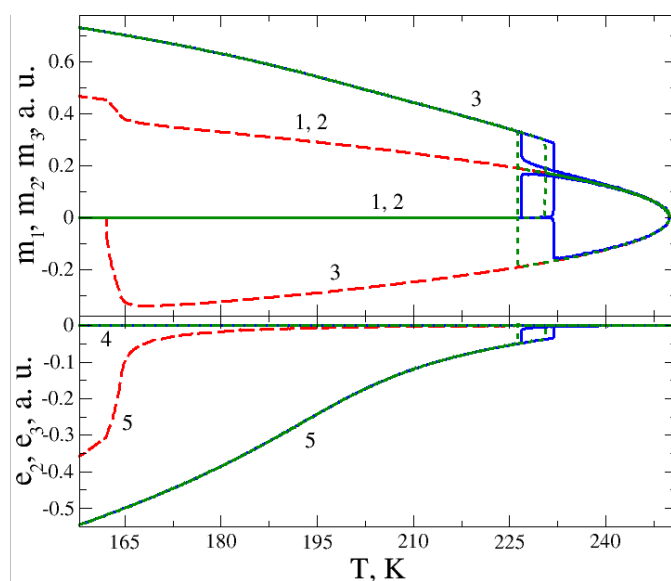


Рис. 1. Зависимость равновесного значения компонент вектора намагниченности (1-3) и деформаций (4-5) при циклическом охлаждении и нагреве: учёт инвариантов 3-го и 5-го порядков (—), учёт только инварианта 3-го порядка(---), только 5-го порядка(---).

1. A.N. Vasil'ev, A.D. Bozhko, V.V. Khovailo, I.E. Dikshtein, V.G. Shavrov, V.D. Buchelnikov, M. Matsumoto, S. Suzuki, T. Takagi, J. Tani. // *Phys. Rev. B* 59, 1113 (1999).
2. Л.С. Метлов, Е.Д. Дахно // *ФТВД*, Т.34, №4, С.49 (2024).
3. М.М. Гордей, Л.С. Метлов, В.Н. Варюхин, А.Г. Петренко // *ФТВД*, Т.35, №1 (2025) (в печати).



РЕДКИЕ ТАУТОМЕРЫ В ОДНОЦЕПОЧЕЧНОЙ РНК

Гребнева Е.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
grebneva@gmail.com

Генетический материал вирусов может представлять собой одно- или двухцепочечные молекулы ДНК, а также одно- или двухцепочечные молекулы РНК. Коронавирус SARS-CoV-2 — это штамм коронавируса, вызывающий COVID-19, острое респираторное заболевание, ответственное за пандемию 2019 г. Геномы коронавирусов представляют собой одноцепочечные РНК. Существует много тысяч вариантов SARS-CoV-2, которые были сгруппированы в несколько штаммов. Эти варианты коронавируса SARS-CoV-2 появились в результате образования наследуемых дефектов молекул РНК (мутаций) [1]. Поэтому важно понимать, как образуются наследуемые дефекты в одноцепочечной РНК.

Были разработаны полимеразно-таутомерные модели ультрафиолетового (УФ) мутагенеза [2-4], опирающиеся на гипотезу Уотсона и Крика [5] о том, что в основе мутагенеза лежит способность оснований ДНК находиться в различных таутомерных формах. Полимеразно-таутомерные модели УФ-мутагенеза [2-4] разработаны для двухцепочечной ДНК. В то же время для построения полимеразно-таутомерных моделей образования различных мутаций в коронавирусах в первую очередь необходимо разработать механизмы образования редких таутомеров оснований РНК, появляющихся при облучении одноцепочечных РНК УФ-светом.

Был разработан механизм образования редких таутомеров оснований ДНК при облучении двухцепочечной молекулы ДНК УФ-светом [6]. Одноцепочечная РНК находится в водной среде. При этом молекулы воды присоединяются к молекуле РНК с помощью водородных связей. Механизм образования редких таутомерных форм, образующихся в молекулах ДНК [6], справедлив и для молекул РНК. Молекулы ДНК и РНК различаются только тем, что у них немного различаются сахарофосфатные остовы. Кроме того, в молекулах ДНК используются основания гуанин, цитозин, аденин и тимин, а в молекулах РНК – гуанин, цитозин, аденин и урацил.

Построена модель изменения таутомерных состояний в молекулах РНК урацила, аденина [7] и цитозина, гуанина [8], входящих в одноцепочечную РНК при облучении ее УФ-светом. При облучении одноцепочечной РНК, связанной с молекулами воды водородными связями, могут образовываться по 7 редких таутомеров урацила [7], аденина [7], цитозина [8] и гуанина [8], которые могут влиять на характер спаривания оснований. Все редкие таутомеры, образующиеся в одноцепочечной РНК, будут стабильными. Эти выводы хорошо сочетаются с прямыми экспериментальными данными [9, 10].

1. Koyama T., Platt D., Parida L. // *Bulletin of the World Health Organization*, V.98, №7, P. 495-504 (2020).
2. Grebneva H.A. // *International Journal of Molecular Biology: Open Access*, V.4, №1, P.1-15 (2019).
3. Grebneva H.A. // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017, 132 p.
4. Гребнева Е.А. // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019, 345 с.
5. Watson J.D., Grick F.H.C. // *Cold spring Harbor symposia on quantitative biology*, V.18, P.123-131 (1953).
6. Grebneva H.A. // *Journal of molecule structure*, V.645, p. 133-143 (2003).
7. Гребнева Е.А. // *ФТВД*, Т.34, №1, С. 96-104 (2024).
8. Гребнева Е.А. // *Актуальные вопросы биол. физики и химии*, Т.9, № 1, С. 7-15 (2024).
9. Bebenek K., Pedersen L.C., Kunkel T.A. // *Proc. NAS USA*, V.108, №5, P.1862–1867 (2011).
10. Wang W., Hellinga H.W., Beese L.S. // *Proc. NAS USA* V.108, №43, P. 17644-17648 (2011).



ДИНАМИЧЕСКАЯ СПИНОВАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ В СИЛЬНО-КОРРЕЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ КУПРАТОВ И НЕМАТИЧЕСКОЙ ФАЗЕ ФЕРРОПНИКТИДОВ

Коришунов М.М.¹, Тогущова Ю.Н.²

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

² Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск

mkor@iph.krasn.ru

В сложных системах очень часто возникает сочетание нескольких конкурирующих или сосуществующих дальних порядков разной природы. К таким системам относятся пниктиды и халькогениды железа, многоорбитальные эффекты в которых приводят к возникновению в них необычной сверхпроводимости. Экспериментально обнаруженная разница в сопротивлении вдоль взаимно перпендикулярных направлений в плоскости железа в тетрагональной фазе свидетельствует о возникновении электронного нематического порядка.

В другом классе необычных сверхпроводников – высокотемпературных сверхпроводящих купратах – описание свойств существенно усложняется из-за присутствующих там сильных электронных корреляций. Один из возможных способов преодолеть эту проблему – найти точное решение по крайней мере в небольшом кластере и затем распространить его на весь кристалл. Такой подход лежит в основе кластерной теории возмущений (cluster perturbation theory, CPT). При этом важны не только одночастичные корреляционные функции, такие как спектральная функция, но и двухчастичные корреляционные функции – спиновая и зарядовая, непосредственно связанные со спиновой и зарядовой динамическими восприимчивостями. В рамках кластерной теории возмущений для спиновой и зарядовой динамической восприимчивости (spin-CPT и charge-CPT) корреляционные эффекты явно учитываются в рамках точной диагонализации малого кластера [1]. Рассчитаны зависимости электронной структуры и спиновой восприимчивости от допирования. Изменение восприимчивости при увеличении допирования качественно соответствует экспериментальным данным по резонансному неупругому рентгеновскому рассеянию и неупругому рассеянию нейтронов, а также расчетам в рамках квантового метода Монте-Карло [2].

Для описания влияния нематического порядка на формирование сверхпроводящего состояния в ферропниктидах использовалась пятиорбитальная модель соединений железа. Нематический порядок симметрии B_{2g} моделировался как нестабильность Померанчука d-типа. Вычисленный в рамках теории среднего поля нематический параметр порядка зависит от коэффициента нематического взаимодействия V_{nem} и изменяется скачком при его увеличении. Нарушение симметрии поверхности Ферми приводит к нарушению симметрии с C_4 до C_2 в зависимости спиновой восприимчивости от волнового вектора q . Увеличение параметра V_{nem} приводит к возрастанию пика вблизи $q=(\pi,0)$ по сравнению с $q=(0,\pi)$. В рамках спин-флуктуационной теории сверхпроводящего спаривания это приводит к тому, что в нематической фазе главное решение имеет структуру $s_{\pi\pm}$ типа и большую величину критической температуры T_c перехода в сверхпроводящую фазу, чем обычные в случае отсутствия нематичности состояния $s_{\pm}$ и $d_{x^2-y^2}$ типов [3].

1. Kuz'min V.I., Nikolaev S.V., Korshunov M.M., Ovchinnikov S.G. *Materials*, vol.16, no.13, p.4640 (2023).
2. Кузьмин В.И., Коришунов М.М., Николаев С.В., Овчинникова Т.М., Овчинников С.Г. *Письма в ЖЭТФ*, Т.120, В.1, С.45-48 (2024).
3. Коришунов М.М., Тогущова Ю.Н. *Письма в ЖЭТФ*, Т.119, В.4, С.302-307 (2024).

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ КРОНИГА–ПЕННИ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ СЛОЖНЫХ ОДНОМЕРНЫХ СВЕРХРЕШЕТОК

Драгунов И.Е.¹, Пилипенко Е.А.¹, Семенюк Ю.А.¹, Любчанский И.Л.^{1,2}

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк
igorl@donfti.ru

Исследование электронных спектров периодических структур представляет несомненный интерес, поскольку различные типы сверхрешеток (СР) находят широкое применение в современной микро-, нано- и оптоэлектронике [1].

В статье [2] впервые была решена квантовомеханическая задача о нахождении спектра электрона в поле периодического потенциала кристаллической решетки и получено аналитическое выражение для дисперсионного уравнения, решения которого определяют спектр электронов. Решение этого уравнения показывает, что в энергетическом спектре электронов возникают запрещенные зоны, т.е. такие интервалы значений энергий, которыми не могут обладать свободные электроны. Иными словами, электронный спектр СР характеризуется зонной структурой [2], а соответствующая модель, которая используется при теоретическом исследовании подобных задач в физике твердого тела, называется моделью Кронига–Пенни [3].

В настоящем сообщении представлены результаты аналитических и численных исследований электронных спектров четырехкомпонентной СР, образованной двумя потенциальными ямами и двумя потенциальными барьерами с ширинами s_1 , s_2 и t_1 , t_2 , соответственно, схематически изображенными на рис.1.

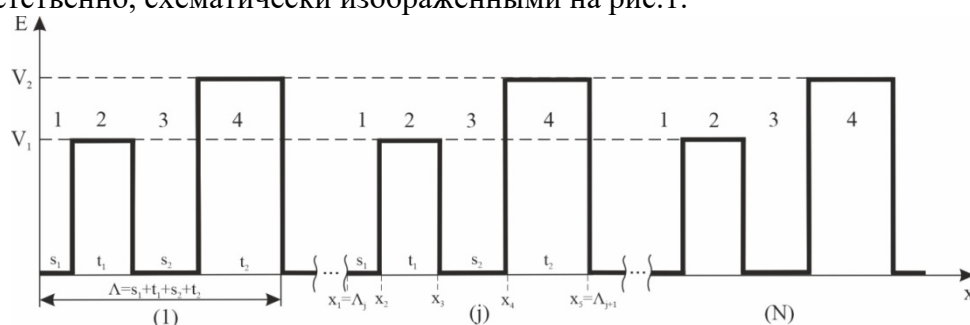


Рис.1. Потенциальный профиль СР с элементарной ячейкой, состоящей из двух потенциальных ям и двух потенциальных барьеров разной высоты V_1 и V_2

На основе модели Кронига–Пенни в явном виде получено аналитическое выражение для дисперсионного уравнения, которое зависит от параметров сверхрешетки (ширин и высот ям и барьеров). Путем численного решения этого дисперсионного уравнения найдена зонная структура электронного спектра и исследовано поведение минизон от параметров сверхрешетки.

Показано, что: 1) при одинаковых ширинах потенциальных ям число разрешенных зон (минизон) будет минимальным; 2) при изменении относительных ширин потенциальных ям в ту или в другую сторону число минизон будет увеличиваться; 3) с ростом различия высот потенциальных барьеров ширины минизон уменьшаются, а ширины запрещенных зон увеличиваются; 4) при определенных значениях относительных ширин потенциальных ям минизоны могут соприкасаться.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 25-22-00134.

1. R. Tsu. *Superlattice to Nanoelectronics*. 2-nd Edition. (Elsevier, Amsterdam, 2011).
2. R. de L. Kronig, W.G. Penney// *Proc. R. Soc. London, Ser. A*. 130, 499 (1931)
3. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. *Физика твердого тела*. (Мир, М., 1997)



ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ СЕГРЕГАЦИОННОГО СЛОЯ ПРИМЕСИ НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ

Мельник Т.Н., Юрченко В.М., Давыдова И.М.ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
ttt_meln@rambler.ru

Прогресс в области разработки микро- и наноразмерных электронных устройств стимулирует неослабевающий интерес к изучению особенностей процессов массопереноса в твердых телах ограниченных и малых размеров. Эффекты, встречающиеся при изготовлении и эксплуатации тонких металлических и полупроводниковых пленок, привлекают к себе более активное внимание исследователей. Развитый аппарат классических уравнений массопереноса позволяет описывать и прогнозировать появление специфических черт сегрегации примесей в системах, характеризующихся малыми размерами зерен (в поликристаллах) или малой толщиной пленки.

На внешней поверхности пленки толщиной d образуется сегрегационный слой δ , $d \gg \delta$. Движение примеси описывается уравнением диффузии. В начальный момент концентрация примеси в пленке c_0 , а концентрация примеси в сегрегационном слое c_s равна нулю. Принимая во внимание ограниченную емкость сегрегационного слоя и взаимодействие между атомами примеси, граничным условием выбираем изотерму Фаулера [1] с критической температурой $T_k \equiv z|u_s|/4$, где z – координационное число в сегрегационном слое, u_s – энергия межатомного взаимодействия примеси в сегрегационном слое. В пленке, по сравнению с полуограниченным образцом, изотерма существенно изменяет свою форму при соотношении $\delta/d \sim 0.1$. Приведенная в [2] оценка толщины пленки, которую можно считать тонкой, как $\delta/d \sim 0.001$, представляется завышенной.

Концентрация примеси на поверхности пленки при температуре ниже критической вначале растет по закону $\sim t^{1/2}$, а затем приближается к равновесному значению как $t^{-1/2}$. Если начальная концентрация c_0 ненамного превышает максимум на изотерме, то наблюдается замедление сегрегации на промежуточной стадии по закону $t^{-1/4}$ [1]. Если c_0 превышает максимум на изотерме при $T < T_k$, на кривой $c_s(t)$ формируется горизонтальный участок (рис. 1). Таким образом, в пленках сегрегация при $T < T_k$ проходит по пути формирования промежуточных мета-стабильных состояний, существующих тем дольше, чем ближе начальная концентрация к максимуму изотермы. Следовательно, существует область параметров, в которой реализация промежуточных состояний, отличных от равновесных, становится возможной, что подтверждается доступными экспериментальными данными. Исключение составляют особо тонкие пленки (когда толщина моноатомного сегрегационного слоя всего на порядок меньше толщины пленки) или случаи малого запаса примеси. Этот факт целесообразно учитывать при прогнозировании эксплуатационных характеристик пленок и устройств на их основе.

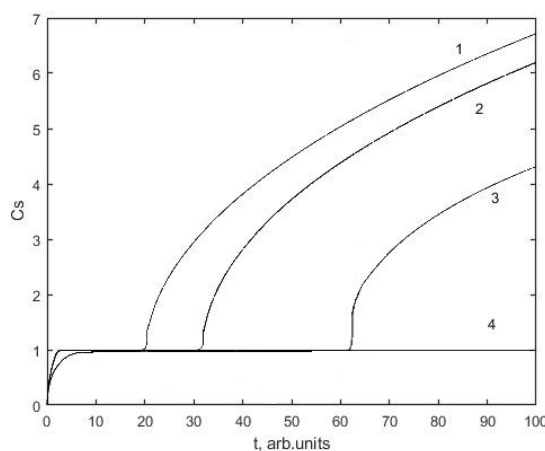


Рис.1. Сегрегация примеси на поверхности пленок различной толщины при $c_0=0.4$ и $T_k/T=1.2$: 1 - $\delta/d=0.0001$, 2 - $\delta/d=0.001$, 3 - $\delta/d=0.01$, 4 - $\delta/d=0.1$

1. Мельник Т.Н., Фельдман Э.П., Юрченко В.М. // МФуНТ, Т.21, №4, С. 28-34 (1999).
2. Krajnikov, A.V. Yurchenko V.M., Feldman E.P. et al. // Surf. Sci., V.515, P.36-44 (2002).
3. Watanabe K., Hashiba M., Yamashina T. // Surf. Sci., V. 61, Issue 2, P. 483-490 (1976).



УДК 538.9

ВЛИЯНИЕ ТРЕХЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМОВ НА УДЕЛЬНУЮ ТЕПЛОЕМКОСТЬ СЖАТЫХ КРИСТАЛЛОВ Ne, Ar И Kr

Пилипенко Е.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
pilipenko.katerina@mail.ru

Кристаллы инертных газов (КИГ) являются простейшими молекулярными кристаллами, образующими ГЦК-структуру с замкнутыми электронными оболочками и одним атомом в элементарной ячейке. Это делает их незаменимыми объектами для теоретических исследований и тестирований различных моделей. Кроме этого, поскольку КИГ остаются стабильными даже при высоких давлениях и температурах [1], их термодинамические свойства в таких экстремальных условиях играют важную роль в понимании и планировании экспериментов с использованием ячейки алмазных наковален [2].

Для нахождения термодинамических свойств КИГ была построена динамическая матрица на основе неэмпирической версии квантово-механической модели деформируемых и поляризуемых атомов с учетом трехчастичного взаимодействия как за счет перекрытия электронных оболочек, так и за счет их деформации. Это позволило рассчитать для КИГ фоновые частоты [3] в нужных точках зоны Бриллюэна, а также (с использованием метода Чади-Коэна) удельную теплоемкость C_V сжатых ГЦК- Ne, Ar и Kr в широком интервале давлений. Были рассчитаны температурные зависимости (от 25 К до 400 К) решеточной теплоемкости C_V в интервале сжатия от 0 до 0.7 ($p=169.6$ GPa) для Ne, от 0 до 0.6 ($p=97.9$ GPa) для Ar и от 0 до 0.6 ($p=93$ GPa) для Kr, а также исследовано влияние трехчастичного взаимодействия и деформации электронных оболочек атомов в парном и трехчастичном приближениях. Было обнаружено, что с ростом сжатия значения C_V уменьшаются в соответствующих температурных интервалах. Они не достигают предельного значения $3R$, а также изменяется вид кривой как в модели МЗ (расчет на основе парного взаимодействия в короткодействующем потенциале отталкивания), так и в модели МТ₂ (к парному взаимодействию добавляются трехчастичные силы за счет перекрытия электронных оболочек и деформация электронных оболочек в парном и трехчастичном приближениях). Кроме того, трехчастичное взаимодействие и деформация электронных оболочек атомов несколько повышают значения теплоемкости даже в недеформированных кристаллах ряда Ne-Kr.

К сожалению, в настоящее время нам известны экспериментальные данные удельной теплоемкости только при нулевом давлении. Полученные температурные зависимости C_V кристаллических Ne, Ar и Kr находятся в хорошем согласии с имеющимся экспериментом. Расчеты теплоемкости показали, что относительная погрешность полученных нами результатов по сравнению с экспериментальными данными уменьшается с увеличением температуры.

Таким образом, представленные результаты показывают, что расчеты динамики решетки для сжатых кристаллических Ne, Ar и Kr, выполненные в рамках теории, учитывающей деформацию электронных оболочек, позволяют количественно исследовать фононы, упругие свойства и термодинамические характеристики КИГ в широком интервале давления и температуры с хорошей точностью.

1. A. Dewaele, A.D. Rosa, N. Guignot, D. Andrault, J.E.F.S. Rodrigues, G. Garbarino// *Sci. Rep.* V.11 (1), P. 15192 (2021).
2. A. Jayaraman// *Rev. Modern, Phys.* 55, pp. 65–108 (1983).
3. Е.П. Троицкая, Е.А. Пилипенко, Е.Е. Горбенко// *ФТТ*, Т. 61, с. 1890 (2019).

КВАЗИЧАСТИЧНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕИДЕАЛЬНЫХ
ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ РЕШЕТКАХ МИКРОПОР

Федоров С.А., Безус Ю.А., Рыбалка А.Е.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
paladyan0108@yandex.ru

В работе проведено теоретическое исследование энергетических спектров квазичастичных возбуждений в неидеальных гексагональных топологически упорядоченных нанокристаллических системах с примитивной и сложной решетками.

С помощью численного моделирования найдены законы дисперсии экситоноподобных и поляритонных возбуждений, выявлены их особенности связанные с симметрией системы, позволяющие определять области существования поляритонного конденсата для тех систем, в которых возможна Бозе-эйнштейновская конденсация. Исследована концентрационная зависимость дисперсионных и зонных характеристик при различных параметрах нанокристалла.

Проведенные исследования расширяют возможности функциональных пористых материалов как путем управляемого внедрения в них структурных дефектов, так и путем изменения симметрии решетки Браве. Приведенные в работах [1-2] детальные исследования квазичастичных состояний неидеальных поляритонных структур, необходимы как для понимания механизмов распространения электромагнитных возбуждений, в соответствующих пористых материалах, так и для дальнейшего развития квантовой нанофотоники.

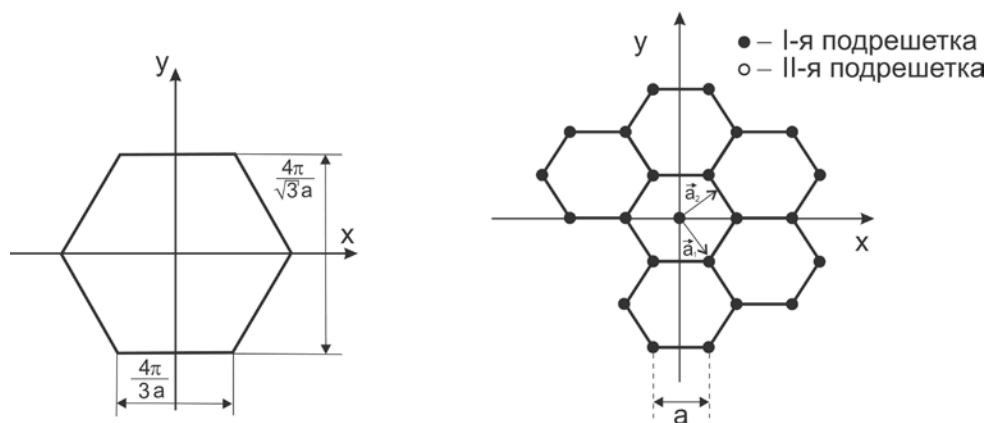


Рис.1. Гексагональная двухподрешеточная двумерная решетка и первая зона Бриллюэна для такого кристалла

Показано, что в настоящее время расширение возможностей функциональных пористых материалов идет не только за счет управляемого внедрения в них квантовых точек [1], структурных дефектов [2], создания упругой деформации [1], но и путем изменения кристаллографической симметрии нанорешеток Браве.

1. V. Rumyantsev, S. Fedorov, K. Gumennyk, M. Sychanova, A. Kavokin // *Scientific Reports*, **4**, 2014, P. 06945.

2. Паладян Ю.А. *Эффекты распространения электромагнитных и акустических возбуждений в несовершенных кристаллических средах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / ДОНФТИ. – Д., 2022. – 112 с.*



МОДЕЛИРОВАНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В БИСЛОЙНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

Самигуллина А.И., Шарафуллин И.Ф.ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа
angelasamig2002@gmail.com

Спиновые волны представляют собой коллективные возбуждения в магнитных системах, которые возникают из-за взаимодействия спинов в ферромагнетиках и антиферромагнетиках. Эти волны играют важную роль в области магнетизма и имеют значение для разработки новых технологий. Изучение поведения спиновых волн под воздействием внешнего магнитного поля является актуальной задачей, поскольку изменение магнитного поля может существенно влиять на характеристики этих волн.

Одним из методов, позволяющих исследовать дисперсионные свойства спиновых волн, является метод функции Грина. Этот подход позволяет получить закон дисперсии спиновых волн, описывающий зависимость их частоты от волнового вектора [1].

В данной работе рассматривается влияние внешнего магнитного поля на спиновые волны, выводится закон дисперсии с использованием метода двухвременных функций Грина. Имеются две тонкие пленки, одна из которых магнитная, а другая сегнетоэлектрическая. Полный гамильтониан системы имеет следующий вид:

$$H_1 = -J_1 \sum_{i,j} \vec{S}_i \vec{S}_j - \sum_{i,j} I_{i,j} \vec{S}_i^z \vec{S}_j^z - g\mu_B h \sum_i \vec{S}_i^z - J_{mf} \sum_{i,j} (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j)^z \vec{P}^z - J_f \sum_{i,j} \vec{P}_i \vec{P}_j - \sum_i E^z P_i^z, \quad (1)$$

где первое слагаемое в гамильтониане описывает ферромагнитное взаимодействие между ближайшими соседними спинами, второе слагаемое – анизотропное взаимодействие, третье слагаемое – взаимодействие со внешним магнитным полем, четвертое слагаемое – магнитоэлектрическое взаимодействие между пленками, пятое и шестое слагаемые – гамильтониан сегнетоэлектрической системы.

Задаваемые параметры модели имеют следующие значения: $I = 0.1$, $J_1 = 1$, $J_{mf} = 0.1$, $J_{mf} = 0.66$, угол $\theta = 0.58$, где величина магнитного поля синего цвета - $h = 0$, зеленого - $h = 0.25$, красного - $h = 1$ (рис. 1).

В модели со спиральной структурой, учитывающей взаимодействие только с ближайшими соседями J_1 , дисперсия спиновых волн описывается квадратичной зависимостью энергии от волнового вектора k_z . Рост напряженности магнитного поля приводит к переориентации спинов и изменению энергетических уровней. Усиление магнитных взаимодействий внутри слоя, вызванное этим процессом, проявляется в различных эффектах, таких как формирование доменных структур определённой конфигурации и возникновение новых, более сложных магнитных состояний.

Также были изучены магнитные характеристики, такие как намагниченность, восприимчивость, теплоемкость и энергия в зависимости от температуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 тема № 324-21.

1. S. El. Hog, I. F. Sharafullin, H. T. Diep et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, V. 563, P. 169920 (2022).

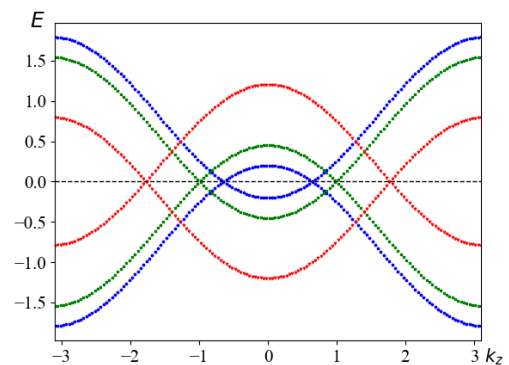


Рис.1. Зависимость энергии от волнового вектора k_z .



КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ИНВАРИАНТНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Самолетов А.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
samolet@donfti.ru

Поиск и исследование уравнений движения, для которых заданная плотность распределения вероятностей является инвариантной, – на первый взгляд, абстрактная академическая задача. Это первое впечатление ошибочно.

Показано, что формулировка концепции генерации систем уравнений движения с данной инвариантной плотностью является задачей общего положения в моделировании кинетических процессов.

Дано теоретическое обоснование, приводящее к формулировке функционального уравнения, множество решений которого суть кинетические уравнения с заданной инвариантной плотностью [1-4]. Дано представление о спектре задач, допускающих использование данной теоретической схемы ([5-7] и примеры из текущей литературы).

В качестве концептуального примера вывода кинетических уравнений в рамках сформулированной теоретической схемы рассмотрен случай частицы, помещенной в жидкость (броуновская частица). Частица и окружающая ее жидкость не существуют обособленно, но постоянно находятся в совместном движении. Любое движение частицы возмущает окружающую жидкость, что, в свою очередь, оказывает влияние на движение самой частицы. Вопрос состоит в масштабе времени протекания этого процесса.

В предположении, что инвариантная плотность суть плотность распределения Максвелла по скоростям, получены решения: игнорирующее совместное движение частицы и вмещающей ее жидкости (классическое уравнение Ланжевена) и учитывающее таковое. Во втором варианте уравнений движения уравнение Ланжевена получено в предельном случае быстрых процессов релаксации в жидкости.

1. Samoletov A, Vasiev B. // *J. Chem. Phys.*, V.147, Iss.20, P.204106 (2017).
2. Samoletov A.A, Dettmann C.P, Chaplain M.A.J. // *J. Chem. Phys.*, V.132, №24, P.246101 (2010).
3. Samoletov A.A, Dettmann C.P, Chaplain M.A.J. // *J. Stat. Phys.*, V.128, P.1321–1336 (2007).
4. Samoletov A, Vasiev B. // *J. Phys: Conf. Ser.*, V.2090, №1, P.012059 (2021).
5. Samoletov A, Vasiev B. // *BioSystems.*, V.246, P.105342 (2024).
6. Samoletov A., Vasiev B. // *Springer Proc. Math. Stats.*, V.446, P.67–77 (2024).
7. Самолетов А.А. // *ФТВД*, Т.35, №1, С.22-43 (2025).



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ

Гладилин О.А., Заворотнев Ю.Д., Гуменник К.В.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
zavorotnev.yurii@mail.ru

Материалы, используемые в промышленности, часто подвергаются повышенным разрушающим нагрузкам. Поэтому актуальными являются исследования их свойств при наложении мегапластической деформации, в частности интенсивной пластической деформации кручением. Скорость подобных нагрузок может быть малой или большой. В последнем случае возникшая в веществе в результате внешнего воздействия ударная волна, передний фронт которой называется кинком, не нуждается в подводе энергии. Этот процесс является автоволновым и представляет собой простейший топологический солитон.

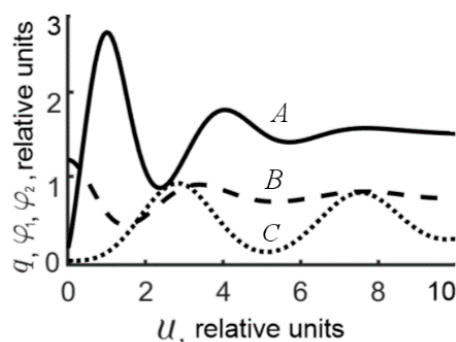


Рис.1. Эволюция кинка (A) общей (B) и винтовой (C) дислокаций

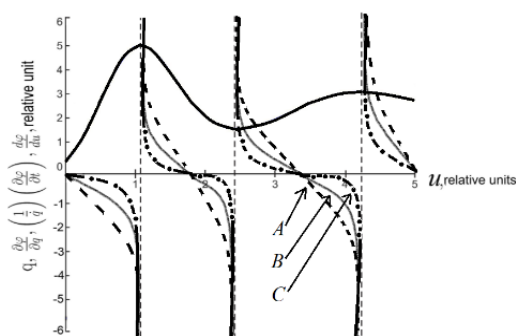


Рис.2. Скорости рождения и аннигиляции дислокаций при прохождении кинка.

Закономерности распространения кинка изучаются с помощью феноменологической теории Ландау. В разложении неравновесного потенциала учитывались инварианты Лифшица, слагаемые до шестого порядка по векторному структурному параметру порядка (ПП) и для третьего по скалярным ПП (плотности общих и винтовых дислокаций). В минимизирующей системе уравнений Эйлера осуществлялся переход к автомодельной переменной $u=z-ct$, где c – скорость кинка. Новая переменная связывает временную t и декартовую z переменные. Полученный результат представлен на рис.1. Распространение кинка идет справа налево. Очевидно, что процесс переключения имеет колебательный характер. Показано, что независимо от начальных условий в итоге система переходит в одно и то же стационарное состояние.

Обнаружены особенности поведения скоростей рождения и аннигиляции дислокаций. Ввиду волнового характера процесса распространения эти скорости имеют особенности в точках экстремума кинка (рис.2). На этом рисунке линия A – скорость рождения, B – аннигиляции, C – суммарная скорость.



СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В АКУСТИКЕ СЛОИСТЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

Сухорукова О.С.^{1,2}, Тарасенко² А.С., Тарасенко С.В.², Шавров В.Г.³

¹Физико-технический факультет, Донецкий государственный университет, 283001, г. Донецк

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, 283048, г. Донецк

³Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009, г. Москва

shavrov32@mail.ru

Для полукоткрытой волноведущей слоистой структуры (в том числе и для уединённой границы раздела сред) предложен критерий формирования связанных состояний в континууме («тёмных» состояний), в основе которого лежит введённое авторами представление об *особой поверхностной волне*. Адекватность этих представлений продемонстрирована на конкретных примерах в акустике магнитных гетероструктур.

На примере слоя оптически прозрачного магнитного диэлектрика между двумя идентичными анизотропно проводящими метаповерхностями (а также конечной одномерной сверхрешетки с таким элементарным периодом) изучены особенности резонансного фотонного прохождения, связанные с гибридизацией двух независимых механизмов формирования коллапса резонанса Фано: гиротропии и пространственной дисперсии. В частности, показано, что возникновение в спектре излучения радиационных поляритонов интерференционного типа «темных» состояний с нулевой радиационной шириной может сопровождаться подавлением эффекта полной электромагнитной прозрачности слоя, который характерен для двухмодовой модели образования данного типа связанных состояний в континууме. При этом одновременно возникающая в слое радиационная поляритонная мода для фотонного кристалла рассматриваемого типа может стать сверхизлучательной, что приведет к практически полному фотонному отражению.

Гибридизация магнитоупругого и неоднородного обменного взаимодействий может приводить к формированию интерференционного типа связанных состояний в спектре излучения вытекающих поверхностных магнотных поляронов. В окрестности таких «темных» состояний их радиационная ширина может быть сколь угодно малой («суперрезонанс»), вследствие чего для падающей извне на магнитный слой квазиплоской (или квазигармонической) упругой волны неограниченно (в бездиссипативном приближении) увеличивается продольный эффект Шоха (или вигнеровское запаздывание), подавляются эффекты нулевого рассеяния поля падающей и расщепления формы отраженной волн.

Финансирование

Исследование роли гибридизации эффектов пространственной дисперсии и гиротропии на электромагнитную прозрачность слоя с одним открытым каналом фотонного рассеяния выполнено при поддержке Минобрнауки РФ за счет государственного задания ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», бюджетная тема.



СКРЫТЫЕ «ТЕМНЫЕ» ПОЛЯРИТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ (ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ МАГНИТНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ МНОГОМОДОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ)

Сухорукова О.С.^{1,2}, Тарасенко А.С.², Тарасенко С.В.², Шавров В.Г.³

¹ ФГБОУ «Донецкий государственный университет, 283001, Донецк»

² ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

³ ФГБНУ «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», г. Москва
shavrov32@mail.ru

Поиск новых эффективных способов управления электромагнитной прозрачностью оптически анизотропной слоистой гетероструктуры при прохождении через нее электромагнитной (ЭМ) волны представляет в настоящее время значительный как научный, так и практический интерес [1]. В этой связи, несомненно, важными представляются результаты работы [2], в которой на примере квантового волновода с притягивающей примесью конечных размеров изучалось распространение электронных волн. В частности, было показано, что форма кривой прозрачности в зависимости от энергии электрона, проходящего через примесь, может представлять собой асимметричную кривую, характерную для резонанса Фано. При этом слияние максимума и минимума на такой кривой в некоторой точке (коллапс резонанса Фано) отвечает формированию на фоне сплошного спектра связанного состояния в континууме (ССК), что вследствие деструктивной двухмодовой интерференции в открытом канале излучения сопровождается равенством единице коэффициента прозрачности в точке коллапса. Это соответствует полной резонансной прозрачности примеси в структуре и позволяет характеризовать подобные ССК как «темные» состояния. Однако до сих пор значительные усилия по поиску аналогичных эффектов в оптике были сосредоточены, главным образом, на слоистых гетероструктурах с участием немагнитных диэлектриков. В частности, особый интерес в этом плане представляет изучение эффектов электромагнитной прозрачности открытого микрорезонатора, но не вследствие когерентной оптической нелинейности, а как результат линейной оптики, сопутствующий формированию в сплошном спектре излучения такой структуры особых точек - ССК. Вместе с тем в последние годы большой исследовательский интерес привлекла и идея создания быстродействующих и энергоэффективных устройств спиновой электроники за счет перехода от зарядовых токов к спиновым, в том числе и обусловленных спиновыми волнами в диэлектриках (магнонами). При этом необходимость дальнейшего существенного повышения быстродействия устройств функциональной магнитоэлектроники привела к формированию и бурному росту магнитной спинтроники на основе антиферромагнетиков и ферримагнетиков.

Для плоской объемной электромагнитной волны, падающей на слой оптически прозрачной ферримагнитной среды, связывающий две метаповерхности, одновременный учет как пространственной дисперсии, так и гиротропии не только увеличивает число «темных» состояний в открытом канале фотонного рассеяния, но и приводит к подавлению эффекта полной электромагнитной прозрачности слоя в точках коллапса резонанса Фано (в спектре излучения радиационных магнитных поляритонов соответствующие «темные» ССК становятся скрытыми).

1. Maekawa S., Kikkawa T., Chudo H., Ieda J., Saitoh E. // *Journal of Applied Physics*, V.133, P.020902.(2023)

2. Ким Ч.С., Сатанин А.М., Джо Ю.С., Косби Р.М. // *ЖЭТФ*, 116, 263 (1999).



СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗВЕРнуТОЙ ФОРМЫ ЯКОБИАНОВ

Христов А.В., Червинский Д.А., Шелест В.В.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
chervin@dfti.donbass.com

Термодинамическими коэффициентами называют величины, основой которых являются производные на множестве (T, S, P, V) . Коэффициенты характеризуют дилатометрические и калориметрические свойства термодинамической системы. Существуют 12 таких коэффициентов, среди которых только три являются независимыми. Выбор последних произволен и определяется прежде всего удобством описания физической системы в эксперименте. Цель работы - получить нетривиальные связи между термодинамическими коэффициентами на основе применения метода якобианов, в том числе с использованием калибровочных соотношений.

Исследованы ситуации, когда при умножении якобианов, определяющих термодинамические коэффициенты, на условные единицы (калибровочные соотношения типа $\partial(x, y)/\partial(x, y)=1$, где x, y – термодинамические силы (T, P) и термодинамические координаты (S, V)) в процессе преобразований появляются новые детерминанты, требующие записи их в развернутой форме. Единичные якобианы можно перемножать и применять к ним чисто алгебраические методы типа:

$$1 = \frac{\partial(S, T)}{\partial(P, V)} \frac{\partial(x, y)}{\partial(x, y)} = \frac{\partial(S, T)}{\partial(x, y)} \frac{\partial(x, y)}{\partial(P, V)}, \quad 1 = \frac{\partial(P, V)}{\partial(S, T)} \frac{\partial(x, y)}{\partial(x, y)} = \frac{\partial(P, V)}{\partial(x, y)} \frac{\partial(x, y)}{\partial(S, T)}.$$

Полученные нестандартные и при этом нетривиальные связи между термодинамическими коэффициентами связывают их и в основном приводятся впервые. Примеры полученных соотношений:

$$\alpha_p = \frac{C_v}{K_T m_v^{(T)}} = \frac{\alpha_p l_T^{(V)}}{m_v^{(T)}} + \frac{\alpha_p C_p}{C_v} = \frac{\alpha_p^2}{\alpha_s} + \frac{\alpha_p K_p}{K_T} = \frac{C_p}{PTV\beta_v} + \frac{l_T^{(V)}}{TV} + \frac{C_p}{K_T TV\alpha_p} = \frac{m_p^{(T)}}{K_T T} - \frac{m_v^{(T)}}{TV},$$

$$\alpha_s = -\frac{C_v}{V l_T^{(P)}} = -\frac{l_T^{(V)}}{TV} - \frac{C_p}{V l_T^{(P)}} = \frac{TP\alpha_s\beta_s}{l_T^{(P)}} - \frac{TV\alpha_s^2}{l_T^{(V)}}, \quad C_v = K_T \alpha_v m_v^{(T)}, \quad C_p = \frac{PV m_p^{(T)} \beta_v}{K_T},$$

$$K_T = K_s + \frac{C_v}{m_v^{(T)} \alpha_s} = -\frac{TV(P\beta_v + K_T \alpha_s)}{l_T^{(V)}} - \frac{C_v K_T T}{l_T^{(V)} l_T^{(P)}} = \frac{m_p^{(T)}}{T \alpha_p} - \frac{K_T m_v^{(T)}}{TV \alpha_p},$$

$$K_s = K_T + \frac{PV l_T^{(P)} \beta_v}{C_v} = K_T - \frac{P\beta_v}{\alpha_s} = \frac{C_p K_T}{C_v} = \frac{C_p K_s}{C_v} + \frac{C_p}{m_v^{(T)} \alpha_s} = TP^2 V \frac{\beta_s \beta_v}{C_v},$$

$$\beta_v = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = \frac{C_v}{P m_v^{(T)}} = -\frac{K_T \alpha_p}{P} = \frac{l_T^{(P)} \beta_v}{m_p^{(T)}} + \frac{C_v K_T}{P V m_p^{(T)}} = \beta_s - \frac{V l_T^{(P)} \alpha_s}{P l_T^{(V)}} = \beta_s - \frac{C_v}{P l_T^{(V)}},$$

$$l_T^{(V)} = T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T = -TV \alpha_p = -\frac{C_p}{P \beta_s} = \frac{C_v}{\alpha_s K_T}, \quad m_v^{(T)} = T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_v = -TV \alpha_s = \frac{C_v}{P \beta_v} = \frac{C_v}{K_T \alpha_p},$$

где α – коэффициент изобарического/адиабатического расширения, β – термический коэффициент давления, K – модуль упругости, $l_T^{(V)}$, $l_T^{(P)}$ – теплота изотермического сжатия/расширения, $m_v^{(T)}$, $m_p^{(T)}$ – теплота изохорического сдвигания и изобарического расширения.

В результате продемонстрирована эффективность метода якобианов, в том числе эффективность применения калибровочных соотношений. Показано, насколько расширяется спектр термодинамических связей при использовании вычислений якобианов в развернутой форме.



ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА КРИСТАЛЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ И $\text{Fe}_{48}\text{Co}_{32}\text{P}_{14}\text{B}_6$

Васильев С.В.^{1,2}, Свиридова Е.А.^{1,2}, Лимановский А.И.¹, Ткач В.И.¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

²ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
г. Макеевка
ksvir@list.ru

Исследования термической устойчивости структуры металлических стёкол (МС) являются актуальными с практической и фундаментальной точек зрения, поскольку позволяют установить не только температурно-временные пределы эксплуатации, но и закономерности процесса кристаллизации расплавов в далёких от равновесия условиях. Решение последних задач достигается путём анализа экспериментальных кинетических и структурных данных.

Целью настоящей работы являлось установление факторов, определяющих существенные (~ 60 К) различия температур начала кристаллизации МС $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (I) и $\text{Fe}_{48}\text{Co}_{32}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (II) с высоким уровнем магнитно-мягких свойств, кристаллизующихся по механизму нестационарного гомогенного зарождения и линейного роста эвтектических колоний. Для достижения поставленной цели был проведен анализ кинетических кривых $X(t)$ изотермической кристаллизации стекол I и II в температурных диапазонах 617–662 К и 682–714 К соответственно. Сопоставление температурных зависимостей времен начала кристаллизации показало, что в диапазоне температур от комнатной до температур кристаллизации МС значения t_{ons} стекла II на несколько порядков величины выше, чем I. Анализ кинетических кривых $X(t)$ в рамках комбинированной модели Колмогорова–Кэшиева [1] показал, что степень нестационарности МС II, выше, чем I, и позволил оценить температурные зависимости характеристических времен нестационарности τ_{ns} и кристаллизации τ_c , которые связаны со скоростями стационарного зарождения J_{st} и роста U , как $\tau_c = [(\pi/3)J_{\text{st}}U^3]^{-1/4}$. В свою очередь, с использованием ранее найденных значений скоростей роста кристаллов в стеклах I [2] и II [3] было установлено, что стационарные скорости зарождения в этих МС лежат в диапазонах $3,4 \times 10^{15} - 10^{17} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $3 \times 10^{17} - 7,5 \times 10^{17} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Анализ оцененных таким образом значений J_{st} и U , проведенный в рамках уравнений классической теории кристаллизации [4], позволил установить температурные зависимости кинетических и термодинамических параметров, определяющих скорости зарождения и роста: эффективных коэффициентов диффузии на межфазной границе, разности термодинамических потенциалов, работы образования критических зародышей и удельной свободной энергии границы раздела зародыш/расплав. Корректность проведенного анализа подтверждается разумным согласием параметров, характеризующих кристаллизацию МС I и II, с имеющимися в литературе данными. Из результатов анализа следует, что более высокая термическая устойчивость аморфной фазы в сплаве $\text{Fe}_{48}\text{Co}_{32}\text{P}_{14}\text{B}_6$ обусловлена более низкими значениями эффективного коэффициента диффузии и более высокой степенью нестационарности процесса зарождения, которая снижает значения J_{st} в 3–7 раз в диапазоне температур кристаллизации, в то время как для стекла $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ этот коэффициент составляет 1,1–4,5.

1. Васильев С.В., Ткач В.И., Свиридова Е.А. и др. // ФТВД, Т.27, №1, С.63-76 (2017).

2. Vasiliev S.V., Kovalenko O.V., Svyrydova K.A. et al // J. Mater. Sci., V. 54, № 7, P. 5788 –5801 (2019).

3. Васильев С.В., Парфений В.И., и др. // ФТТ, Т.62, №12, С. 2012–2019 (2020).

4. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. ч. I. М.: Мир, 1978, 806 с.



КИНЕТИКА НАМАГНИЧЕННОСТИ И МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА $\text{Ni}_{50,5}\text{Mn}_{33,4}\text{In}_{15,6}\text{V}_{0,5}$ ВБЛИЗИ ТОЧКИ КЮРИ

Карпунин Д.А.¹, Морозов Е.В.¹, Коледов В.В.¹, Мусабилов И.И.², Алиев А.М.³,
Гамзатов А.Г.³, Абдулкадирова Н.З.³

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

³ Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала

Interceptor1986@mail.ru

Изучение калорических эффектов (КЭ) в твердых телах под воздействием сильных переменных полей признано перспективным для создания новой технологии эффективных твердотельных холодильников. Наибольший интерес вызывают материалы с фазовыми переходами (ФП), обладающие «гигантскими» КЭ. Уравнения состояния вблизи ФП имеют аномалии, описывающие КЭ. Недавно в работе [1] обнаружен эффект резкой зависимости магнитокалорического эффекта от частоты переменного сильного магнитного поля. Изучение материалов в критических условиях в момент ФП затруднено отсутствием стандартных методов изучения термодинамических параметров вещества, то есть непосредственно в процессе ФП.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном изучении зависимостей термодинамических параметров температуры и намагниченности для решения уравнений состояния и кинетики в магнитных полях порядка 1 Тл в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{50,5}\text{Mn}_{33,4}\text{In}_{15,6}\text{V}_{0,5}$. Выбранный в качестве образца сплав, согласно данным ДСК и магнитометрии, имеет два связанных ФП: точку Кюри при $T_C = 286,5$ К и метамагнитоструктурный ФП с характерными температурами $M_s = 261$ К, $M_f = 250$ К, $A_s = 258$ К, $A_f = 268$ К. Для исследования кинетики МКЭ использована методика, описанная в [1]. Для исследования кинетики намагниченности вблизи магнитного фазового перехода образца сплава $\text{Ni}_{50,5}\text{Mn}_{33,4}\text{In}_{15,6}\text{V}_{0,5}$ в импульсных полях была создана оригинальная установка, включающая в себя блок генерации прямоугольного импульса магнитного поля до 1 Тл переменной длительности от 1 с до 10 мкс и быстродействующие датчики магнитного момента и температуры, а также блок термостатирования и управления. При изучении кинетики ФП решался вопрос измерения $M(H, t)$ в точке ФП. Зависимость намагниченности от времени при разных магнитных полях в точке Кюри. Время единичного импульса составляло 70 мс (рис. 1.)

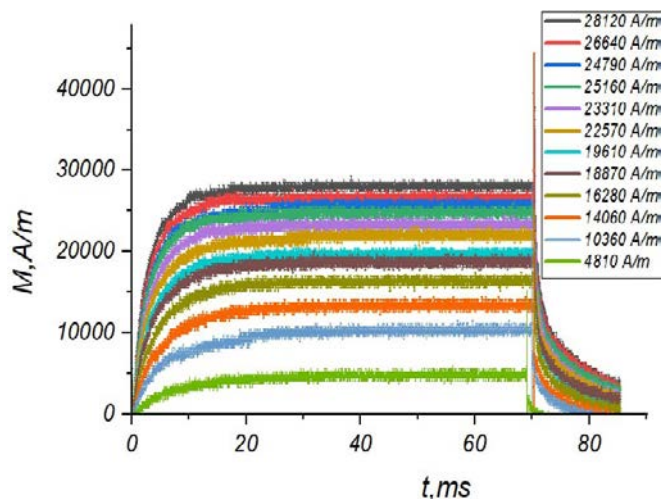


Рис.1. Временные зависимости намагниченности образца при разных магнитных полях.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2024-0007).

1. Aliev A.M. et al., J. Al. Com. V. 676, P. 601–605 (2016).



ТЕПЛОЕМКОСТЬ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ СТРУКТУРНОМ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ СКАЧКОМ СПОНТАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И НАМАГНИЧЕННОСТИ

Кузенко Д.В.

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон», г. Донецк
danil.kuzenko.84@yandex.ru

При анализе температурных зависимостей теплоемкости кристаллических тел для оценки фононного вклада применяют функции Дебая и Эйнштейна. Однако в соединения, которые являются сегнетоэлектриками и ферромагнетиками при фазовых переходах происходит скачок поляризации и намагниченности, который вносит вклад в теплоемкость образца и не может рассматриваться в рамках теорий теплоемкости Дебая и Эйнштейна. В качестве возможного описания такого вклада предлагается модель активационных механизмов фазовых переходов, рассмотренная ранее для сегнетоэлектриков, в которой наличие максимума диэлектрической проницаемости связывается с особенностями фононного спектра [1]. Предполагается, что с учетом спин-фононного взаимодействия такое рассмотрение возможно и в ферромагнетиках. Проверка модели проводится на основе анализа экспериментальных данных температурных зависимостей теплоемкости $C_p(T)$ сложных оксидов переходных металлов: керамических сегнетоэлектрика PbTiO_3 [2], магнетика CoFe_2O_4 [3] и мультиферроидного композита $0.3\text{CoFe}_2\text{O}_4-0.7\text{PbTiO}_3$ [3], для которых в диапазоне температур 500-800 К существует вклад в теплоемкость от скачка поляризации и намагниченности. Анализ зависимости $C_p(T)$ проводился в координатах $\ln(C_p)-1/(kT)$, из чего определялись участки, аппроксимируемые уравнением, содержащим вероятностный фактор Больцмана, характерный для активационных процессов:

$$C_p \sim \exp\left(-\frac{U_a}{k \cdot T}\right), \quad (1)$$

U_a – энергия активации теплоемкости, k – постоянная Больцмана, T – температура (рис.1).

Из данных рис.1 и уравнения (1) для образцов на трех выделенных участках зависимости в координатах $\ln(C_p)-1/(kT)$ найдены значения энергий активации теплоемкости:

№	U , eV		
	PbTiO_3	CoFe_2O_4	$0.3\text{CoFe}_2\text{O}_4-0.7\text{PbTiO}_3$
1	0.026	0.020	0.009
2	0.288	0.080	0.036
3	2.852	0.185	0.144

Вычисленные значения энергии активации теплоемкости PbTiO_3 согласуются с полученными ранее энергиями активации диэлектрической проницаемости BaTiO_3 и $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ [1] и обусловлены наличием доменной и дефектных структур. Для CoFe_2O_4 активационные процессы также выражены, но с меньшими энергиями активации, что, вероятно, обусловлено более низким по-сравнению с сегнетоэлектрическим спин-фононным взаимодействием в магнетике.

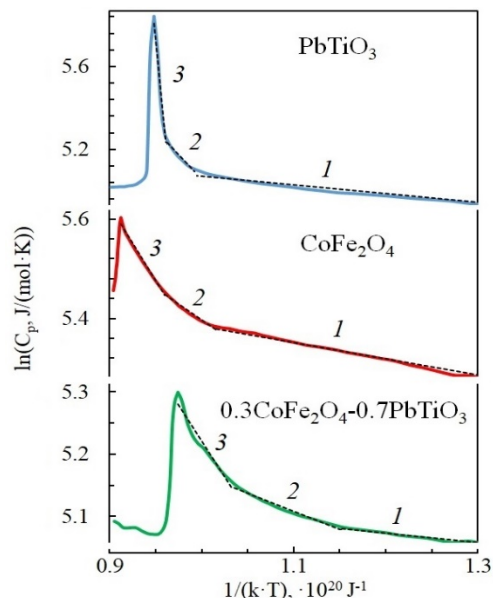


Рис.1. Зависимости $\ln(C_p)[1/(kT)]$. Участки 1-3 – линейная аппроксимация.

1. Кузенко Д.В. // Известия РАН. Серия физическая, Т.88, №5, С.740-746 (2024).
2. Михалёва Е.А., Флёров И.Н., Горев М.В. и др. // ФТТ, Т.54, №9, С.1719-1726 (2012).
3. Митаров Р.Г., Каллаев С.Н., Омаров З.М. и др. // ФТТ, Т.65, №2, С.361-364 (2023).



ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ–ТВЕРДОЕ ТЕЛО ПРИ ПОМОЩИ АКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Кузнецова И.Е., Анисимкин В.И., Шамсутдинова Е.С.

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва

kuziren@yandex.ru

Изменение климата, контроль за состоянием жидких веществ при изменении температуры, разработка методов контроля за оледенением самолетов, кораблей, автомобильных дорог и т.д. требуют внедрения новых более современных датчиков. Работы в этом направлении ведутся в том числе в области использования акустоэлектронных технологий [1,2]. В данной работе описана возможность реализации подобных датчиков на разных типах акустических волн - объемных (ОАВ) и волнах в пластинах (АВП).

Датчик на ОАВ состоит из излучателя волны 1, ее приемника 2 и кюветы 3 для вещества (рис.1,а). Когда вещество находится в жидком состоянии, продольная L-волна распространяется от излучателя к приемнику, и на его выходе регистрируется сигнал $S_{12}(\tau_L)$, задержка которого $\tau_L(ж)$ соответствует скорости L-волны $V_L(ж)$ в этой жидкости (рис.1,б). При охлаждении жидкости и образовании льда сигнал $S_{12}(\tau_L)$ скачкообразно уменьшается по амплитуде и сдвигается в область меньших задержек τ (рис. 1, б, в), т.к. $V_L(лед) > V_L(ж)$ и $\tau_L(лед) < \tau_L(ж)$. Этот факт служит индикатором льдообразования.

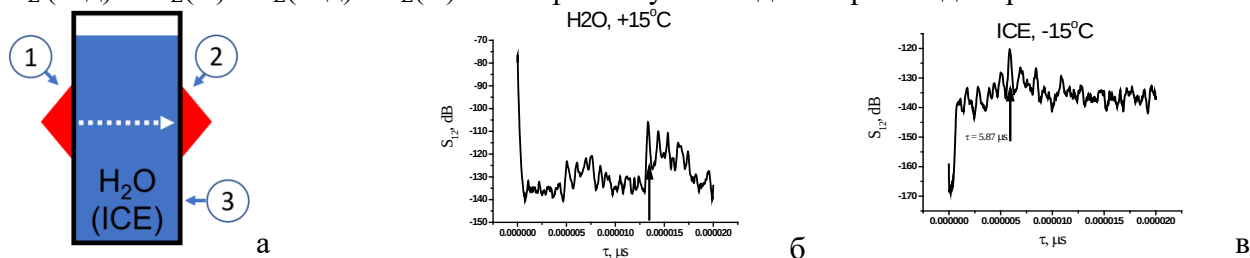


Рис. 1. Датчик оледенения на ОАВ: а – схематический вид, б – импульсный отклик в жидкой фазе, в – тот же отклик для льда; 1 - излучатель, 2 - приемник, 3 - кювета.

Акустические волны разного порядка (рис. 2,а) обладают разной чувствительностью к агрегатному состоянию вещества на поверхности пластины (рис. 2,б, вставка).

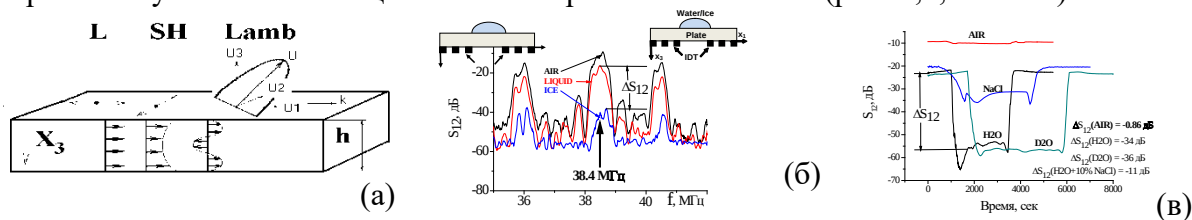


Рис. 2. Датчик оледенения на АВП: а – поляризация волн, б – АЧХ волн при разных нагрузках, в – отклики моды 38.4 МГц при льдообразовании для различных жидкостей.

Для измерения использовалась волна ($f = 38.4$ МГц, $\lambda = 200$ мкм) в пластине YZ- LiNbO_3 $h = 500$ мкм. При охлаждении H_2O , NaCl и D_2O от $+20$ до -5°C величина вносимых потерь линии задержки S_{21} остается неизменной (рис.2,в). При -5°C (H_2O), -8°C (NaCl) и -11°C (D_2O) происходит резкое увеличение S_{21} . Величина дополнительных потерь ΔS_{12} , связанная с льдообразованием, составляет 36, 34 и 11 дБ для D_2O , H_2O и NaCl соответственно.

Работа выполнена при поддержке Госзадания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

1. Anisimkin V., Kolesov V., Kuznetsova A. et al. // *Sensors*, V.21, P.919 (2021).

2. Smirnov A., Anisimkin V., Voronova N. et al. // *Sensors*, V.24, P.414 (2024).



ОСОБЕННОСТИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni-Mn-In ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК

Кузнецов Д.Д.¹, Маширов А.В.¹, Кузнецова Е.И.², Прокунин А.В.¹,
Данилов Д.В.³, Мусабилов И.И.⁴, Коледов В.В.¹

¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

²ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

³МРЦ по направлению «Нанотехнологии», Научный парк, СПбГУ, г. Санкт-Петербург

⁴Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

kuznetsov.dmitry89@gmail.com

Результаты исследования показывают, что закалка от температуры, превышающей температуру упорядочения $B2 \rightarrow L2_1$, увеличивает скрытую теплоту мартенситного превращения по сравнению с медленно охлажденным сплавом, тем самым потенциально повышая значение магнитокалорического эффекта. Было обнаружено, что скорость охлаждения влияет как на температуру Кюри (ниже для закаленного сплава, чем для медленно охлажденного), так и на температуры прямого и обратного мартенситного превращения. Однако ширина гистерезиса остается практически неизменной для исследованных термообработок. После закалки и медленного охлаждения тонкая структура аустенита в нестехиометрическом сплаве Ni-Mn-In представляет собой смесь твердых растворов ($B2 + L2_1$) в различных пропорциях. Первичные дифракционные пятна эффективно индексируются кубической ячейкой с параметром решетки $a = 5,99 \text{ \AA}$ для $L2_1$. Оба сплава претерпевают мартенситное превращение из аустенита в модулированные структуры 10М и 14М. Ускорение скорости охлаждения сплавов системы Ni-Mn-In (с $\text{In } 10 < x \leq 16\%$) от температуры выше температуры упорядочения $B2 \rightarrow L2_1$ приводит к подавлению распада твердого раствора аустенита и, как следствие, увеличению плотности АФГ. Закаленный сплав оставался в аустенитно-мартенситном ($L2_1/B2 + 10 \text{ М}$ или 14 М) состоянии до температуры 120 К. Более полное атомное упорядочение структуры по типу $L2_1$ в медленно охлажденном сплаве привело к уменьшению плотности АФГ и появлению области температур перехода (150–120 К) с двухступенчатым превращением $L2_1/B2 \rightarrow 10 \text{ М} \rightarrow 14 \text{ М}$ [1, 2].

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2024-0007).

1. Kuznetsov D.D. et al. // *Nanomaterials*, V.13, №8, P.1385 (2023).

2. Kuznetsov D. et al. // *Journal of Composites Science*, V.7, №12, P.514 (2023).



ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОКАЛОРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Морозов Е.В., Карпунин Д.А., Коледов В.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

evgvmorozov@gmail.com

На сегодняшний день вопрос создания и исследования функциональных материалов имеет очень важное значение в науке и технике. В докладе представлен обзор современных работ в области поиска материалов для создания твердотельных альтернативных энергетических систем с использованием эластокалорического эффекта (ЭКЭ), который возникает в материалах с эффектом памяти формы за счет структурного фазового перехода, вызванного внешним механическим напряжением. Предлагаемые твердотельные эластокалорические системы охлаждения являются основой высокоэффективной, экологичной и менее энергоемкой технологии для применения в фармацевтике, приборостроении и других областях [1-3].

Для создания твердотельных охлаждающих систем важными параметрами являются: максимальная величина ЭКЭ (ΔT) в материале под действием внешнего механического напряжения (σ), изменение энтропии (ΔS), максимальная частота термодинамических циклов в системе (f), максимальная удельная мощность рабочего тела с ЭКЭ (W). Наилучшие на сегодняшний день достигнутые в мировой литературе значения этих параметров: максимальный ЭКЭ наблюдается в сплаве $(\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{31.5}\text{Ti}_{18.5})_{99.8}\text{B}_{0.2}$, $\Delta T = 31,5$ К при напряжении $\sigma = 700$ МПа; рекордное изменение энтропии наблюдается в сплаве $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{44}\text{Cu}_5\text{Al}_1$, $\Delta S = 53,5$ Дж/(кг·К), но при этом максимальный ЭКЭ составляет $\Delta T = 25$ К при механическом напряжении $\sigma = 700$ МПа. Наибольшее значение максимальной частоты циклов $f = 50$ Гц и удельной мощности $W = 150$ кВт/кг для рабочего тела с ЭКЭ в виде быстрозакаленной ленты Ti_2NiCu продемонстрированы в [3]. С 2010 года было представлено множество прототипов систем охлаждения на основе ЭКЭ. Разница температур между холодным и горячим резервуарами не превышает 20 К при частоте теплопередачи 0,5 Гц [4], а частота теплопередачи от холодного к горячему резервуару не превышает 4 Гц [5] при ЭКЭ 8 К и удельной мощности 18 Вт/г. В статье [6] 2022 года описан прототип холодильной системы на основе проволоки Ni-Ti. Адиабатическое изменение температуры составляет 6,6 К при деформации 4,8%. Предлагаемый холодильник может вырабатывать температурный диапазон до 9,2 К и имеет мощность охлаждения до 3,1 Вт. В докладе приводится сравнение различных схем твердотельных холодильников на основе ЭКЭ, включая предложенную авторами схему «теплового сепаратора» [7].

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2024-0007).

1. Chen J., Lei L., Fang G. // *Mater. Today Commun.*, V.28, P.102706 (2021).
2. Wang, S., Shi, Y., Li, Y. et al. // *Renew. Sustain. Energy Rev.*, V.187, P.113762 (2023).
3. Morozov E.V., Fedotov S.Yu., Petrov A.V. et al. // *PhSS.*, V.62, №6, P.972-975 (2020).
4. Tušek J., Engelbrecht K., Eriksen D. et al. // *Nature Energy*, V.1, №10, P.16134 (2016).
5. Frenzel J., Eggeler G., Quandt E. et al. // *MRS Bulletin*, V.43, № 4, P.280-284 (2018).
6. Chen Y., Wang Y., Sun W. et al. // *The Innovation*, V.3, P.2 (2022).
7. Морозов Е.В., Коледов В.В., Семёнов Д.С. и др. // *Известия РАН. Сер. Физическая*, Т.81, №11, С.1542-1545 (2017).



ПАЙЕРЛСОВСКИЙ ПЕРЕХОД В КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПРОВОДНИКАХ: ПОЧЕМУ ЭТО ИНТЕРЕСНО И АКТУАЛЬНО

Покровский В.Я.

ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва
vadim.pokrovskiy@mail.ru

Взлёт интереса к пайерловскому переходу пришёлся на середину 1980-х годов, когда научились синтезировать квазиодномерные проводники, такие как NbSe_3 , TaS_3 и $\text{K}_{0.3}\text{MoO}_3$. В этих соединениях реализуется идея Пайерлса, известная ещё с довоенных времён: ниже температуры перехода T_p возникает самосогласованное периодическое искажение решётки и модуляция электронной плотности, характеризуемые волновым вектором с продольной компонентой $q=2k_F$, где k_F – фермиевский импульс электронов. При этом на уровне Ферми образуется диэлектрическая щель 2Δ . Такое состояние вещества получило название волны зарядовой плотности (ВЗП). В трёхмерном представлении образование ВЗП можно описать как наложение друг на друга поверхностей Ферми – плоскостей $k=k_F$ и $k=-k_F$. Взаимодействие между цепочками приводит к гофрировке поверхностей, и $\mathbf{q}$ -вектор определяется условием их оптимального совмещения – нестинга. В общем случае ВЗП несоизмерима с решёткой кристалла и может переносить ток за счёт скольжения в полях выше порогового.

Точно задача о пайерловском переходе решается лишь в приближении сильной связи для случая двукратной соизмеримости ВЗП с основной решёткой. Его описание формально идентично теории БКШ. В частности, предсказывается отношение $\Delta/T_p=1.76$. Подход к ВЗП в духе БКШ применяют и в общем случае, однако при этом возникает ряд затруднений.

Наиболее явное – высокое отношение Δ/T_p , то есть, низкая T_p . К понижению T_p могут приводить как недостаточная, так и слишком высокая степень одномерности. В последнем случае T_p понижается из-за одномерных флуктуаций. Усложняется ситуация и в случае сосуществования нескольких ВЗП, в частности из-за их взаимодействия.

В докладе будет сделан краткий обзор наших работ в области экспериментального исследования и описания пайерловского перехода. Показано, что в условиях высоких флуктуаций поведение различных параметров вблизи T_p описывается моделью термически активированного проскальзывания фазы ВЗП. При этом переход обретает некоторые черты перехода I рода. Одна из первых работ на эту тему была представлена на Сессии НТ-90 в Донецке [1], но и позже мы неоднократно возвращались к этой модели.

Со временем число соединений с ВЗП росло. В частности, были получены условия роста различных полиморфов NbS_3 . В моноклинной фазе NbS_3 наблюдаются три ВЗП, которые могут скользить в электрическом поле. Две из них имеют рекордные значения T_p – 360 К и 460 К. Их $\mathbf{q}$ -векторы определяются из условий нестинга нескольких участков поверхности Ферми. Значения $\mathbf{q}$ -векторов поддаются достаточно точному расчёту исходя из оптимизации нестинга [2]. Однако наши недавние структурные исследования на синхротроне показали [3], что одна из ВЗП подстраивается под другую, что делает картину ещё более богатой. В докладе мы также обсудим, как деформация образца может привести к выводу одной из ВЗП из «подчинения» другой, что проявится в виде фазового перехода I рода.

Таким образом, исследования ВЗП актуальны и в наши дни, что во многом связано с исключительно высокими температурами их формирования и уникальными свойствами, которые ранее можно было наблюдать только при криогенных температурах.

1. Зайцев-Зотов С.В., Покровский В.Я. // Тезисы XXVI Всесоюзной сессии по физике низких температур, Донецк, 1990, часть 3, с. 100-101.
2. Conejeros S., Guster B., Alemany P. et al. // Chem. Mater. V.33, P. 5449 (2021).
3. Покровский В.Я., Васильев А.Л., Болотина Н.Б. и др. // Письма ЖЭТФ, T.121, C.412-418 (2025).



РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ РАВНОВЕСНОЙ И НЕРАВНОВЕСНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО И ДИСКРЕТНОГО ТИПОВ

Соболь О.В., Покинтелица Е.А.

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка
o.v.sobol@donnasa.ru

Как известно, равновесные диаграммы состояния строят в основном методами термического анализа при достаточно медленных скоростях охлаждения. В данном случае за счет диффузионных процессов молекулы из жидкой фазы успевают встраиваться в твердую фазу. В результате система сохраняется равновесной. Однако даже при нормальных скоростях охлаждения ($\sim 0,001-1,0$ К/с), как правило, кристаллизация наступает после достижения определенного переохлаждения как относительно температур ликвидус ΔT_L^- , так и относительно температур солидус ΔT_S^- . С учетом переохлаждений строят т.н. неравновесные диаграммы состояния. Кроме этого, хорошо известно явление «раздвоения» тепловых эффектов: эндоэффектов при плавлении и экзоэффектов при затвердевании. Эти эффекты свидетельствуют о том, что указанные фазовые переходы не всегда имеют непрерывный характер даже при равновесной кристаллизации без переохлаждения. На рис. 1 приведены разнообразные варианты записей кривых охлаждения сплавов с подобными эффектами, получаемые методом циклического термического анализа (ЦТА) и дифференциального термического анализа (ДТА).

Кривая охлаждения I характеризует процесс равновесной кристаллизации с непрерывным экзотермическим эффектом тепловыделения по направлению $b \rightarrow d \rightarrow d_1$. Кривые II и III отражают равновесную кристаллизацию сплавов с дискретным характером эндоэффектов. Термограммы IV – VI получаются при неравновесной кристаллизации относительно температуры ликвидус и равновесной кристаллизации относительно температуры солидус (т.е. при эвтектической температуре T_E). При этом термограммы IV – VI отражают «взрывной» характер кристаллизации, о чем свидетельствует быстрый подъем температуры от точки c до точки b (или b'). Термограмма III свидетельствует о «невзрывном» типе кристаллизации от точки c до точки M. Следующие три термограммы VII – IX записываются при различных видах кристаллизации относительно температур ликвидус и кристаллизации «взрывного» типа относительно температур солидус.

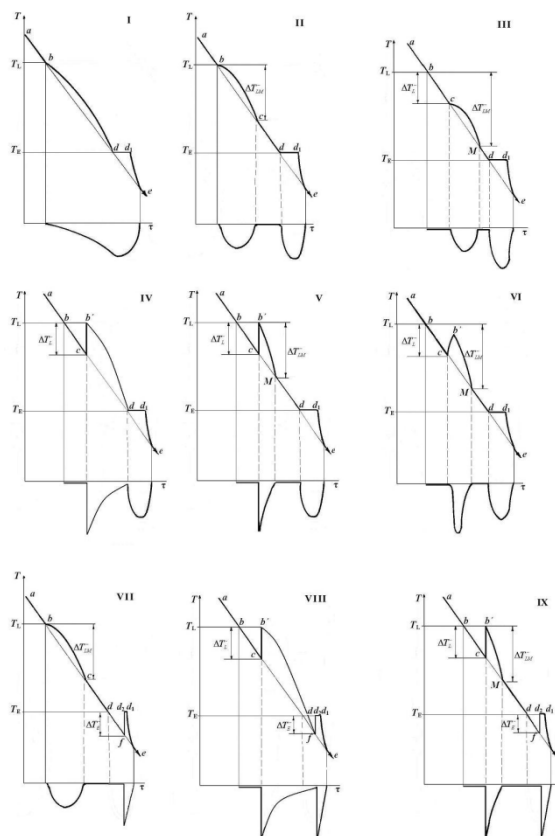


Рис.1. Кривые охлаждения, отражающие различные виды равновесной и неравновесной кристаллизации непрерывного и дискретного типов.



ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛЕЗО-МАРГАНЦЕВЫХ ГЕРМАНИДОВ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО ГАММА-РЕЗОНАНСА

Гурбанович А.В.¹, Митюк В.И.¹, Ткаченко Т.М.², Барайшук С.М.², Головчан А.В.³,
Вальков В.И.³, Аникеев С.Г.⁴

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь

³Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

⁴Томский Государственный Университет, г. Томск

gurbanovic@gmail.com

Цель данной работы – получение информации, позволяющей выяснить механизмы формирования магнитоструктурных фаз и их роль в возникновении гигантской магнитострикции в системе $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{NiGe}$. Для реализации поставленной цели методом реакции в смешанной фазе были синтезированы поликристаллические твердые растворы $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{NiGe}$, существование которых оказалось ограничено областью $0,05 \leq x \leq 1,00$. Особенности кристаллического упорядочения и магнитных свойств изучены с применением рентгенографии, магнитными измерениями и методом мессбауэровской спектроскопии [1].

По результатам магнитных измерений, все исследованные растворы уже при азотной температуре 77 К проявляют магнитные свойства. Данные, полученные при этой же температуре, не обнаруживают магнитных взаимодействий вплоть до содержания железа $x=0,20$. Такие результаты можно объяснить с учетом особенностей структуры типа B8 (NiAs и Ni_2In), а именно наличия двух типов позиций, которые могут занимать атомы металлов, – октаэдрические MeI и тригонально-бипирамидальные MeII. Мы предполагаем, что атомы Mn в подрешетке MeI, определяющие магнитные взаимодействия в сплаве в целом, не замещаются атомами железа при малых его концентрациях x . То есть до состава $x=0,20$ атомы железа входят в подрешетку атомов никеля MeII. Исходя из известного факта возможной высокой дефектности структуры типа B8, появляющийся при таком замещении дефицит атомов марганца в позициях MeI компенсируется образованием вакансий в этой подрешетке, что находит подтверждение в возрастании величины квадрупольного расщепления мессбауэровского спектра. Магнитное сверхтонкое взаимодействие атомов железа в подрешетке MeII блокируется атомами никеля, находящимися в ближайшем локальном окружении резонансного атома Fe. Это отражается в наблюдаемой форме мессбауэровского спектра, а именно - в отсутствии магнитного расщепления спектров при 77 К при таких концентрациях железа. Наши предположения не противоречат литературным данным об отсутствии магнитных моментов на атомах никеля в подрешетке Me II [2]. Магнитные атомы железа и марганца, перейдя в подрешетку Me II, перестают участвовать в магнитном взаимодействии, тем самым несколько снижая общую намагниченность сплава, что подтверждается полученными нами данными магнитных измерений.

В работе показано, что в четырехкомпонентных твердых растворах $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{NiGe}$ при $x < 0,20$ железо преимущественно попадает в подрешетку атомов никеля в позициях MeII и в магнитных взаимодействиях не участвует. Этот факт отражается и на снижении величины намагниченности по данным магнитных измерений. С ростом x железо в составе $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{NiGe}$ замещает марганец в позициях Me I.

1. Mitsiuk V.I., Tkachenko T.M., et al. // *J. of Phys. and Chem. of Solids*, V. 182, P.111600 (2023).

2. Szytula A. et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, V. 25, P.176-186 (1981).



УДК 535.3; 537.632

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В БИГИРОТРОПНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ

Дадоевкова Н.Н.¹, Паняев И.С.², Дадоевкова Ю.С.³, Глухов И.А.², Санников Д.Г.²¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк²ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск³Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France

dadoenkova@yahoo.com

Фотонные системы со сложной структурой элементарной ячейки на основе фрагментов различных двухкомпонентных фотонных кристаллов (ФК) представляют особый интерес для создания ФК с заданными характеристиками [1,2]. Особенно перспективными являются ФК на основе магнитооптических материалов, что позволяет управлять состоянием поляризации или интенсивностью электромагнитного излучения, взаимодействующего с этой структурой.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование эффекта Фарадея в одномерных трёхпериодических магнитных ФК на основе диэлектриков SiO_2 , TiO_2 и бигиротропных ферритов-гранатов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) и Bi:YIG . Получены спектры пропускания электромагнитных волн (ЭМВ) ближнего ИК-диапазона, проходящих сквозь трёхпериодический ФК вида $[(\text{SY})^3(\text{TB})^5]^7$, где S, T, Y и B обозначают соответственно слои следующих материалов: SiO_2 , TiO_2 и ферритов-гранатов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) и Bi:YIG . Сверхъячейка такого ФК состоит из фрагментов двух магнитных ФК с периодами $D_1 = d_S + d_Y$ и $D_2 = d_T + d_B$ и толщинами ND_1 и ND_2 соответственно (рис.1,a). Толщина всего ФК равна $K(ND_1 + ND_2)$.

Толщины слоёв выбираются в соответствии с условиями Брэгга для $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ [1,2]. Все феррит-гранатовые слои намагничены вдоль оси z перпендикулярно границам раздела сред (полярная магнитооптическая конфигурация). Плоская ЭМВ частотой ω и волновым вектором k^i (s- или р-поляризованная) падает под углом θ на поверхность ФК (рис.1,b).

Расчёты частотно-угловых зависимостей коэффициентов пропускания и углов фарадеевского вращения (ФВ) для ФК $[(\text{SY})^3(\text{TB})^5]^7$ выполнены в пределах первой ЗФЗ в волновом диапазоне внутризонной полосы пропускания в окрестности телекоммуникационной длины волны $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$. Рассмотрены также аналогичные ФК-структуры с иными сочетаниями выбранных материалов в подъячейках $[(\text{ST})^3(\text{YB})^5]^7$, $[(\text{SB})^3(\text{TY})^5]^7$, проведено сравнение результатов.

Показано, что при выборе толщин диэлектрических слоёв d_S и d_T , равных брэгговским толщинам при $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, а магнитных слоёв - утроенным значениям соответствующих им брэгговских толщин, углы ФВ могут достигать десятков градусов при достаточно высоких значениях коэффициентов пропускания, что может быть перспективно для применения в различных фотонных устройствах.

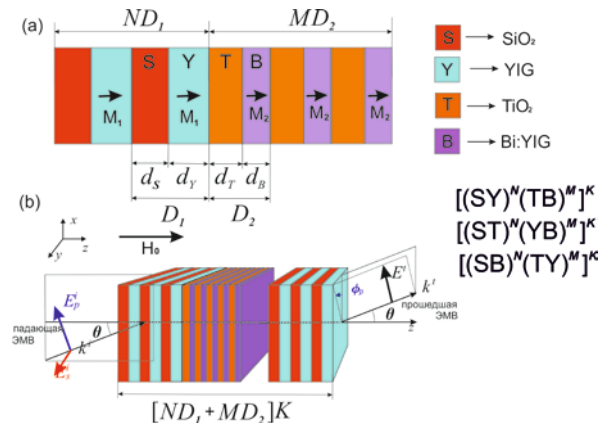


Рис.1. Сверхъячейка $(\text{SY})^2(\text{TB})^3$ (a); эффект Фарадея в трёхпериодическом ФК $[(\text{SY})^3(\text{TB})^5]^K$ (b).

1. Panyayev I.S., Sannikov D.G., Dadoenkova Y.S., et al. // *IEEE Sensors Journal*, V.22, №23, P.22428–22437 (2022).
2. Panyayev I.S., Sannikov D.G., Dadoenkova N.N., et al. // *Applied Optics*, V. 60, №7, P.1943–1952 (2021).



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ФЕРРОЗОНДОВОГО МАГНИТОМЕТРА

Добрыднеев А.В., Безкоровайный В.С.

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск

mushroomrace@yandex.ru

Предлагаются к рассмотрению результаты исследования влияния активно-емкостной нагрузки на выходной сигнал феррозондового магнитометра при однополярном импульсном возбуждении [1]. Феррозондовый магнитометр использует принцип изменения магнитных свойств материала под воздействием внешнего магнитного поля, предоставляя точные данные о магнитных полях исследуемого объекта. Феррозондовый магнитометр является ключевым инструментом для измерения магнитных полей в различных областях науки и техники. Точность и стабильность магнитометра зависят от множества факторов, влияющих на выходной сигнал, в том числе и от подключенной активно-емкостной нагрузки.

Проведенные исследования показали изменения формы выходного сигнала и амплитуды при варьировании активно-емкостной нагрузки, что свидетельствует о наличии процессов, искажающих форму сигнала и оказывающих значительное влияние на точность и стабильность измерений [2].

Существует несколько видов форм сигнала феррозондового датчика, при разной активно-емкостной нагрузке, подключаемой к его выходной обмотке.

Например, при активной нагрузке, равной (1), форма выходного сигнала приобретает колебательный вид, показанный на рис. 1,а:

$$r_H > 0,5 \sqrt{\frac{L_2}{C_H}}. \quad (1)$$

При активной нагрузке, равной (2), форма выходного сигнала приобретает аperiодический вид с обратным выбросом, показанный на рис. 1,б:

$$r_H = 0,5 \sqrt{\frac{L_2}{C_H}}. \quad (2)$$

При активной нагрузке, равной (3), форма выходного сигнала приобретает аperiодический вид, показанный на рис. 1,в:

$$r_H < 0,5 \sqrt{\frac{L_2}{C_H}}. \quad (3)$$

Данные исследования позволяют определить различные формы выходного сигнала при активно-емкостной нагрузке. В ходе исследований было определено, что необходимо выбирать такую активно-емкостную нагрузку датчика, при которой выходной сигнал будет аperiодическим.

1. Безкоровайный В.С., Тарасенко О.В., Яковенко В.В., Ивженко А.А. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля, № 4(10), С. 159-166 (2018).

2. Половинка О.Д., Ильинский Д.И., Безкоровайный В.С. // Студенческие научные исследования: сборник статей XXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 ноября 2024 года. С. 24-26(2024).

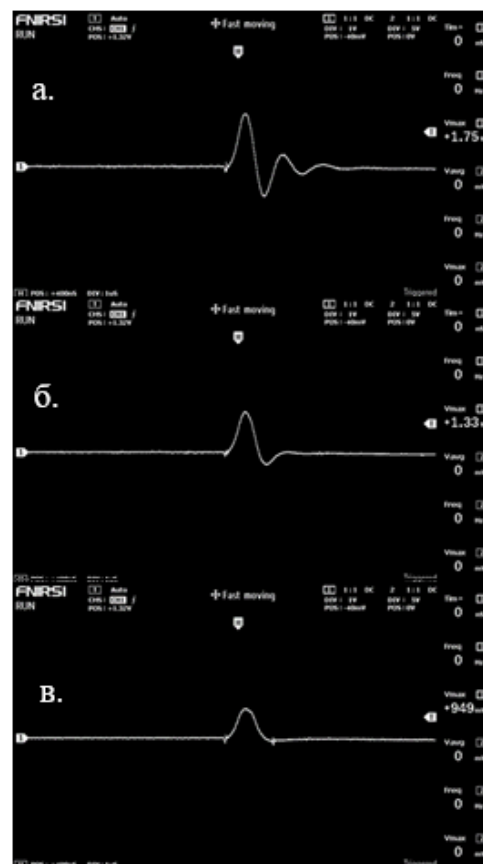


Рис.1. Форма выходного сигнала феррозонда



РАВНОВЕСНАЯ ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА В ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА СО СЛАБОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Драгунов И.Е.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
i_dragun60@mail.ru

Интенсивное исследование магнитных свойств пленок смешанных редкоземельных ферритов-гранатов, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, было связано в первую очередь с перспективой их использования для создания памяти на основе цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) [1]. В этих материалах удавалось реализовывать достаточно большое поле H_c наведенной перпендикулярной магнитной анизотропии, что приводило к высоким значениям фактора качества Q и улучшало характеристики пленок с ЦМД ($Q = H_c / 4\pi M_0$, M_0 – намагниченность насыщения).

Пленки на основе чистых железоиттриевых гранатов (ЖИГ) с низкой магнитной анизотропией использовались в основном для СВЧ-применений. Эти пленки имеют анизотропию, близкую к легкоплоскостному типу, что приводит к отклонению вектора намагниченности $\mathbf{M}$ от плоскости поверхности пленки на небольшой угол θ_0 . Практическое применение пленок ЖИГ связано с использованием их в сенсорных устройствах для визуализации распределения неравномерностей магнитного поля и магнитометрии сверхнизких полей [2,3]. Кроме того, пленки ЖИГ стали интенсивно применяться в медицине. Недавно [4] на основе пленок ЖИГ разработан новый тип датчика, применяемый в магнитоэнцефалографии. Его эффективность была продемонстрирована в экспериментах по регистрации альфа-ритмов. Все это однозначно говорит об актуальности магнитных исследований пленок ЖИГ.

Для расчета равновесных параметров полосовой доменной структуры (ПДС) в пленках ЖИГ со слабой анизотропией ($Q < 1$) используется простая модель, в рамках которой плотность магнитной энергии состоит из суммы плотностей энергий магнитной анизотропии, магнитостатической и доменных границ. Минимизация плотности магнитной энергии приводит к системе нелинейных уравнений для равновесных значений периода доменной структуры и угла θ_0 . В эту систему уравнений в качестве материальных параметров входят фактор качества Q и характеристическая длина образца l_0 . В переменных $Q - h$ рассчитана фазовая диаграмма, задающая линию критических значений h_c толщин пленки h , при которых существует ПДС. Выше этой линии существуют отличные от нуля значения угла θ_0 и, следовательно, существует ПДС. Ниже этой линии возможно только состояние однородной намагниченности.

В случае периодов доменов, больших по сравнению с толщиной пленки, получено аналитическое выражение для зависимости периода доменов от толщины пленки. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер. Рассчитаны и построены кривые намагничивания $\mathbf{M}$ как функции толщины пленки при различных значениях фактора качества Q . Эти кривые демонстрируют уменьшение критической толщины пленки с увеличением Q . Такая же тенденция наблюдается и для критических углов θ_0 .

Рассмотренная модель позволяет проводить детальный анализ процессов намагничивания в тонких ферромагнитных пленках, а также вычислять равновесные параметры полосовых доменных структур.

1. Бобек Э, Дела Торе Э. Цилиндрические магнитные домены, М: Энергия, 1977, 197 с.
2. Koblischka M.R., Wijngaarden R.J. // *Supercond. Sci. Technol*, 8, 199 (1995).
3. Skidchenko E., Butorina A., Ostras M., et. al. // *Sensors*, 23, 4256, (2023).
4. Николаенко Ю.М., Мухин А.Б., Мезин Н.И. // *ФТВД*, Т.33, №1, С.86 (2023).

СМЕЩЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУР МЕТАМАГНИТОСТРУКТУРНОГО
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ОБОГАЩЁННОМ НИКЕЛЕМ СПЛАВЕ ГЕЙСЛЕРА $\text{Ni}_{57.2}\text{Mn}_{31.6}\text{In}_{11.2}$

**Ковалёв О.Е.¹, Головчан А.В.¹, Беличко Д.Р.¹, Нырков Н.Ю.¹, Шевелёва А.В.¹,
Сафонов Р.А.¹, Маширов А.В.², Митюк В.И.³**

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

³НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь

oleg_kovalev_2018@mail.ru

В данной работе исследуются фазовые переходы в обогащённом никелем сплаве Гейслера $\text{Ni}_{57.2}\text{Mn}_{31.6}\text{In}_{11.2}$. В данном сплаве наблюдается «слившийся» метамгнитоструктурный фазовый переход (ММСФП), в котором температура Кюри аустенитной фазы расположена близко к температурам мартенситного перехода. Это, в свою очередь, влияет на характер фазовых превращений. При увеличении магнитного поля от 0 до 1 Тл наблюдается смещение характерных температур ММСФП с положительным коэффициентом чувствительности (k) к магнитному полю. В полях свыше 1 Тл знак k меняется. Так, например, температура начала мартенситного превращения при приложении магнитного поля увеличивается на значение $k_{Ms} = 13$ К/Тл в магнитных полях от 0 до 1 Тл и уменьшается на $k_{Ms} = -0.8$ К/Тл от 1 до 13 Тл (по данным интерполяции рис. 1).

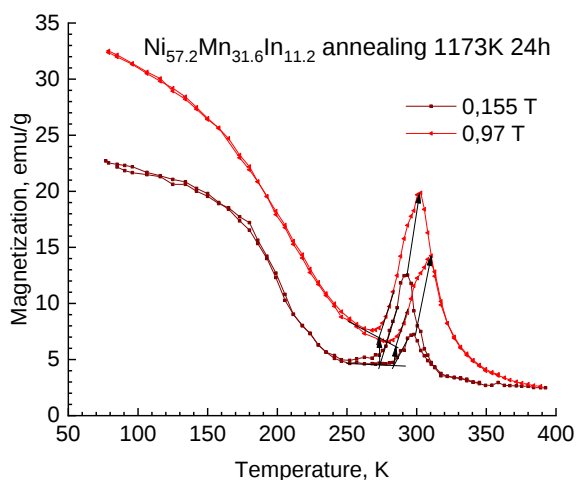


Рис. 1. Значение намагниченности образца $\text{Ni}_{57.2}\text{Mn}_{31.6}\text{In}_{11.2}$ в магнитных полях 0.155 и 0.97 Тл в зависимости от температуры.

легированным кобальтом [4]. Значение коэффициента чувствительности обогащенного никелем образца сопоставимо с медленно охлажденными образцами, которые претерпевают слившийся ММСФП.

Согласно данным литературы, в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34.5}\text{In}_{15.5}$ [1] по EDX-анализу с отдельным ММСФП $k_{Ms} = 10$ К/Тл в магнитных полях от 0 до 1 Тл и $k_{Ms} = -3 \div -6$ К/Тл от 1 до 12 Тл. В работе [2] в сплаве $\text{Ni}_{50.3}\text{Mn}_{33.8}\text{In}_{15.9}$ с отдельным ММСФП при $M_s = 210$ К $k_{Ms} = -11$ К/Тл от 1 до 12 Тл. В работе [3] в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34.5}\text{In}_{15.5}$ по EDX-анализу в медленно охлажденном со слившимся ММСФП $k_{Ms} = 10$ К/Тл в магнитных полях от 0 до 1 Тл и $k_{Ms} = -3 \div -6$ К/Тл от 1 до 13 Тл. В работе [3] в сплаве $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34.5}\text{In}_{15.5}$ по EDX-анализу в закаленном со слившимся ММСФП $k_{Ms} = 6.6$ К/Тл в магнитных полях от 0 до 1 Тл и $k_{Ms} = -3 \div -6$ К/Тл от 1 до 13 Тл. Поведение с переменной знака смещения характерных температур присуще также и соединениям Ni-Mn-In,

1. Chernenko V.A., Cesari E., Salas D., Lazpita P. et al. // *Appl. Phys. Lett.*, V.102, P.071904 (2013).
2. Krenke Th., Duman E., Acet M. et al. // *Phys. Rev. B*, V.75, P.104414 (2007).
3. Barandiaran J.M., Chernenko V.A., Cesari E., Salas D., Gutierrez J., Lazpita P. // *J. Phys.: Condens. Matter*, V.25, P.484005 (2013).
4. Recarte V., Pérez-Landazábal J.I., Kustov S., Cesari E. // *J. Appl. Phys.*, V.107, P.053501 (2010).



УДК 538.91

ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ: ПРИРОДА ЯВЛЕНИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ПРИМЕНЕНИЯ

Коледов В.В.¹, Вальков В.И.², Ветошко П.М.¹, Шавров В.Г.¹, Суслов Д.А.¹, Пойманов В.Д.^{3,4}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

⁴ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН, г. Москва

victor_koledov@mail.ru

Поиск новых твердотельных материалов, проявляющих сильные эффекты изменения формы и энтропии под действием физических полей нацелен на обнаружение новых физических эффектов и на создание прорывных технологий в областях сенсорики, спинтроники, микросистемной техники, калоритроники и др. Наибольшие эффекты изменения свойств наблюдаются вблизи фазовых переходов (ФП), это касается калорических эффектов (магнито-, электро-, эластокалорического эффектов), эффекта памяти формы и др. В материалах, в которых протекают не один, а два и более ФП, вследствие взаимодействия подсистем могут иметь место эффекты взаимного влияния ФП. Взаимодействие ФП может приводить к максимальной величине функциональных свойств. Например, в интерметаллических сплавах Гейслера Ni_2MnGa вследствие взаимодействия упругой и магнитной подсистем наблюдается сильное взаимное влияние магнитного перехода 2-го рода (точка Кюри) и термоупругого мартенситного перехода. В результате, подбирая концентрации компонентов в составе интерметаллида, можно добиться сближения и слияния структурного мартенситного и магнитного фазовых переходов в единый магнитоструктурный ФП 1-го рода [1]. Слияние ФП может приводить к усилению эффектов и к повышению чувствительности к полю, как это, например, наблюдается при магнитоструктурном ФП в соединении MnAs , в котором гигантский магнитокалорический эффект (МКЭ) в изотермическом режиме имеет рекордное для твердотельных материалов значение [2].

В [3] при изучении сплава Гейслера $\text{Ni}_{2.07}\text{Co}_{0.09}\text{Mn}_{0.84}\text{Ga}$ с мартенситным и магнитным ФП, которые наблюдаются при близких температурах, был обнаружен неожиданный эффект сильной частотной зависимости МКЭ. Исследование динамики намагниченности вблизи точки ФП в настоящее время очень актуально, так как с фундаментальной точки зрения вопрос не может быть решен в рамках традиционного подхода на основе уравнения Ландау-Лифшица из-за того, что модуль вектора намагниченности не является постоянной величиной вблизи ФП. С прикладной точки зрения динамика изменения намагниченности и энтропии материала в переменном или импульсном поле чрезвычайно важна, так как она определяет быстродействие актюатора или мощность твердотельной тепловой машины, на его основе. Явление взаимодействия ФП наблюдается также в диэлектрических материалах. Недавно на основе результатов экспериментальных исследований поведения магнитных фаз частично замещенных редкоземельных ферритов гранатов $(\text{BiYLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ и $(\text{BiGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ вблизи точки магнитной компенсации в сильных магнитных полях предложена феноменологическая модель, включающая выражения для свободной энергии фаз ферримагнетика в зависимости от внешнего магнитного поля H и температуры T [4]. Расчет по модели объясняет особенности фазовой T – H -диаграммы и поведение неколлинеарной фазы на основе учета парапроцесса, то есть взаимовлияния спин-переориентационного ФП и точки Кюри.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2024-0007).

1. Vasil'ev, A. N., Bozhko, A. D. et al. // *Phys. Rev. B*, V.59, №2, P.1113 (1999).

2. Koshkid'ko, Y. S., Valkov V.I. et al. // *J.Alloys.Comp.*, V.798, P.810 (2019).

3. Aliev, A. M., Batdalov A.B.// *J. Alloys.Comp.*, V.676, P.601 (2016).

4. Суслов Д.А., Шавров В.Г. и др. // *Журнал радиоэлектроники*. № 11, С. 12. (2024).



ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА ДЕБАЯ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ DyNi₂

Кузнецов А.С., Маширов А.В., Колесов К.А.

ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» РАН, г. Москва
kuznetsovalserg@gmail.com

Одним из наиболее полезных инструментов исследования магнитных свойств твердых тел и, в частности, соединений на основе редкоземельных элементов являются измерения теплоемкости.

В настоящей работе проведены исследования термодинамических и магнитных свойств поликристаллических образцов бинарного интерметаллического соединения DyNi₂.

Поликристаллические образцы DyNi₂ были синтезированы методом дуговой плавки в атмосфере аргона, как было описано ранее в [1]. Измерения теплоемкости выполнены на универсальной установке для измерения физических свойств PPMS-9T Quantum Design при криогенных температурах в диапазоне температур от 5 К до 70 К без приложения внешнего магнитного поля. Проведение измерений осуществлялось в режиме охлаждения.

По результатам измерений (рис. 1) обнаружена λ -аномалия, возникающая при температуре $T_C = 20$ К, что соответствует магнитному фазовому переходу (ФП) из парамагнитного (ПМ) состояния в ферромагнитное (ФМ) упорядочение и характерно для ФП 2-го рода [2]. Используя результаты измерений $C_p(T)$ количественно определены электрон-фононный $C_{el+ph}(T)$ и магнитный $C_{mag}(T)$ вклады в полную теплоемкость металлической системы. Электрон-фононный вклад в теплоемкость определялся линейной комбинацией функций Дебая и Зоммерфельда:

$$C_{el+ph} = \gamma T + 9NR \left(\frac{T}{\Theta_D} \right) \int_0^{\Theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx. \quad (1)$$

Коэффициент электронной теплоемкости γ определен путем экстраполяции экспериментальных данных в области $T < 10$ К и составил 35.5 мДж/моль⁻¹·К⁻². Путем аппроксимации уравнением (1) кривой $C_p(T)$ температура Дебая была найдена равной $\Theta = 242$ К, что хорошо согласуется с литературными источниками [3]. С использованием температурного хода кривой $C_{mag}(T)$ определена энтропия магнитной подсистемы S_{mag} , величина которой при насыщении составила 15.6 Дж/моль⁻¹·К⁻¹, что не превышает теоретического максимального значения 23 Дж/моль⁻¹·К⁻¹ во всем диапазоне температур, полученного для ионов Dy³⁺ с величиной полного углового момента $J = 15/2$.

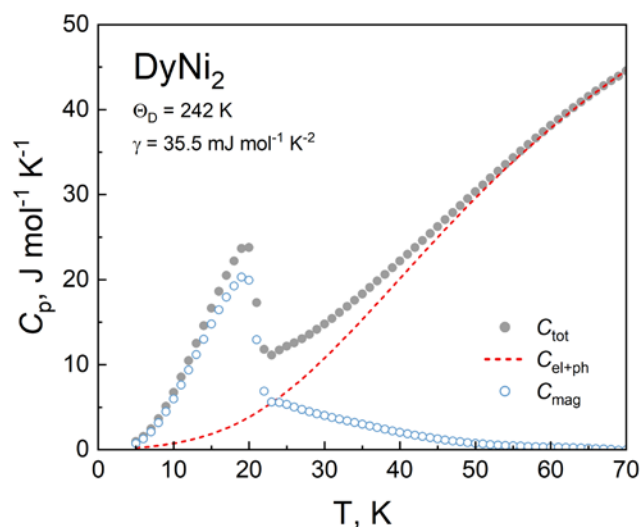


Рис.1. Температурное распределение теплоемкости образцов соединения DyNi₂

1. Кузнецов А.С., Маширов А.В., Алиев А.М. и др. // ФММ. 2022. Т. 123. №4. С.425.
2. Ćwik J., Koshkid'ko Yu.S. et al // Acta Mater. 2017. V. 133. P. 230–239.
3. Ćwik J. et al // J. Alloy. Comp. 2010. V. 506. P. 626–630.

ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Mn}(\text{Co})\text{ZnSb}$ и $\text{Mn}(\text{Ni})\text{ZnSb}$

Гурбанович А.В.¹, Митюк В.И.¹, Барайшук С.М.², Ткаченко Т.М.², Головчан А.В.³,
Вальков В.И.³, Аникеев С.Г.⁴

¹Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Беларусь

³Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

⁴Томский Государственный Университет, г. Томск

gurbanovic@gmail.com

В работе были поставлены задачи синтеза антимонида марганца MnZnSb с замещением марганца на атомы никеля и кобальта, а также исследования магнитных свойств полученных материалов с целью выявления перспектив их практического применения.

В основу технологической методики получения твердых растворов $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{ZnSb}$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Ni}_x\text{ZnSb}$ со структурой типа Cu_2Sb была положена апробированная ранее технология получения изоструктурных твердых растворов на основе Mn_2Sb [1-2], оптимизированная в процессе работы для исследуемых объектов. Образцы получали методом прямого сплавления взятых в необходимых рассчитанных количествах и тщательно перемешанных порошков марганца, кобальта, никеля, цинка и сурьмы.

Рентгенографический анализ показал, что однофазные образцы в пределах тетрагональной фазы типа Cu_2Sb возможны только при незначительном содержании замещающих компонент ~10 ат.%. Более высокие содержания замещающих компонент приводят к появлению на рентгенограмме, соответствующей структуре типа Cu_2Sb , дополнительного малоинтенсивного пика. Таким образом синтезированы твердые растворы $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{ZnSb}$, $0 < x \leq 0.1$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Ni}_x\text{ZnSb}$, $0 < x \leq 0.1$. Проведенные магнитные исследования показали, что частичное замещение марганца на никель и кобальт снижает величину удельной намагниченности образцов.

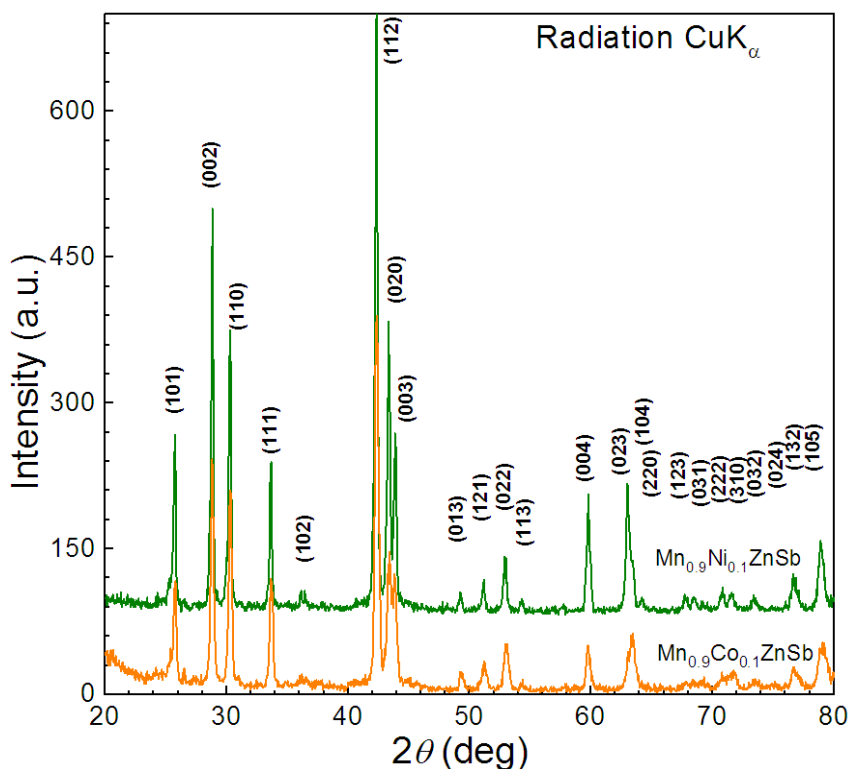


Рис.1. Рентгенограммы твердых растворов $\text{Mn}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{ZnSb}$ и $\text{Mn}_{0.9}\text{Co}_{0.1}\text{ZnSb}$.

1. Ryzhkovskii V.M., Mitsiuk V.I. // *Inorganic Materials*, V. 46, №6, P. 581-586 (2010).

2. Pankratov N.Yu., Mitsiuk V.I., Ryzhkovskii V.M., et al. // *JMMM*, V. 470, P.46-49 (2019).



АНИЗОТРОПНЫЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Мухин А.Б., Николаенко Ю.М., Мезин Н.И., Драгунов И.Е.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

nik@donfti.ru

Анизотропные характеристики, проявляющиеся в процессе намагничивания пленок железоиттриевого граната (ЖИГ), обусловлены конкуренцией энергетических вкладов, связанных с магнитокристаллической и наведенной анизотропиями, а также с магнитодипольным взаимодействием. Последнее можно учесть посредством фактора формы, который обусловлен конечными размерами образца.

В процессе намагничивания пленок в форме диска постоянным внешним полем H происходит постепенный переход от лабиринтной структуры к полосовой и затем к монодоменной [1]. В пленках прямоугольной формы с большим отношением размеров длины к ширине $L/d > 6$ лабиринтная структура не реализуется, а полосовые домены выстраиваются вдоль направления длинной стороны пленки.

Если внешнее магнитное поле (МП), коллинеарное ВЧ-полю h , направлено вдоль длинной стороны пленки (рис. 1), переход к монодоменной структуре происходит путем постепенного роста объема энергетически выгодных доменов за счет невыгодных без изменения направления намагниченности в доменах. Наоборот, если внешнее МП ориентировано перпендикулярно ВЧ-полю, то процесс намагничивания начинается с разворота полосовых доменов вдоль поля. Мы контролируем процесс намагничивания пленки методом автодина, когда пленка используется в качестве сердечника катушки резонансного контура автогенератора. При этом изменение частоты генератора в основном определяется величиной магнитной проницаемости сердечника (пленки) $\mu \sim F^{-2}$. На рис. 2 представлен вид МП-зависимостей магнитной восприимчивости пленки для трех полевых конфигураций, показанных на рис. 1.

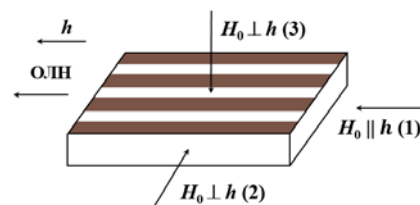


Рис.1. Конфигурация МП

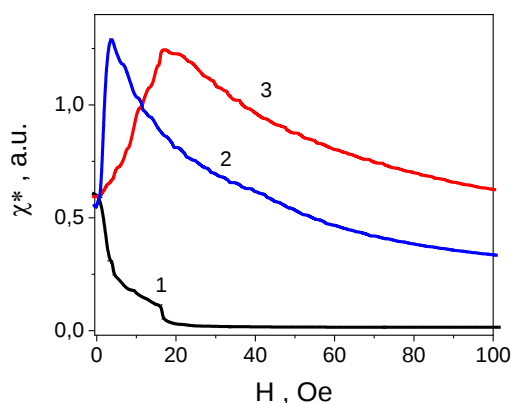


Рис.2. МП-зависимости магнитной восприимчивости

выше, что объясняется формой пленки.

Из данных на рис. 2 видно, что на начальном этапе кривые 2 и 3 с увеличением МП показывают рост магнитной восприимчивости. Такое поведение соответствует процессу поворота доменов на 90° вдоль поля. После достижения максимума восприимчивости на кривых $\chi(H)$ наблюдается процесс, соответствующий формированию монодоменной структуры (состояние насыщения). Причем состояние насыщения достигается в разных внешних магнитных полях в зависимости от конфигурации между H и h . Минимальное значение $H \approx 20$ Ое наблюдается для конфигурации $H \parallel h$. Для случаев $H \perp h$ величина поля насыщения значительно



ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ И РАЗМЕРОВ ПЛЕНКИ ФЕРРИТА-ГРАНАТА НА ЕЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Непочатых Ю.И.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
nero@bk.ru

В результате химического травливания (111)-ориентированной пленки железиттриевого граната (ЖИГ) до толщины менее 0,3 мкм в ней проявляются новые высокочастотные характеристики, которые не обнаруживались в более толстых пленках. Появляются отличия на зависимости восприимчивости от перпендикулярного к плоскости пленки поля, а в нулевом его значении возникает новый большой пик. Предполагаются отличия в магнитной структуре [1]. Изменения формы и размеров в плоскости образца также имеют существенное значение [2].

Влияние ориентации в магнитном поле и размеров пленки феррита-граната на ее высокочастотные характеристики изучено с помощью контроля нескольких параметров автодина, в измерительную катушку которого помещался исследуемый образец [3]. Многопараметровые измерения применены для расширения средств обнаружения возможных эффектов и объяснения их результатов. На рис. 1 приведены зависимости относительных изменений контролируемых величин от внешнего поля, ориентированного по одному из последовательности азимутов в плоскости пленки.

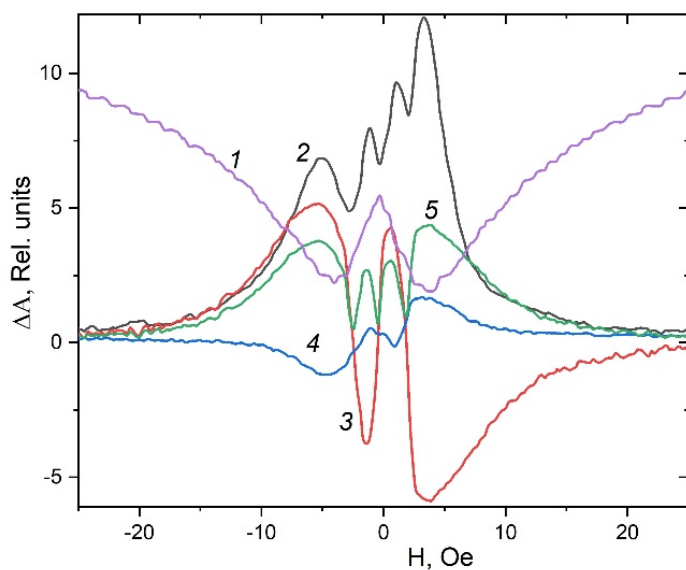


Рис.1. Полевые зависимости частоты ν автодина (4,993 – 5 МГц) (1), суммарной в диапазоне 50 – 3000 Гц глубины модуляции амплитуды автодина (2), компонентов α и β (3,4) и рассчитанного из них модуля комплексной величины синхронного отклика амплитуды автодина (5) на модуляцию (330 Гц) линейно изменяющегося внешнего поля, ориентированного в плоскости пленки ЖИГ толщиной 0,2 мкм

По значениям приведенных кривых рассчитывается поведение восприимчивости, определяется возникновение резонансов и других особенностей. В выбранном для рис. 1 азимуте поля в плоскости пленки ход зависимостей близок для сравнения с их поведением в более толстых пленках. В других определенных условиях выявляются существенные особенности, связанные с размерами пленки и ее ориентацией в поле; фиксируются дополнительные данные, используемые для объяснения поведения восприимчивости и деталей ориентационных фазовых переходов.

1. Шкарь В.Ф., Варюхин В.Н. // ПЖТФ, Т.92, вып.5, С. 3375 – 380 (2010)
2. Николаенко Ю.М., Мухин А.Б., Мезин Н.И. // ФТВД, Т.33, №1, С.86 – 92 (2024).
3. Непочатых Ю.И., Варюхин В.Н., Коледов В.В., Шавров В.Г. // ФТВД, Т.34, №4, С.55 – 62 (2024).



МАГНИТОФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ С МАССИВОМ ПОЛОС ИЗ СЕРЕБРА

Османов С.В., Михайлова Т.В.

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь

osmanovft1@mail.ru

В работе предлагается магнитофотонный кристалл (МФК), в котором реализовано гибридное состояние таммовского (ТПП) и поверхностного (ППП) плазмон-поляритонов. Для создания гибридного состояния используется массив полос из серебра.

Моделирование МФК проводилось в пакете прикладных программ, алгоритм которого построен на методе конечных разностей.

МФК обладает фотонной запрещенной зоной, которая формируется благодаря периодически чередующимся слоям [1, 2]. Одним из слоев, задаваемых при моделировании, является магнитоактивный висмут-замещенный феррит-гранат (Bi:YIG), который позволяет наблюдать магнитооптические эффекты. МФК-кристаллы часто используют для усиления МО-эффектов [3]:

$$[\text{SiO}_2/\text{Bi:YIG}]^m/\text{Ag}, \quad (1)$$

где m – это количество пар слоев в МФК, Ag – слой, представляющий собой чередующиеся полосы из серебра. Период полос серебра составляет 500 нм, ширина полос – 250 нм.

На рис. 1 отчетливо видно, что в отсутствие структурирования серебряного слоя отсутствуют ярко выраженные резонансные особенности, однако при добавлении на поверхность МФК серебра возникают оптические резонансы, которые сопровождаются усилением эффекта Фарадея. Положение резонансов возможно контролировать, изменяя геометрические параметры серебряных полос. Интересным является также наличие двух практически одинаковых по амплитуде резонансов на длинах волн 650 и 679 нм. Такая структура позволяет усилить эффект Фарадея >40 раз (в сравнении с МФК со сплошным слоем серебра), однако имеет ряд недостатков в виде слабой пропускной способности и сложностей в синтезе.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект №19-72-20154, <https://rscf.ru/project/19-72-20154/>).

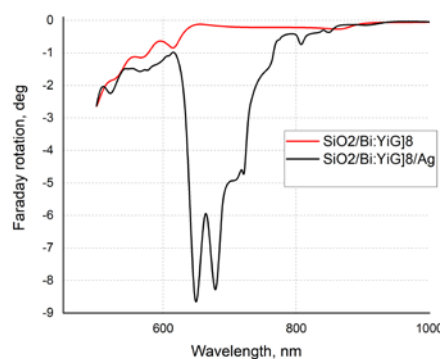


Рис.1. Фарадеевское вращение МФК с полосами из серебра и без них.

1. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I. et al. // *Phys. D: Appl. Phys.* 2003. V. 36. P. R277.
2. Inoue M. *Magnetophotonic Crystals: Experimental Realization and Applications* / M. Inoue, A. V. Baryshev, T. Goto [et al.] ; M. Inoue et al. (eds.) // *Magnetophotonics*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 2013. P. 163.
3. Mikhailova T.V., Berzhansky V.N., Shaposhnikov A.N. et al. // *Opt. Mater.* 2018. V. 78. P. 521.

**ОБМЕННОЕ СМЕЩЕНИЕ В ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ
КОМПЕНСАЦИОННОГО ФЕРРИМАГНЕТИКА $(\text{BiGdLuTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$** ***Прилепский И.В.¹, Присяжнюк А.В.¹, Ветошко П.М.¹, Полулях С.Н.¹, Белотелов В.И.²***¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», г. Симферополь²ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», г. Москва
prilepskii.ivan@yandex.ru

Контроль магнитных свойств компенсационных ферримагнитных материалов играет ключевую роль для их дальнейшего практического применения. В качестве образца была исследована эпитаксиальная пленка железного граната $(\text{BiGdLuTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной 4.8 мкм, обладающая компенсацией магнитного и углового моментов. Магнитная компенсация обусловлена наличием в соединении магнитных ионов гадолиния, тулия и железа. Разбавление редкоземельной подрешетки ионами тулия с g-фактором, отличающимся от g-фактора S-ионов гадолиния и железа, приводит к возникновению компенсации углового момента.

Температуры магнитной компенсации ($T_M = 160$ K) и Нееля ($T_N = 455$ K) определены по магнитооптическим петлям гистерезиса. Вдали от T_M петли гистерезиса имеют симметричный вид, что согласуется с предположением об однофазном ферримагнетике с равномерным распределением магнитных ионов. При переходе через T_M происходит разворот петли (рис. 1, вставка справа). При этом наблюдается значительное увеличение усредненной коэрцитивной силы (H_C) вблизи T_M (рис.1, красный график).

Еще один эффективный параметр петли – поле обменного смещения (H_{EB}), характеризующее горизонтальное смещение петли. Величина H_{EB} существенно возрастает в небольшом температурном диапазоне вблизи T_M и изменяет знак при переходе через T_M (рис.1, синий график). Знак H_{EB} вблизи T_M может быть изменен путем выбора температурного протокола. Зависимость $H_{EB}(T)$, полученная в ходе нагрева образца, является зеркальным отражением зависимости, полученной в ходе охлаждения. Приведенная на рис. 1 зависимость $H_{EB}(T)$ вблизи T_M получена в ходе нагрева образца и совпадает по знаку с зависимостью $H_{EB}(T)$ при нагреве в работе [1]. В свою очередь, величина $H_{EB}(T)$, проходящая через нуль при $T = T_M$, является следствием $M=0$ при этой температуре.

Обменное смещение петли магнитооптического гистерезиса обусловлено влиянием сильно коэрцитивного переходного слоя на интерфейсе пленка-подложка. Однако толщина этого слоя мала настолько, что не оказывает заметного влияния на фарадеевское вращение.

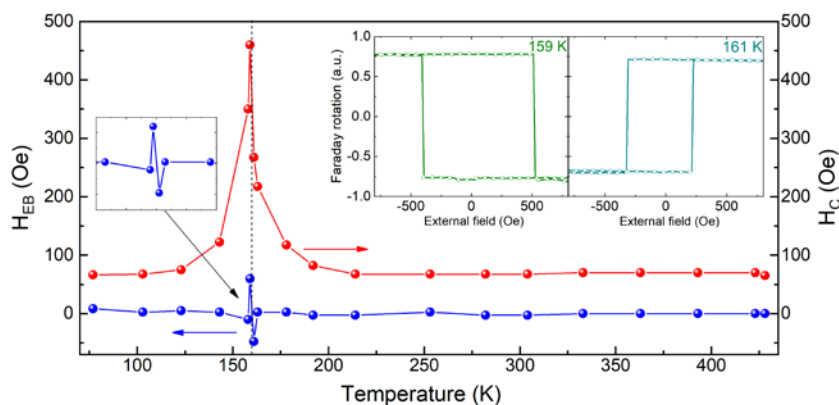


Рис. 1. Зависимость коэрцитивного поля $H_C = (H_{CL} - H_{CR}) / 2$ (красные символы) и обменного смещения $H_{EB} = (H_{CL} + H_{CR}) / 2$ (синие символы) от температуры T . H_{CL} и H_{CR} – коэрцитивная сила в области отрицательных и положительных магнитных полей соответственно. Вставка справа – петли гистерезиса вблизи $T_M = 160$ K.



БАРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОСТРУКТУРНОГО ПЕРЕХОДА В МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКОМ СПЛАВЕ $\text{NiMn}_{0,89}\text{Cr}_{0,11}\text{Ge}$ С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ КЮРИ

Грибанов И.Ф., Головчан А.В., Сафонов Р.А., Ковалёв О.Е., Ныркoв Н.Ю.,
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
romansafonov05@mail.ru

Как известно, среди сплавов системы $\text{NiMn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ge}$, позиционируемых как «зеленые» магнитокалорические материалы, наилучшие функциональные характеристики имеют твердофазно закаленные сплавы, близкие по составу к $\text{NiMn}_{0,89}\text{Cr}_{0,11}\text{Ge}$ [1]. В этих сплавах имеет место магнитоструктурный фазовый переход первого рода из высокотемпературной парамагнитной фазы с гексагональной кристаллической структурой типа Ni_2In в низкотемпературную ферромагнитную фазу с орторомбической кристаллической структурой типа TiNiSi , который и обуславливает появление гигантского магнитокалорического эффекта (МКЭ) [1,2].

Установлено, что принятый в литературе метод синтеза таких материалов, включающий твердофазную закалку от температуры гомогенизирующего отжига (850°C), приводит к разбросу температур Кюри в диапазоне примерно $220 < T_C < 280$ К без потери их функциональной эффективности. В настоящей работе получены образцы с пониженной T_C и исследовано влияние давления на магнитоструктурное превращение в этих образцах. Результаты представлены на рис. 1 и 2.

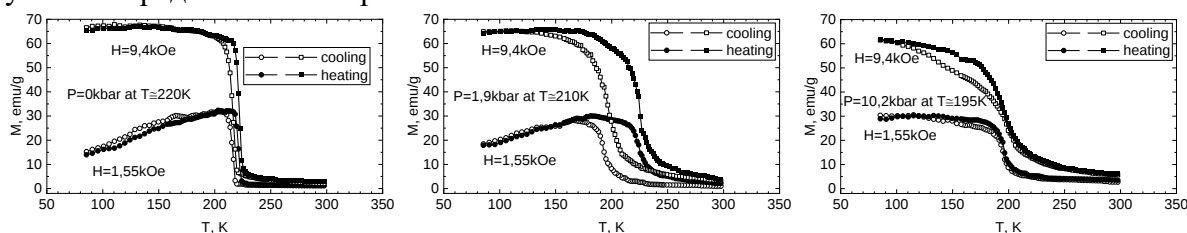


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности сплава с $x=0,11$ при разных давлениях.

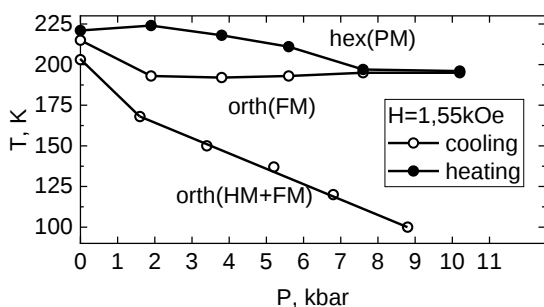


Рис. 2. Фазовая P–T-диаграмма исследуемого сплава. PM, FM, HM – соответственно парамагнитное, ферромагнитное, гелимагнитное состояния; hex, orth – соответственно гексагональная и орторомбическая кристаллические структуры.

Как видно из рис. 1 и 2, зависимость от давления температур переходов hex(PM)-orth(FM) и при охлаждении, и при нагреве образцов является немонотонной, что резко контрастирует с полученными ранее монотонно снижающимися зависимостями $T_C(P)$ для случая более высокой температуры Кюри [2]. Указанные различия связаны, скорее всего, с процессом закалки (т.к. вариации химсоставов невелики) и требуют его контроля.

1. И.Ф. Грибанов, В.В. Бурховецкий, В.И. Вальков, А.В. Головчан, В.Д. Запорожец, В.И. Каменев, Т.С. Сиваченко. ФТВД 30, № 1, 83 (2020).
2. T. Jaworska-Golab, S. Baran, R. Duraj, et al. J. Magn. Magn. Mater. 385, 1 (2015).



ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В РЕШЕТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ ПЛЕНКИ ФЕРРИТА-ГРАНАТА

Сирюк Ю.А.¹, Безус А.В.¹, Кононенко В.В.²

¹ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
juliasiryuk@gmail.com

Экспериментально исследованы индуцированные магнитным полем смещения фазовые переходы в двух видах решеток цилиндрических магнитных доменов: РЦД₂ – равновесная и РЦД₁ – неравновесная. Соотношение числа вертикальных блоховских линий в доменных границах этих решеток $N_1 > N_2$.

Решетки ЦМД формируются импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки. При этом создается сложная доменная граница, имеющая большое число вертикальных блоховских линий (ВБЛ). Длина окружности ЦМД ограничивает число линий Блоха. Расстояние между линиями Блоха $S = \pi d / 2N$, где d – диаметр ЦМД, N – число оборотов спинов. При диаметре 4-13 мкм максимальное значение $N=90$, что соответствует 180 линиям Блоха [1].

Цель работы – показать: индуцированные фазовые переходы в доменной границе вызывают фазовые переходы в доменах, в решетке ЦМД и определяют вид этих переходов.

Для исследования выбрана пленка с развитой поверхностью <111>, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке состава $(TmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$. При комнатной температуре фактор качества $Q > 5$.

В работе используются два магнитных поля, перпендикулярных плоскости пленки: 1 – постоянное двух направлений (поле смещения H_{CM}); 2 – монополярное импульсное. Доменная структура наблюдается благодаря эффекту Фарадея.

Исследуются два вида решеток ЦМД: 1- РЦД₁, формируется импульсным магнитным полем при отсутствии поля смещения; 2 - РЦД₂, формируется импульсным полем в присутствии поля смещения. Обе решетки являются равновесными, но при наложении поля смещения РЦД₁ оказывается неравновесной, а РЦД₂ – равновесной.

Выводы. При поле смещения, антипараллельном намагниченности внутри домена, в решетках наблюдаются фазовые переходы первого рода в новую решетку ЦМД с большим периодом, меньшим диаметром ЦМД и меньшим числом ВБЛ в доменных границах. При дальнейшем увеличении поля смещения наблюдается ряд таких же фазовых переходов первого рода. Экспериментально доказана квантуемость решетки ЦМД, домена, доменной границы и полевой устойчивости полученных решеток ЦМД.

При поле смещения, сонаправленном с намагниченностью внутри домена, в решетках ЦМД происходят фазовые переходы второго рода в сотовую структуру. При этом ЦМД приобретает форму шестиугольника; сохраняются число доменов и число ВБЛ в доменной границе. При последующем увеличении поля в сотовых структурах происходят фазовые переходы первого рода в ячеистые структуры: $|H_{C1}| > |H_{C2}|$ при $N_1 > N_2$.

Экспериментально доказано: фазовые переходы в доменной границе вызывают фазовые переходы в доменной структуре и определяют род этих фазовых переходов.

Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 124012400345-8).

1. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами, М: Мир, 1982, 382 с.



ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНЫХ ХОПФИОНОВ

Метлов К. Л., Тарасенко А. С., Безус Ю. А., Запорожец В. Д.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

metlov@donfti.ru

Магнитные хопфионы [1] представляют значительный интерес для современной физики конденсированного состояния и трёхмерной спинтроники [2] благодаря их уникальным свойствам и потенциальным приложениям в устройствах хранения и обработки информации.

Взяв за основу модель хопфионов в гелимагнетике [3], мы добавили к её пробной функции дополнительные степени свободы, допустив зависимость профиля хопфиона от азимутального угла. Получившаяся модель заведомо дает лучшее приближение к энергии точного решения, но в пределе (отсутствия азимутальной зависимости профиля хопфиона) сводится к модели [3]. Численная оценка верхнего критического поля хопфионной решётки показала, с учётом численной погрешности, соответствие полученному в [3] аналитическому выражению. Рассмотренная обобщённая модель открывает возможность моделирования контактного взаимодействия между хопфионами в решётке.

Расчёты показывают, что (как видно и на рис. 1), что форма ядра хопфиона (области сильно неоднородной намагниченности) и его внешнего контура не повторяют друг друга. Внешний контур может (под влиянием магнитной анизотропии) сильно вытягиваться эллиптически, но ядро хопфиона сохраняет почти идеальную сферическую форму. Эти результаты независимо подтверждают выводы работы [3] об эллиптической стабильности хопфионов.

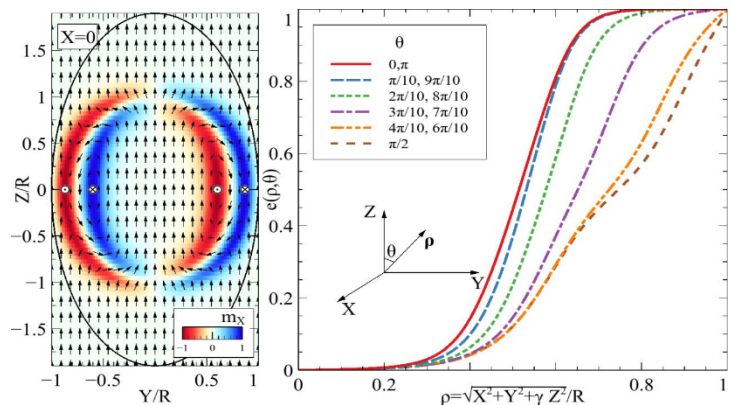


Рис.1 Сечение распределения намагниченности (слева) и некоторые срезы функции профиля $e(x, \theta)$ (справа) равновесного хопфиона с $H = 1$ при $q = 1$ и $h = 0$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00076.

1. И. Е. Дзялошинский, Б. А. Иванов, Локализованные топологические солитоны в ферромагнетике, Письма в ЖЭТФ 29, 592-595 (1979).
2. G. Gubbiotti, A. Barman, S. Ladak, et al., 2025 roadmap on 3D nanomagnetism, Journal of Physics: Condensed Matter 37, 143502 (2025).
3. K. L. Metlov, Elliptical stability of hopfions in bulk helimagnets, ArXiv preprint 2501.05290 (2025).



**СТРУКТУРНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ
МУЛЬТИФЕРРОИКОВ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$),
ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ**

***Тарасенко Т.Н., Волкова Г.К., Сафонов Р.А., Бурховецкий В.В., Ткаченко В.М.,
Потапская О.Н., Наймушина Д.Е., Шевелёва А.В., Михайлов В.И.***

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

t.n.tarasenko@mail.ru

Магнитные и электрические свойства сложных оксидов $\text{Bi}(\text{Mn},\text{Fe})\text{O}_3$ зависят от особенностей обменных взаимодействий в связях Mn-O-Mn , Fe-O-Fe и Mn-O-Fe , которые сильно связаны с локальной структурой октаэдра Fe/MnO_6 .

Феррит висмута BiFeO_3 является антиферромагнетиком (АФМ) G-типа, в то время как BiMnO_3 – ферромагнетиком (ФМ) вследствие орбитального упорядочения и сверхобменного взаимодействия с низкой температурой Кюри (105 К) [1]. Предполагается, что присутствие Mn в твердом растворе $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ будет способствовать его ФМ-упорядочению. Однако в образцах, синтезированных методом твердофазного синтеза, замещение ионов Fe^{3+} ионами Mn^{3+} не приводит к проявлению ФМ-свойств. Образцы остаются АФМ для всех составов $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.4$) [2].

В данной работе изучены структурные и магнитные характеристики системы твердых растворов $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$), синтезированных золь-гель методом. Для всех составов кристаллическая структура определена как ромбоэдрическая (пр. гр. $R\bar{3}c$), на рентгенодифрактограммах имеется несколько малоинтенсивных рефлексов примесных фаз. При $x \geq 0.08$ появляются рефлексы орторомбической фазы (пр. гр. $Pbnm$). С ростом x средний размер гранул уменьшается от ≈ 500 нм ($x=0.0$) до ≈ 400 нм ($x=0.1$). На рис. 1 представлена концентрационная зависимость уд. намагниченности $M(x)$ для этой системы при комнатной температуре. Измерения проводились с помощью магнитных весов Доменикали. С увеличением концентрации марганца зависимость $M(x)$ для $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ монотонно возрастает до значения $x=0.08$, затем резко уменьшается при $x=0.1$ практически до уровня $x=0.0$. Такое поведение $M(x)$ может свидетельствовать о наличии в структуре дополнительной (орторомбической) перовскитной фазы $Pbnm$ [3,4], остаточная намагниченность которой довольно мала [4]. При небольшой концентрации ионов Mn^{3+} ян-теллеровские искажения октаэдров Fe/MnO_6 могут усилить ФМ-взаимодействия. Однако для $x \geq 0.08$ намагниченность уже представляет наложение двух фаз, при этом объем фазы $R\bar{3}c$ с высокой удельной намагниченностью уменьшается, в то время как $Pbnm$ с низкой удельной намагниченностью увеличивается, а значит, суммарный объем $M(x)$ уменьшается.

Сложные оксиды $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$, помимо ФМ-фазы, содержат и АФМ-фазу, и уменьшение величины $M(x)$ при $x \geq 0.08$ может свидетельствовать о перераспределении объемов этих фаз: число ФМ-связей Mn-O-Fe уменьшается, а АФМ – увеличивается.

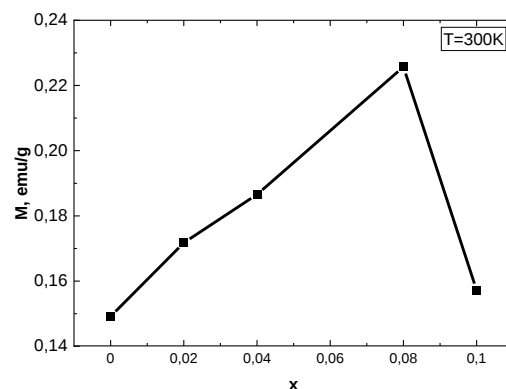


Рис.1. Концентрационная зависимость удельной намагниченности $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$) в поле $H = 9.7$ kOe

1. Chi Z.H., Yang H., Feng S.M. et al. // JMMM, **310**, P.358–360 (2007).
2. Ianculescu A., Gheorghiu F.P., Postolache P. et al. // J. All.Comp., **504**, P.420-426 (2010).
3. Тарасенко Т.Н., Михайлов В.И. и др. // Изв. РАН.Сер. физ., Т.87, №3, С.412-416 (2023).
4. Chen L., Zheng L., He Y. et al. // J. All.Comp., **633**, P.216-219 (2015).



ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ФМР С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКИХ ПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Холин А.А.¹, Ветошко П.М.^{1,2}, Павлюк Е.И.¹, Полулях С.Н.¹, Белотелов В.И.³

¹V. I. Vernadsky Crimean Federal University, 295007, Simferopol, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronic, 125009, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

sunellsters@gmail.com

Данная работа нацелена на исследование влияния на ширину линии перпендикулярного ФМР-резонанса факторов, связанных с креплением образца. В качестве образца использовалась плёнка железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной 5,3 мкм.

Образец был вытравлен в форме диска диаметром 1,7 мм для борьбы с краевыми эффектами.

Плёнка располагалась на специально спроектированном датчике, представляющем собой полосковую линию передач. Размеры датчика составляют 2X3,5 см, ширина непосредственно полосковой линии составляет 2 мм. Образец размещался в центре линии слоем ЖИГ к полоску.

Регистрация спектра осуществлялась с помощью векторного анализатора цепей, который одновременно генерировал сигнал на фиксированной частоте и регистрировал сигнал, прошедший через полосок с закрепленным образцом.

Датчик с образцом помещался в постоянное магнитное поле, направленное по нормали к плоскости образца. Регистрировалась зависимость коэффициента передачи S_{21} датчика с образцом от величины внешнего магнитного поля на фиксированной частоте.

Экспериментально было обнаружено влияние на спектр расположения образца в линии задержки. В частности, ширина регистрируемого спектра зависит от расстояния между поверхностью датчика и плёнкой ЖИГ (далее просто «зазор»).

Можно предположить, что удаление образца от поверхности полоска хоть и приводит к уменьшению интенсивности сигнала, это также переносит образец в область более однородного переменного магнитного поля, что и приводит к сужению ширины регистрируемого спектра. Можно считать, что меняется именно истинная линия, а не зарегистрированная.

В результате работы продемонстрировано, что наличие зазора приводит к уменьшению ширины линии перпендикулярного ФМР-резонанса и данный эффект усиливается вплоть до гелиевых температур.

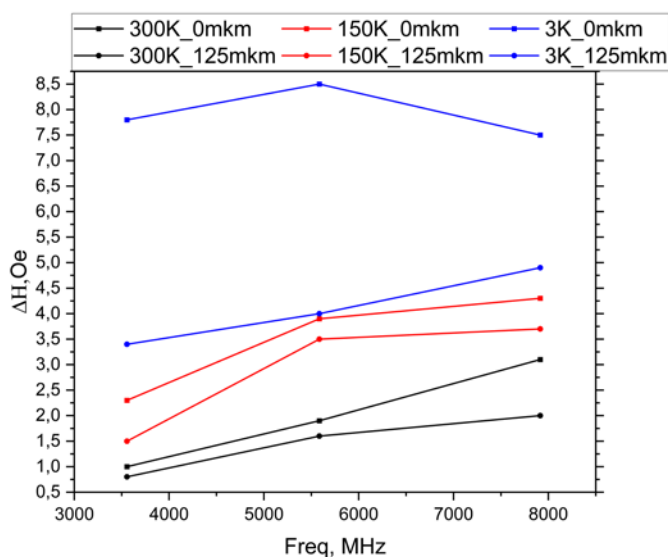


Рис. 1. Зависимость ширины линии от частоты накачки для нескольких температур при наличии и отсутствии зазора.



УДК 535.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОГО ВРАЩЕНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛЕНКИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Букин Г.В.¹, Букина К.Г.², Борзенко А.П.¹, Юрченко В.М.¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

²г. Донецк

bukinfti@rambler.ru

В настоящее время большое внимание исследователей уделяется поиску возможностей управления функциональными параметрами материалов, созданных на основе гибкоцепных частично-кристаллических полимеров [1], к которым относится сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), изделия из которого обладают уникальными эксплуатационными характеристиками.

Известно [1], что двухфазные системы гибкоцепных кристалло-аморфных полимеров в конденсированном состоянии могут иметь чрезвычайно сложный характер взаимодействий, механизмы которых на сегодня изучены в недостаточной степени.

Каждый сорт оптически активных компонентов с концентрацией C , входящий в состав оптически активной среды, на длине волны λ при постоянной температуре T и давлении P характеризуется своей вращательной способностью, которую можно описать выражением [2]:

$$\alpha \Big|_{\lambda}^{T,P,C} = \frac{\varphi}{d}. \quad (1)$$

где φ – угол поворота плоскости поляризации, d – толщина слоя оптически активной среды.

Получить кривую дисперсии оптического вращения $\alpha(\lambda)$ при помощи поляризационного рудного микроскопа ПОЛАМ Р-312 можно, если использовать неразрушающий экспресс-способ, разработанный в работе [3], а угол поворота φ плоскости поляризации линейно поляризованного света измерить на разных длинах волн λ монохроматического потока лазерного излучения. Экспериментальный график дисперсии суммарного оптического вращения для исследуемого образца пленки СВМПЭ получен в диапазоне длин волн за пределами резонансных полос поглощения и описан выражением [2]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (2)$$

где A и λ_0^2 – константы соответственно вращения и дисперсии.

Рассчитанные по экспериментальной кривой $\alpha(\lambda)$ значения констант вращения A и дисперсии λ_0^2 для исследуемого образца пленки СВМПЭ, в соответствии с выражением (2) равны соответственно $A = 0.000021 \text{ grad} \cdot \text{mm}$ и $\lambda_0^2 = 3.176982 \text{E-}8 \text{ mm}^2$. Достоверность подгонки экспериментальной кривой $\alpha(\lambda)$ имеет величину 0.991595.

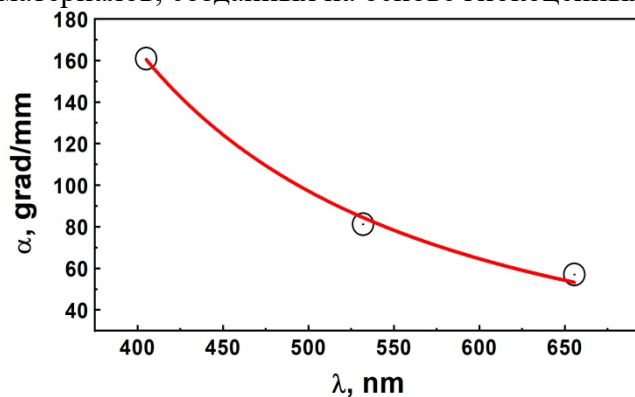


Рис.1. Экспериментальная кривая дисперсии суммарного оптического вращения $\alpha(\lambda)$ (○) и ее подгонка (—) для исследуемого образца анизотропной пленки СВМПЭ.

1. Mott P.H., Roland C.M. // *Macromolecules* V.31 , P.7095 (1998).
2. Друде П., *Оптика*, Москва, 1935 – 458 с.
3. Букин Г.В., Букина К.Г. // *ФТВД*, Т.34, № 2, С.51 (2023).



ДВУМЕРНЫЙ НИТРИД БОРА. ОТ СВЕРХТОНКОЙ ПЛЕНКИ К ОБЪЕМНОМУ КРИСТАЛЛУ

Бутько В.Г., Гусев А.А., Хачатурова Т.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
vg-bt@mail.ru

Методами функционала плотности проведены первопринципные расчеты электронных и структурных свойств различных объектов, построенных на основе гексагонального нитрида бора: монослоя, пленок нанометровой толщины и объемного кристалла. В результате самосогласованных расчетов находили оптимизированные позиции всех атомов и полную энергию системы, а затем рассчитывали зонную структуру соединения, плотность электронных состояний и т.д. Полученные результаты существенно уточняли дополнительными расчетами с помощью функций Грина.

До недавнего времени величина запрещенной зоны E_g для широкозонных диэлектриков считалась постоянной. Недавно, однако, было показано, что для пленок диоксида кремния нанометровых толщин E_g не является постоянной величиной и существенным образом зависит от толщины пленки. В настоящей работе найден ряд значений E_g для пленок двумерного h-BN толщиной от 0.34 до 18 нм, что свидетельствует о наличии зависимости ширины запрещенной зоны от толщины пленки. Кроме того, впервые получены значения энергии Ферми для различных толщин двумерного кристалла h-BN и показано, что E_f для двумерной пленки не является постоянной величиной и зависит от ее толщины.

В тех структурах, из вышеперечисленных, где известны экспериментальные данные по запрещенной щели E_g , они довольно хорошо согласуются с расчетными величинами. При толщине нанопленки h-BN около 18 нм полученные значения энергии Ферми и запрещенной щели E_g практически равны соответствующим величинам в объемном кристалле гексагонального нитрида бора. В обоих случаях $E_g = 6.11$ эВ (самый точный эксперимент дает величину 6.0 эВ), а в нанопленке и кристалле $E_f = 2.16$ эВ. Таким образом, можно утверждать, что важнейшие фундаментальные электронные параметры полупроводниковой нанопленки h-BN при толщине 18 нм достигают значений соответствующих величин в кристалле гексагонального нитрида бора.

Тщательное исследование плотности электронных состояний изучаемых систем, возможно, даст необходимые аргументы, чтобы утверждать, что имеем дело с 2d-3d переходом.



ИОННЫЙ ЗВУК, ЛЕВИТАЦИЯ И САМООРГАНИЗАЦИЯ ПОТОКА ЧАСТИЦ LaSrMnO В МАГНЕТРОННОЙ ПЛАЗМЕ

Окунев В.Д., Самойленко З.А., Бурховецкий В.В., Николаенко Ю.М.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
vladimir.okunev2010@mail.ru

Магнетронное распыление мишеней является одним из основных методов генерации низкотемпературной плазмы и широко используется для приготовления тонких пленок [1,2] при возможности получить быстрый результат с невысокими затратами, особенно в случае сложных многокомпонентных химических соединений. Мы показали [3], что универсальность магнетронного распыления по отношению к самым разным материалам связана с кластеризацией плазмы, создающей благоприятные условия для роста пленок: образующиеся в плазме атомные кластеры с большим количеством ненасыщенных связей и высокой химической активностью обеспечивают минимальную концентрацию дефектов на границах, облегчая рост пленок с подходящей для проведения экспериментов структурой.

В данной работе исследовано влияние формирующихся в магнетронной плазме разноразмерных кластеров ($D=50-400 \text{ \AA}$) на структуру и свойства 36 образцов пленок $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_{3-x}$, осажденных на стекло вдоль потока частиц.

В результате сопоставления «замороженных» колебаний параметров пленок с реальными ионно-звуковыми колебаниями в плазме восстановлен сценарий ее кластеризации, невозможной без левитации частиц. Предложено феноменологическое описание этого явления. Показано, что при расстояниях от мишени $L \leq 2.15 \text{ cm}$ кластеризация потока лимитируется левитацией атомных кластеров в результате равновесия между силой тяжести, давлением ионного звука и силой взаимодействия заряженных частиц с электрическими полями; вклад ионного звука в левитацию частиц здесь не превышает 12 %. При отсутствии электрического поля ($L \geq 2.45 \text{ cm}$) левитация зависит только от увлечения частиц ионно-звуковыми колебаниями. Результаты расчета критических размеров левитирующих атомных группировок согласуются с экспериментом.

Изучено влияние изменений в зарядовом состоянии ионов марганца вдоль потока частиц на формирование кластерной структуры пленок. В интервале $2.15 < L < 2.45 \text{ cm}$, где вдвое уменьшается размер кластеров, качественно меняется связь электрических свойств пленок с их структурой. Для кластеров с размерами, меньшими дебаевского радиуса экранирования ($l_D = 175 \pm 30 \text{ \AA}$), наблюдающиеся в образцах размерные эффекты согласуются с моделью локализации электронных состояний, предложенной Лифшицем.

Обсуждаются особенности технологии магнетронного распыления мишеней, позволяющие получать пленки многокомпонентных химических соединений высокого качества.

1. Каштанов П.В., Смирнов Б.М., Хипплер Р. // УФН, Т.177, №5, С.473-510 (2007).

2. M. Panjan and A. Anders // J. Appl. Phys., V.121, №6, 063302 (2017).

3. Окунев В.Д., Самойленко З.А., Николаенко Ю.М. и др. // ФТТ, Т.67, №1, 90-104 (2025).

ГРИФФИТСО-ПОДОБНАЯ ФАЗА В ЛЕГИРОВАННОМ ВИСМУТОМ
МАНГАНИТЕ ЛАНТАНА

Тарасенко Т.Н.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
t.n.tarasenko@mail.ru

Манганиты лантана и висмута имеют структуру перовскита ABO_3 , где A – La или Bi , B – Mn . Для $LaMnO_3$ характерны орторомбические (или ромбоэдрические) искажения кубической структуры перовскита, а для $BiMnO_3$ – моноклинные искажения. С точки зрения магнитного упорядочения крайние составы системы твердых растворов $Bi_xLa_{1-x}MnO_3$ существенно различаются: $LaMnO_3$ является слоистым антиферромагнетиком, а $BiMnO_3$ – ферромагнетиком (ФМ). Величины ионных радиусов La^{3+} и Bi^{3+} весьма близки (1.22 Å и 1.24 Å), но в отличие от иона La^{3+} на внешней электронной оболочке иона Bi^{3+} имеется стереохимически активная изолированная пара $6S^2$ -электронов, которая дает иону висмута дополнительную степень свободы для перемещения вдоль $\langle 111 \rangle$ -направления перовскитной кубической ячейки [1].

Фаза Гриффитса [2,3] возникает, когда в замещенном манганите отсутствуют некоторые магнитные связи, что может происходить при легировании ионами щелочноземельных элементов. Отклонение от прямолинейности температурной зависимости обратной магнитной восприимчивости $\chi^{-1}(T)$ для образцов системы $Bi_xLa_{1-x}MnO_3$, полученных методом твердофазного синтеза [4] (рис.1), свидетельствует о существовании фазы, подобной фазе Гриффитса, в диапазоне температур $T_C < T < T_G$, где температура Кюри $T_C = 143$ К и температура Гриффитса $T_G \approx 300$ К (для $x \leq 0.2$). Исследование температурных зависимостей $\chi''(T)$ для образцов системы $Bi_xLa_{1-x}MnO_3$, синтезированных золь-гель методом [4], показало присутствие в системе трех ФМ-фаз в интервале от 150 до 170 К, что связано с наличием трех неэквивалентных позиций иона Mn^{3+} в структуре $BiMnO_3$. Все эти три ФМ-фазы находятся в температурном диапазоне фазы Гриффитса.

Замещение La^{3+} на Bi^{3+} из-за близости их ионных радиусов и одинаковой валентности не должно приводить к сильным искажениям кристаллической структуры. Однако характер орбитального упорядочения d_z^2 -орбиталей ионов Mn^{3+} существенно различается: 2d-упорядочение – для $LaMnO_3$ и 3d – для $BiMnO_3$.

Таким образом, фаза, подобная фазе Гриффитса, наблюдаемая в слаболегированных Bi - La манганитах, возникает не из-за отсутствия некоторых ФМ-связей [4], а вследствие изменения части этих связей с 2d- на 3d-орбитальное упорядочение, а также ввиду конкуренции между этими ФМ-фазами и их сосуществованием в системе La - Bi манганитов.

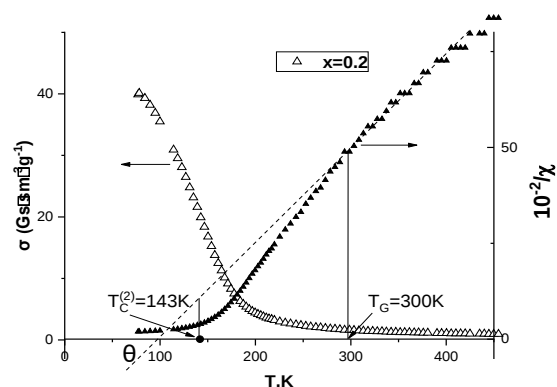


Рис.1. Температурные зависимости $\sigma(T)$ и $\chi^{-1}(T)$ $Bi_{0.2}La_{0.8}MnO_3$ (тв.-фазный синтез).

1. Moreira dos Santos A. et al. // *Phys. Rev.* B66, 064425 (2002).
2. Griffiths R.B. // *Phys. Rev. Lett.* Vol. 23, P. 17-19 (1969).
3. Криворучко В.Н. // *ФНТ*, Т.40, №7, С. 756-774 (2014).
4. Тарасенко Т.Н. и др. // *Известия РАН. Серия физическая.* 81, №3, С. 344-348 (2017).



ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ

Хачатурова Т.А.¹, Гусев А.А.¹, Бутько В.Г.¹, Коркишко В.В.²

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк
khachaturovat@mail.ru

Главными кандидатами в качестве основы новейших элементов наноэлектроники выступают туннельные гетеропереходы с металлическими и полупроводниковыми электродами. Именно за счёт сверхмалых толщин диэлектрика токовые свойства в рассматриваемых переходах реализуются благодаря явлению электронного и дырочного туннелирования сквозь тонкий диэлектрический слой, разделяющий два проводящих электрода. Параметризация диэлектрического слоя в туннельном переходе является на сегодняшний день важнейшей задачей при моделировании его электронных свойств. До настоящего времени учёт параметров диэлектрика ограничивался только его толщиной, при этом не учитывались значения фундаментальных физических величин, таких как ширина запрещенной зоны, энергия Ферми, сдвиг зоны проводимости. Действительно, во многих работах, выполненных ранее, барьер, сквозь который туннелируют частицы, описывался потенциальной ступенькой определенной высоты и ширины, обычно являющихся подгоночными параметрами при сравнении теории с экспериментом. На самом деле классически запрещенная область переходов образована запрещенной зоной диэлектрика, которая имеет не только верхнюю границу (зона проводимости), но и нижнюю (валентная зона), и перенос заряда из одного электрода в другой осуществляется через эту зону. Следовательно, при моделировании транспортных свойств в многослойных проводящих системах возникает необходимость учитывать такие важные параметры, как ширина запрещенной зоны диэлектрика E_G , энергия Ферми диэлектрика E_F , сдвиги зоны проводимости Δ_G . Кроме того, последние исследования свидетельствуют о том, что указанные величины также определяются толщиной диэлектрического слоя. Путём первопринципных расчётов методом функционала плотности и проекционных присоединенных волн PAW рассчитывались электронная структура и величина запрещенной зоны объёмных плёнок диоксида кремния для разных типов элементарных ячеек и диоксида гафния. Затем проводились расчёты электронной структуры и энергетических свойств диоксида кремния в тетрагональной (стишовит) и тригональной модификациях (альфа-кварц) для толщин плёнок, варьируемых от 0.3 до 4 нм. Исследование электронной структуры объёмных кристаллов двух тетрагональных форм диоксида кремния показало, что величина запрещенной зоны для стишовита и альфа-кристобалита составила 8.11 и 8.33 эВ соответственно, что согласуется с экспериментальными наблюдениями. Для оксида гафния в моноклинной форме запрещенная зона равна 5.79 эВ, сдвиг зоны проводимости на границе $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ более 1 эВ. Сравнительный анализ тонких плёнок двух тетрагональных форм диоксида кремния показал, что ширина запрещённой зоны возрастает от 6.56 до 8.15 эВ для толщин стишовита от 1.24 до 3.94 нм. Величина запрещённой зоны возрастает от 7.58 до 8.26 эВ для толщин альфа-кристобалита от 1.14 до 2.59 нм. Сдвиг зоны проводимости на границе $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ для обеих модификаций диоксида кремния уменьшается с уменьшением толщины плёнки, и при толщинах 3 нм и меньше допускает значения меньше 1 эВ. Данную особенность необходимо учитывать при анализе проводящих свойств гетеропереходов с окисными слоями нанометровых толщин.

1. Т.А. Хачатурова, В.Г. Бутько, А.А. Гусев, *Письма в ЖТФ* **49**, вып. 15, 3 (2023).
2. Т.А. Хачатурова, В.Г. Бутько, А.А. Гусев, *Письма в ЖЭТФ* **115**, 48 (2022).
3. Т.А. Хачатурова, В.Г. Бутько, А.А. Гусев, *ФТВД* **34**, № 1 (2024).



ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТНЫХ ПЕРЕХОДОВ «МЕТАЛЛ–УГЛЕРОДНАЯ ПЛЕНКА»

Шалаев Р.В., Изотов А.И., Сироткин В.В., Яковец А.А.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
sharos@donfti.ru

В последнее десятилетие активно исследуются полупроводниковые углеродные материалы [1–2], обладающие зачастую более выдающимися свойствами, чем классические полупроводники. Актуальной на сегодня задачей является изучение перехода «металл–углерод», который может демонстрировать интересные контактные явления. В данной работе рассмотрены некоторые электрические свойства такого контакта в зависимости от температуры и поведение его с течением времени.

Образцы для исследований были получены методом магнетронного распыления графита в атмосфере аргона [3]: углеродные пленки наносились на подложки из диэлектрика и различных металлов (титан, сталь, ниобий и пр.).

Электрические свойства полученных образцов изучались методом резистометрии в термокамере в диапазоне от 20 до 150⁰С. Двухзондовым методом изучалась как поперечная, так и продольная проводимость пленок/переходов. Исследовались температурные зависимости сопротивления углеродных пленок и вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта «металл–углерод» при различных температурах. Графическим путем оценивалась ширина запрещенной зоны полученных полупроводниковых пленок.

Среди прочего проводилось повторное исследование ВАХ контактных переходов «титан–углерод», полученных некоторое время тому назад (более 20 месяцев после напыления). Исходный переход, как было показано в работе [3], демонстрировал нелинейную и несимметричную ВАХ и, следовательно, обладал выпрямляющими свойствами потенциального барьера Шоттки. Из рис.1 видно, что ВАХ данного перехода по прошествии времени имеет симметричную нелинейную зависимость, также характерную для омического контакта.

Таким образом в работе показано, что со временем характеристики подобных контактов могут изменяться: происходят деградация контактного перехода и исчезновение выпрямляющих свойств, наблюдаемых ранее.

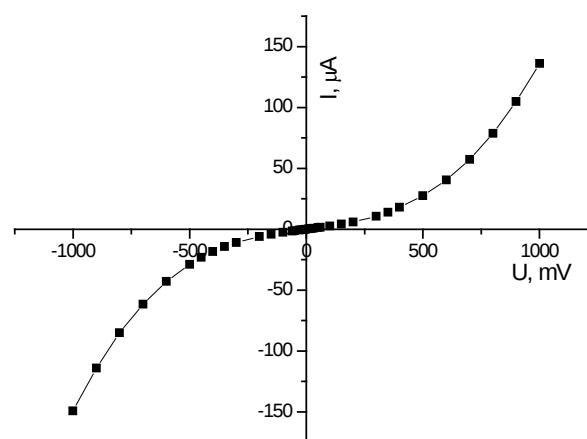


Рис.1. ВАХ контакта «титан–углерод» через 20 месяцев после его получения

1. Калинин Ю.Е., Каширин М.А., Макагонов В.А., Панков С.Ю., Ситников А.В. // ЖТФ, Т. 87, вып. 11, С. 1722-1728 (2017).
2. Хвостов В.В., Стрелецкий О.А., Якунин В.В., Иваненко И.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон., № 1, С. 78–82 (2012).
3. Изотов А.И., Кильман Г.В., Сироткин В.В., Шалаев Р.В. // ФТВД, Т.32, №3, С.76-80 (2022).



ВЛИЯНИЕ АММИАКА НА ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ, ТОЛСТЫХ И ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ГАЛЛИЯ

*Эфрос Н.Б., Николаенко Ю.М., Мухин А.Б., Мезин Н.И., Самойленко З.А.,
Пушенко Е.И., Дьяченко Т.А.*

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

nik@donfti.ru

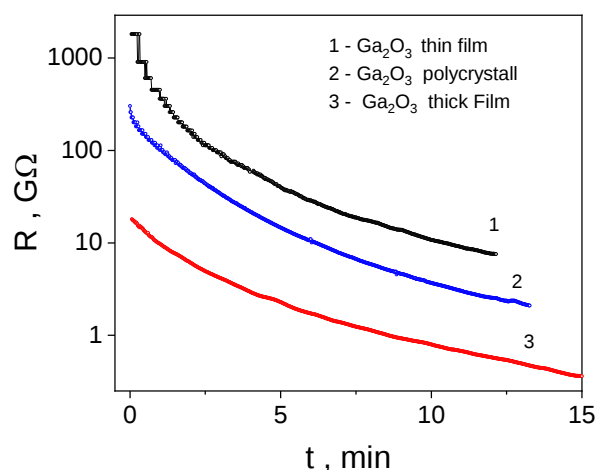
Как было нами установлено ранее, проводимость поликристаллических образцов оксида галлия при комнатной температуре проявляет чувствительность к влажности и к парам ряда летучих жидкостей. Наибольшее влияние оказывает присутствие в атмосфере аммиака [1]. Наличие в воздушной среде паров раствора 10% аммиака и 90% воды вызывает уменьшение сопротивления образца примерно на два порядка величины. При этом физический механизм крайне низкой проводимости остается неясным [2]. Можно предположить, что проводимость осуществляется по поверхности образца. Тем не менее наши исследования указывают на дополнительный вклад от проводимости по границам кристаллитов (или гранул). С целью выяснения этих особенностей мы провели измерения на нескольких образцах в виде толстых и тонких пленок Ga_2O_3 .

Поликристаллы были изготовлены по керамической технологии, тонкие пленки получены методом магнетронного распыления мишени на подложки Al_2O_3 в атмосфере 80% Ar – 20% O_2 . Для приготовления толстых пленок порошок Ga_2O_3 смачивался этиловым спиртом, затем наносился на диэлектрические Al_2O_3 подложки и запекался при температуре 400°C на воздухе.

На рисунке приведены зависимости временных изменений сопротивления этих образцов при комнатной температуре. Пары создавались в герметичной камере с образцом путем размещения в ней небольшой емкости с нашатырным спиртом.

Как видно, сопротивление трех образцов на воздухе (при $t=0$) существенно различается. Это коррелирует с их плотностью. Минимальной плотностью (отсутствием пор) характеризуется тонкая пленка. Более пористой микроструктурой характеризуется поликристалл, а максимальной – толстая пленка. Соответственно их стартовое сопротивление последовательно

изменяется на порядок величины. Тем не менее диапазон изменения сопротивлений под действием паров нашатырного спирта примерно одинаков и составляет около двух порядков величины, что, по нашему мнению, указывает на два механизма проводимости – по поверхности образцов и по границам кристаллитов.



Временные зависимости изменения сопротивления образцов Ga_2O_3 при комнатной температуре: 1 – тонкая пленка, 2 – таблетка, 3 – толстая пленка.

1. Николаенко Ю.М., Эфрос Н.Б., Самойленко З.А. и др. // ФТВД, Т.34, №1, С.77-81 (2024).
2. Wang J., Jiang S., Liu H. et al. // Journal of Alloys and Compounds, V. 814, P.152284 (2020).



УДК 533.9

УПРОЧНЕНИЕ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ПЛАЗМОТРОНОМ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Барбашина Е.Р.¹, Эссельбах Р.В.², Корсунов К.А.³

^{1,2} ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск

³ ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. Владимира Даля», г. Луганск
elizaveta.malyuta@list.ru

Прокатные валки являются ключевыми элементами в металлургической промышленности, используемыми для обработки металлов под высоким давлением. В процессе эксплуатации они подвергаются значительным механическим, термическим и абразивным нагрузкам, что приводит к их износу и необходимости частой замены.

Для повышения долговечности и износостойкости валков применяются различные методы упрочнения, среди которых особое место занимает технология плазменного поверхностного упрочнения плазмотроном с жидким электродом, который позволяет обрабатывать детали вращения наряду с неподвижными (рис. 1). Применение метода создает на поверхности валка твердый слой, повышая устойчивость к истиранию и абразивному износу. Упрочненный слой может иметь твердость до 70 HRC или выше, в то время как толщина слоя может составлять всего несколько микрон, поэтому обеспечивается сочетание высокой твердости и гибкости. Обработанная плазмой поверхность имеет низкий коэффициент трения, что уменьшает износ и задиры. Упрочненный слой также обладает низкой адгезией, что предотвращает налипание материалов к поверхности. Улучшается термостойкость к тепловому окислению и обезуглероживанию. Это делает обработанные валки более устойчивыми к высоким температурам и тепловым циклам, плазменное поверхностное упрочнение создает зоны сжимающих напряжений на поверхности, что повышает усталостную прочность. Упрочненный слой предотвращает образование трещин и распространение усталости [1].



Рис.1. Закалка детали вращения в плазмотроне с жидким электродом: 1 – модель валка, 2 – привод модели валка.

Поверхностная закалка прокатных валков с использованием плазмотрона с жидким электродом является перспективной технологией, позволяющей получить требуемые параметры термического упрочнения [2], что значительно повышает износостойкость и долговечность валков.

1. Suminov I. V., Belkin P.N., Epenfeld A.V. et al. *Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys*, Vol.I., M.: Technosphere, 2011, 464 p.

2. Корсунов К.А., Мalyута Е.Р., Эссельбах Р.В. // *Вестник Кузбасского гос. тех. универ.*, №5 (165), С. 30-39 (2024).



УДК 621.793

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Кемелжанова А.Е., Атчибаев Р.А.

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, НИИ ЭТФ, Алматы, Казахстан
aiman_90.08@mail.ru

В современном мире коррозия, износ и трение являются основной причиной выхода из строя машин, инженерных коммуникаций и промышленного оборудования. Это приводит к огромным материальным потерям [1]. Чтобы предотвратить процесс разрушения металлических конструкций, используют защитные покрытия. Такая защита увеличивает срок службы металлоконструкций, позволяет снизить вынужденные простои, обусловленные ремонтом и заменой повреждённых элементов конструкции. Изучение коррозионной стойкости покрытий определяет актуальность представленной работы [2].

Целью данной работы является исследование физических основ формирования беспористой плотной структуры композиционных электролитических покрытий (КЭП) при использовании нанопорошков дисперсной фазы в качестве компонента электролита-сuspension.

Покрытия наносились на поверхность образцов стали марки Ст3 размером 50x20x2 мм. Температура электроосаждения 333 К. Для нанесения нано-КЭП использовали электролит-сuspension следующего состава: оксид хрома 200–300, серная кислота 2–3, SiO₂ – 12, С – 8. В процессе осаждения температура электролита находилась в диапазоне 303–343 К, плотность тока – 6 кА/м². С увеличением концентрации углерода в матрице хрома повышение коррозионной стойкости нано-КЭП связано с уменьшением пористости покрытия, что обусловлено электронными квантово-размерными эффектами.



Рис.1. Образцы с покрытиями хром-диоксид кремния-углерод

Таким образом, за счёт образования стабильной композиции с углеродными наночастицами с увеличением концентрации углерода пористость нано-КЭП уменьшается. Глубинный показатель коррозии снижается с $1,8 \cdot 10^{-2}$ до $0,5 \cdot 10^{-4}$ мм/год для покрытий, полученных в диапазоне температур 313–343 К.

1. Hughes A.E., Mol J.M.C., Zheludkevich M.L., Buchheit R.G. // Springer Netherlands, V.140, P.125-428 (2022).
2. Ярославцева О.В., Останина Т.Н., Рудой В.М., Мурашова И.Б. Коррозия и защита металлов, Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021, 90 с.



УДК 621.793

INFLUENCE OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON SELECTIVE PERFORMANCE OF SY018 FE-MO ALLOY COATINGS

Huang Maohua^{1, 2}, Yar-Mukhamedova G. S.¹

¹ Faculty of Physics and Technology, al-Farabi Kazakh National University, IETP, Kazakhstan

² Changchun University of Science and Technology, China

maohua0114@gmail.com

In the electrodeposition process, electrolyte composition significantly affects the chemical composition, microstructure, morphology, and selective performance of SY018 Fe-Mo alloy coatings. Key electrolyte parameters, including primary salt concentration, additive types, and pH value, directly govern the reduction behavior of metal ions during deposition, thereby determining the quality and properties of the final coatings. This section systematically investigates the influence of individual electrolyte components on the selective performance of Fe-Mo alloy coatings.

Although significant progress has been made regarding the effects of electrolyte composition and electrolytic parameters on the properties of Fe-Mo alloy coatings, there are still many unsolved issues. Firstly, recent research strongly focuses on single-factor optimization, without systematically addressing multifactorial interactions between electrolyte properties and electrolytic parameters. Synergistic optimization studies are few, and the varying requirements for performance in different industrial processes limit the generalizability of the existing evidence. Second, the underlying mechanisms of additive functionality in electrolytes are not well understood, especially the synergistic interactions between various additives. In addition, although significant improvements in coating quality have been attained by using pulsed electrodeposition, the pulsed current parameters and coating performance relationship is not yet well understood. Experimental methods currently in use are predominantly empirical in nature, with little systematic theoretical tools to direct optimization procedures.

1. Wang Teng, Chen Yexin, Xie Yaqian. *Effect of Fe content on the crystal structure and properties of ordered Ni₄Mo alloy*. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2020, 26(01): 85-94.

2. Zhang Fan, Zhang Jinxiang, Wen Xiaoqiang, et al. *Microstructure and properties of WC-Ni-Fe-Mo cemented carbide*. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(11): 3950-3956.3.

3. Sun Yang. *Research on structure and properties of (Fe_{1-x-y}Co_xNi_y)₇₉Mo₁₀B₁₀Cu₁ amorphous/nanocrystalline soft magnetic alloy*. *Dissertation, Chongqing Jiaotong University*, 2024.



УДК 669.056

ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА

Пересадченко А.Н., Алехов Ю.А., Афанасьев В.В., Шавшина А.Н.

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон», г. Донецк
reaktivelektron@mail.ru

Магнитно-абразивная обработка (МАО) – современный высокоэффективный способ чистовой обработки поверхностей деталей. Композиционные магнитно-абразивные порошки (КМАП), состоящие из ферромагнитной основы и абразивных включений, являются режущим элементом МАО. Однако до сих пор остаются неизученными зависимости износостойкости, абразивного ресурса, прочности КМАП от химического и фракционного составов, технологии нанесения абразивного слоя на магнитную матрицу и т. п. Решение этих проблем тормозится и тем обстоятельством, что пока точно не известны механизмы разрушения многокомпонентных композиционных материалов [1].

Нами предложена методика, позволяющая исследовать характер разрушения зерна КМАП при воздействии механической нагрузки в истирающем режиме между притирами из стекла с периодичностью и нагрузкой, достаточной для выявления динамики процесса, т. е. определение прочностных свойств зерна при МАО. Основу методики составляют установка для испытаний КМАП в истирающем режиме и программа обработки изображений ImageJ (Fiji) [2].

Для изучения характера разрушения зерна при механической нагрузке в истирающем режиме по указанной методике был изготовлен КМАП, представленный частицами глобулярной формы с поверхностным расположением абразива следующего состава: железный порошок марки ПЖР – 76 % масс., карбид титана TiC – 19 % масс., эпоксидная смола ЭД – 5 % масс.

На рисунке показан результат разрушения зерна КМАП в результате обработки.

Как видно из рисунка, обработка при данном режиме приводит к увеличению процентного содержания мелкой фракции (8-4 мкм и 14-10 мкм) и появлению фракций 400-350 мкм и 500-450 мкм, которые отсутствовали в исходном порошке. Это, по всей видимости, связано с образованием конгломератов, являющихся результатом увеличения адгезии некоторых частиц в результате воздействия давления.

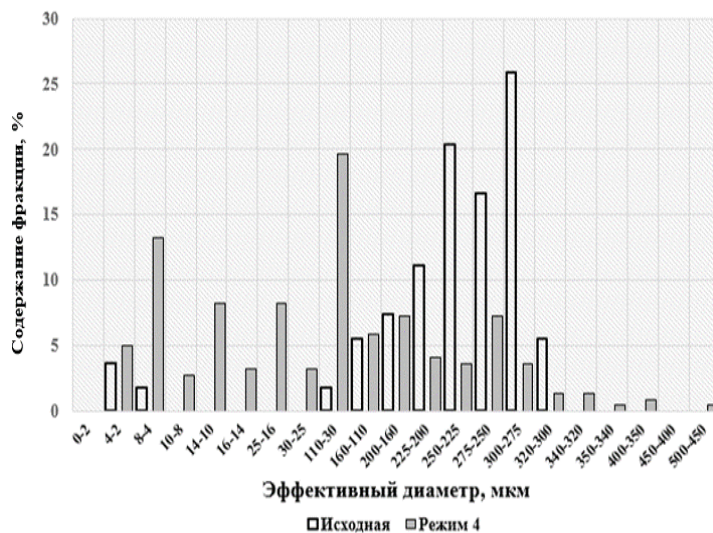


Рис.1. Исходный порошок и обработанный при режиме 4: давление 7 г/см³, 75 оборотов истирателя

1. Багайсков, Ю.С., Шумячер В.М. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов, Волгоград: ВИСТех (ВолгГАСУ), 2005, 200 с.
2. Пересадченко А.Н., Алехов Ю.А., Афанасьев В.В., Шавшина А.Н., Аленин В.Г. // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Международной научной конференции (Донецк, 15–17 октября 2024 г.). – Т. 2, Ч. 1. – Донецк: Донецкий государственный университет, 2024. – С. 302-304. – EDN: KLCPZI.



УДК 669; 533.9.03

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО ПОРОШКА БОРА ПУТЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Чурилов Г.Н.^{1,2}, Глущенко Г.А.¹, Николаев Н.С.¹, Локтев А.Н.^{1,2}, Елесина В.И.^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

churilov@iph.krasn.ru

В синтезе композитных материалов и легировании важным направлением является достижение равномерности распределения в матрице вводимого вещества [1]. Упрощает эту задачу правильный подбор его размеров. Чем меньше размер, тем проще получить равномерное распределение. Наиболее важно это при введении бора, известного своей эффективностью поглощения тепловых нейтронов и являющегося одним из наиболее привлекательных легирующих элементов [2].

Обработка микронного порошкообразного бора (100-1000 нм) плазмой низкочастотного дугового разряда (66 кГц) значительно уменьшило размер частиц (до 4-11 нм). Изменений в элементном составе частиц бора при этом не наблюдалось. Получение нанодисперсного порошка бора осуществлялось одновременно с его введением в расплав алюминия с использованием модифицированной нами конструкции плазмотрона [3,4], представленного на рис. 1. Центральный электрод выполнен в виде вольфрамового стержня, транспортный газ (аргон) подавался в пространство между центральным электродом и керамическим соплом, ограничивающим этот поток в радиальном направлении и позволяющим осуществлять его подачу во вращающемся состоянии. Роль второго электрода может выполнять как металлическое изделие, так и расплав металла или солевой раствор.

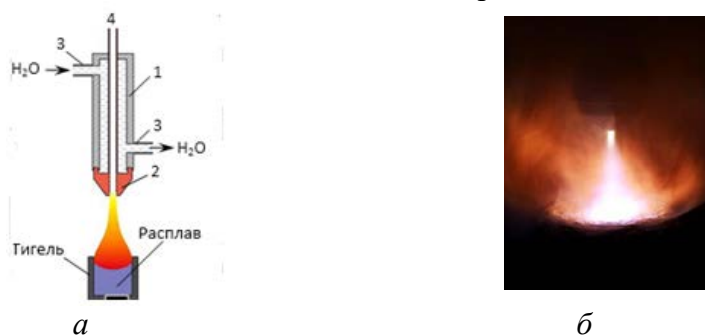


Рис. 1. Конструкция одноструйного плазмотрона (а) (1 – полое основание, 2 – головка электрода, 3 – подача охлаждающей жидкости, 4 – подача плазмообразующего газа) и фотография плазмотрона в работе (б)

Результаты исследования показали, что модифицированный плазмотрон можно использовать для получения бор-алюминиевых сплавов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00794, <https://rscf.ru/project/25-29-00794/>.

1. Chervyakova K.Yu., Samoshina M.E., Belov N.A. // *Non-ferrous Metals*, 2, P. 34-40 (2016).
2. Malkin A.I., Aliev A.D., Klyuev V.A. et al. // *Colloid J*, № 82, P. 403-407 (2020).
3. Churilov G.N., Nikolaev N.S., Glushenko G.A. et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), P. 7299-7309 (2022).
4. Чурилов Г.Н., Финников К.А., Николаев Н.С. // *Космические аппараты и технологии*, Т. 2. № 4(26), С. 212-219 (2018).



УДК 542.8 : 620.18 : 620.191 : 621.385.833.28

МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БАББИТОВОГО ВКЛАДЫША ПОДШИПНИКА ТУРБОАГРЕГАТА

Бурховецкий В.В.¹, Гаврилов Э.Н.², Дорохин Г.В.², Шкуратов Б.Е.¹, Чернявская Н.В.¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», г. Донецк

²ООО «Энхим», Тульская обл., г. Узловая

val-bur_63@mail.ru

В процессе эксплуатации паровых турбин разной мощности на электрических станциях Российской Федерации на поверхности деталей образуются эрозийные

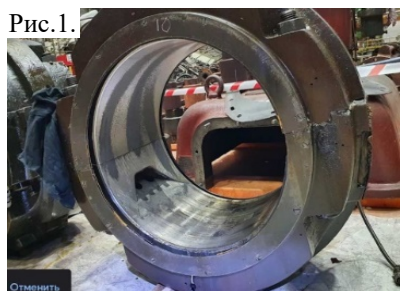


Рис.1.

повреждения [1], что приводит к их преждевременному износу и значительному ухудшению служебных характеристик агрегата, снижению производительности, вплоть до полной его остановки (рис. 1). По данным «УралВТИ», за последние 25 лет повреждения подшипников составляют 25% от общего числа повреждений (результаты обследования более 800 турбоустановок). Время на восстановление по причине отказов подшипников доходит до 30% от общего времени ремонта.

Методами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа [2] проведены исследования поверхностных повреждений и структуры баббитового вкладыша подшипника турбоагрегата.



Рис.2.

Определены морфология поврежденной поверхности, элементный состав различных участков поверхности, частиц, пленок, отложений. Проведен анализ предоставленных заказчиком протоколов осмотра и фотоснимков поврежденных участков оборудования.

Чаще всего дефекты как на подшипниках, так и на шейке вала, фиксируются на подшипниковых узлах 1 и 11. Для подшипников наиболее характерными являются дефекты по типам: эрозия, натяг, износ, борозды, раковины (рис.2).

Разрушение поверхности баббитового вкладыша происходит, в основном, по механизму эрозийного износа (рис. 3). При этом процесс протекает достаточно быстро с локальным повышением температуры, возможно, из-за срыва масляной пленки, увеличением при этом силы трения и разогревом до температур плавления баббита в локальных участках.

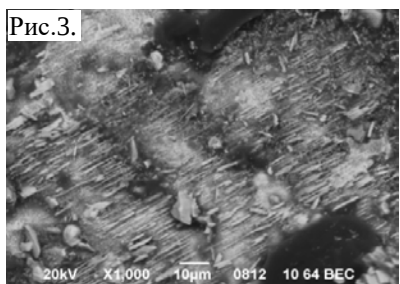


Рис.3.

По результатам проведенных исследований были сделаны выводы о характере и механизме образования повреждений на поверхности образцов сплавов поврежденного оборудования, даны рекомендации по улучшению качества исследованных материалов, повышению их коррозионной стойкости.

Результаты этого исследования помогут заказчику разработать мероприятия по снижению интенсивности образования и скорости распространения поверхностных разрушений, что приведет к повышению срока службы оборудования.

Работа выполнена по договору НИР № 02/23 от 25.12.2023 г.

1. Бакаев А.В., Исаков Н.Ю., Сандовский А.В., Сергель А.Н. Обзор источников и анализ причин электроэрозийных повреждений турбоагрегатов. *Надежность и безопасность энергетики*. 2017;10(3):206-210.

2. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справ. изд./Энгель Л., Клингеле Г. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1986, 232с.



УДК 539.4: 669.2

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛИДА ТИТАНА, ПРОШЕДШЕГО БАРОКРИОДЕФОРМИРОВАНИЕ

Хаймович П.А.¹, Андреев В.А.², Киселев А.Ю.³, Сундеев Р.В.⁴, Белоусов Н.Н.⁵,
Камаев А.О.⁶, Остропоко Е.С.⁷, Волков Г.А.⁷, Вьюненко Ю.Н.⁸

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков

²ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН», г. Москва

³АО «Атомэнергопроект», г. Санкт-Петербург

⁴МИРЭА «Российский технологический университет», г. Москва

⁵ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

⁶Автономная некоммерческая организация «Центр испытаний, сертификации и
стандартизации функциональных материалов и технологий», г. Москва

⁷ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

⁸ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», г. Санкт-Петербург

6840817@mail.ru

Изучено влияние барокриодеформирования (БКД) на физические свойства сплава TiNi 55,15 вес%. Исследованы прочностные характеристики, развитие эффекта памяти формы (ЭПФ), калориметрические параметры никелида титана. Проведён рентгеноструктурный анализ сплава после БКД-обработки в трёх режимах. Результаты сравнивали с характеристиками исходного материала. На рис. 1 приведены гистограммы, демонстрирующие фазовый состав образцов с различной термомеханической обработкой при комнатной температуре.

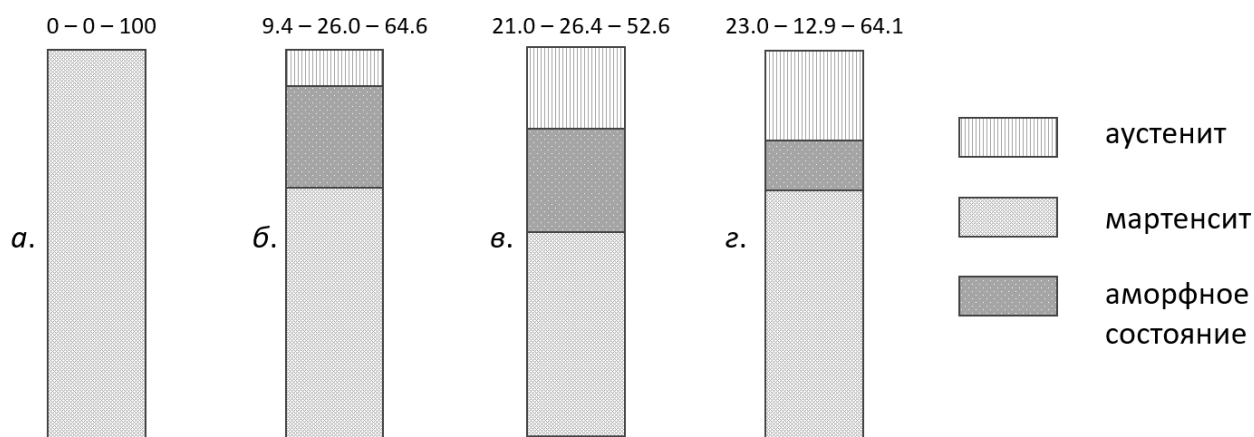


Рис.1. После теплойковки (~350°C – 400°C) (а), БКД-обработка под давлением 1,1 ГПа (б), – 1,4 ГПа (в), – 1,8 ГПа (г).

Появление аустенита и аморфной фазы в никелиде титана приводит к повышению его прочностных характеристик. Независимо от давления во время БКД-обработки происходит повышение температур обратного мартенситного превращения. A_s и A_d поднимаются от ~65°C и ~85°C поднимаются до ~130°C и ~275°C соответственно. Деформационные процессы ЭПФ в образце после второго режима квазигидроэкструдирования активно развиваются при температурах от ~100°C до ~180°C. Степень восстановления формы относительно материала в исходном состоянии значительно снижается. Отмечено изменение концентрации аморфной фазы ниже температур рекристаллизации.



УДК 669.017.165

ВЛИЯНИЕ ПРЕССОВАНИЯ И ВОЛОЧЕНИЯ МЕДНО-ТИТАНОВОГО БИМЕТАЛЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МАТЕРИАЛОВ

Гангало А.Н., Суровицкий В.Д., Бурховецкий В.В.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
al-gangalo@yandex.ru

Для производства микропроволоки из труднодеформируемых материалов, в частности титана, с целью облегчения процесса деформирования обрабатываемый материал покрывают медной оболочкой методом горячего прессования, получая биметаллическую заготовку для дальнейшего волочения [1]. Исследование боковой поверхности титановой микропроволоки, полученной с применением защитной медной оболочки, показало наличие коррозионностойкого медно-титанового интерметаллидного слоя TiCu, который остается на поверхности конечного изделия после снятия оболочки путём травления и калибровки волочением [2]. В работе также отмечено, что для полной очистки титановой микропроволоки диаметром 50 мкм необходимо убрать не менее 4 мкм поверхностного слоя. Однако механизмы формирования и эволюции интерметаллида на границе раздела меди с титаном в процессе получения микропроволоки не анализировались.

Цель данного исследования оценить влияние давления, температуры и деформации в процессе прессования, а также вытяжки при волочении на формирование медно-титанового интерметаллида на границе раздела материалов.

В качестве материалов для исследования использовалась медь марки М1, из которой изготавливалась оболочка биметалла. Для изготовления сердечника использовался титан марки Grade 4.

Исследование температурного режима горячего прессования (коэффициент вытяжки $\mu=16$) показало, что увеличение температуры нагрева заготовок с 650 до 850⁰С приводит: к снижению давления прессования более чем на 30% с 1250 до 800 МПа; уменьшению числа образовавшихся гребней на границе раздела материалов медь/титан более чем в 2 раза с 88 до 39 шт./мм; увеличению средней высоты гребня более чем в 2 раза с 14 до 31 мкм; увеличению толщины сформированного однородно интерметаллидного слоя соединения TiCu практически в 2 раза с 0,54 до 1 мкм.

Исследование влияния давления горячего прессования без влияния деформации (коэффициент вытяжки $\mu=0$) для случая нагрева заготовок до 850⁰С показало, что толщина образующегося интерметаллида TiCu незначительно увеличивается до 2 мкм от роста давления вплоть до 1000 МПа. После превышения этого значения наблюдается существенный прирост толщины слоя, который достигает 6 мкм при давлении 1400 МПа.

Анализ влияния деформации (вытяжки) на формирование интерметаллидного слоя прессовании проводился при температуре нагрева заготовок до 850⁰С, показал, что увеличение коэффициента вытяжки приводит к интенсификации процесса формирования интерметаллидного слоя. При увеличении коэффициента вытяжки с $\mu=0$ до $\mu=16$ скорость образования интерметаллида возрастает более чем в 4 раза.

Исследование влияния волочения показало, что независимо от начальной толщины интерметаллидного слоя TiCu на границе раздела материалов в процессе волочения биметалла при накоплении коэффициента вытяжки $\mu=25$ и более формируется куприд титана толщиной около 7,5 мкм, который разделен на слои TiCu₄, Ti₂Cu₃, TiCu по 2-2,5 мкм. Конфигурация интерметаллидов сохраняется при переходе в микронные размеры проволоки.

1. Патент RU 2146975 C1. Способ изготовления микропроволоки из труднодеформируемых материалов, Залазинский А.Г., Соколов М.В., Шабашов А.А., Новожионов В.И. 2000 г
2. Гангало А.Н., Прокофьева О.В., Бурховецкий В.В. и др. // ФТВД, Т.32, №3, С.108-113 (2022)



УДК 539.5

ПОВЕДЕНИЕ НАНОТВЕРДОСТИ РАСТВОРОВ МЕДИ И ТИТАНА ПРИ НАЛОЖЕНИИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ

Заворотнев Ю.Д.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
zavorotnev.yurii@mail.ru

В последнее время интенсивно исследуются растворы меди и титана с различными металлами. Такой интерес вызван необходимостью управления и улучшения различных свойств этих востребованных в промышленности соединений. В частности, Cu-Ag используется в производстве интегральных микросхем, а растворы на основе титана - в машиностроении, авиа- и космической промышленности. Одним из способов исследования является метод неразрушающего наложения интенсивной пластической деформации кручением (ИПДКР), при которой допускается до пяти и более оборотов образца вокруг некоторой оси [1]. При этом было обнаружено, что независимо от начальных условий (температура отжига) система после наложения ИПДКР приходит в одно и то же состояние, характеризуемое определенной концентрацией предельной растворимости примеси, максимальной нанотвердостью и т.д. В настоящей работе экспериментальные результаты теоретически объясняются на основе феноменологической теории Ландау. Неравновесный потенциал разлагается по структурному параметру порядка (ПП) до шестой степени включительно. Кроме этого, включены также инварианты Лифшица, описывающие возникающую спиральную структуру. Минимизируя этот функционал, получаем

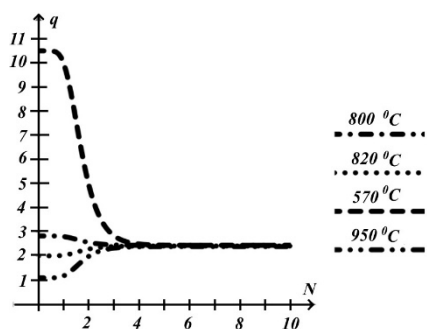


Рис.1. Зависимость структурного ПП от числа оборотов для разных температур отжига

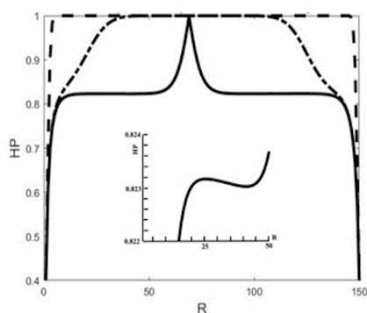


Рис.2. Распределение нанотвердости по радиусу образца.

изображенную на рис.1 зависимость структурного ПП от числа оборотов для разных температур отжига. Из рис.1 следует, что существует критическая температура отжига, при которой наложение крутящего момента не изменяет величины структурного ПП, т.е. размера элементарной ячейки. Видно, что имеется некоторая критическая температура, при которой величина структурного ПП не меняется.

Аналогичным образом теоретически исследовалась нанотвердость в сплавах титана. Соответствующий эксперимент проводился при неизменном значении крутящего момента и закрепленных краях цилиндрического образца. Показано, что в идеальном соединении максимум нанотвердости НР находится в середине радиуса цилиндрического образца (рис.2). Кроме этого, показано, что распределение НР по радиусу имеет осциллирующий характер. Предположение о возможности проскальзывания образца на краях и в центре позволило объяснить несимметричность экспериментальных значений нанотвердости относительно середины радиуса и сдвиг максимума нанотвердости.

1. Straumal B.B., Kilmametov A.R., Korneva A., Zieba P. , Zavorotnev Y., Metlov L., Popova O., Baretzky B. // Crystals, V.11, P.766-778 (2021).



УДК 539.5

**ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ
ИНТЕНСИВНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Малашенко В.В.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
malashenko@donfti.ru

В докладе изложены основные положения теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД), позволившей с единых позиций решить широкий круг задач по высокоскоростной пластической деформации, объяснить ряд экспериментально наблюдающихся закономерностей, а также предсказать новые динамические эффекты, что может оказать стимулирующее влияние на целенаправленную постановку новых экспериментов [1-3]. В частности, была объяснена линейная, корневая и *N*-образная зависимость динамического предела текучести от концентрации легирующей примеси, немонотонная скоростная зависимость, имеющая максимум, немонотонная зависимость от плотности дислокаций, имеющая максимум и минимум. Теория ДВД предсказывает ориентационный эффект динамического торможения дислокаций круговыми дислокационными петлями, эффект блокировки динамического торможения дислокаций точечными дефектами в приповерхностной области, эффект сухого трения при динамическом торможении дислокаций зонами Гинье–Престона и дислокационными петлями. Исследуемый механизм диссипации заключается в необратимом переходе кинетической энергии дислокации в энергию ее поперечных колебаний. Этот механизм весьма чувствителен к виду спектра дислокационных колебаний. Наличие щели в дислокационном спектре оказывает существенное влияние на динамическое торможение дислокации структурными дефектами. Спектральная щель может возникать в результате коллективного взаимодействия точечных дефектов или других дислокаций ансамбля с движущейся дислокацией, взаимодействия с поверхностью или магнитоупругого взаимодействия с магнитной системой кристалла. При этом по порядку величины спектральная щель равна отношению скорости распространения поперечных звуковых волн в кристалле к характерному масштабу взаимодействия, вносящего главный вклад в формирование спектральной щели. Теория ДВД по сути является теорией конкурирующих взаимодействий. Именно конкуренция различных взаимодействий с движущимися дислокациями за доминирующий вклад в формирование спектральной щели и полной силы динамического торможения определяет различный характер протекания неупругих процессов в кристаллических функциональных материалах. Анализ этой конкуренции позволяет сформулировать критерий возникновения экстремумов зависимостей механических свойств металлов и сплавов от характеристик структурных дефектов и скорости пластической деформации: минимум предела текучести наблюдается при смене доминирующего вклада дефектов в полное торможение дислокаций, максимум имеет место при смене доминирующего вклада в формирование спектральной щели. Развитая нами теория позволяет также выявить общие черты динамического поведения систем различной физической природы, обладающих колебательными степенями свободы. Это относится, в частности, к торможению дислокаций магнонами, торможению доменной стенки точечными магнитными дефектами, разряду ионистора, работе диода Ганна.

Теория ДВД позволяет анализировать неупругие процессы в металлах и сплавах, которые в процессе обработки и эксплуатации подвергаются высокоэнергетическим внешним воздействиям.

1. Malashenko V.V. // *Modern Phys. Lett. B.*, Vol. 23, № 16, P. 2041–2047 (2009).
2. Малашенко, В.В. // *ФТТ*, Т. 56, № 8, С. 1528-1530 (2014).
3. Малашенко, В.В. // *ФТТ*, Т. 57, № 12, С. 2388-2390 (2015).



УДК 880.3:539.386

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЗОНЕ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ
ЭКСТРУЗИИ. ВЛИЯНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Мирошниченко С.В., Гангало А.Н.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г.Донецк
svmiro@mail.ru

Физико-механические свойства материалов, получаемые методом равноканальной угловой экструзии (РКУЭ), зависят от ряда факторов, среди которых особая роль принадлежит гидростатической составляющей давления [1]. Управлять этой составляющей возможно путем изменения геометрии рабочего канала. В данной работе исследовали влияние угловых параметров пересечения каналов Φ и внешнего радиуса закругления каналов R на гидростатическое напряжение в зоне пластической деформации.

Как правило, исследователи процесса РКУЭ оценивают величину гидростатической составляющей с помощью аналитических выражений В.М. Сегала, использующего для решения схематическое представление зоны пластической деформации полями линий скольжения [2]. Однако такой подход построен на ряде допущений, предполагающих прямолинейность границ зоны пластической деформации и равномерное распределение гидростатической составляющей без учета его изменения на границах зоны деформации. Поэтому применение данного метода расчета оправдано только для приблизительных оценок или в частном случае РКУЭ, когда зона деформации вырождается в прямую линию, совпадающую с осью пересечения каналов.

Данные ограничения были устранены с использованием метода конечных элементов, который дает возможность учитывать в расчетах как развитие в зоне пластической деформации упругой зоны, так и эффект незаполнения канала деформируемым материалом, что невозможно реализовать в рамках аналитического подхода.

Численное исследование процесса осуществляли в среде ПК Deform-2D в предположении плоской деформации идеально-пластического тела в условиях трения по закону Амонтона–Кулона с коэффициентом, равным 0,1. Угловые параметры рассматривали в интервалах: $\Phi = (90^\circ - 120^\circ)$, $R = (0,05 - 1)D$, где D – ширина канала.

В результате моделирования получены картины распределения гидростатической компоненты напряженного состояния в заготовке, определены зоны концентрации напряжений и распространение их влияния. Эти данные использованы для расчета гидростатической компоненты вдоль оси зоны пластической деформации и на границах ее входа и выхода. Установлено, что с ростом угла пересечения каналов средний уровень гидростатического напряжения на оси зоны деформации уменьшается примерно на 65%, а увеличение внешнего радиуса приводит к снижению такового на 40%.

Также дана количественная оценка распределения гидростатического напряжения с использованием показателя неоднородности и коэффициента вариации. Показано, что интенсивный рост неоднородности его распределения начинается при $\Phi > 100^\circ$. Для внешнего радиуса закругления каналов неоднородность возрастает при $R > 0,5D$.

Проведенные исследования позволили расширить представление о влиянии угловых характеристик канала на распределение гидростатического напряжения в зоне пластической деформации. Понимание принципа его изменения даст возможность контролировать его уровень и распределение, что позволит упростить задачу оптимизации процесса РКУЭ.

1. Валиев Р.З., Жиляев А.П., Лэнгдон Т.Дж. *Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения*. СПб.: Эко-Вектор, 2017. 479 с.
2. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. *Процессы пластического структурообразования*. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 232 с.



УДК: 678.7

ВЛИЯНИЕ МНОГОСТАДИЙНОЙ ПРОКАТКИ НА МОЛЕКУЛЯРНУЮ СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ ЛЕНТ СВМПЭ

***Дроботько В.Ф.¹, Мясникова Л.П.², Варюхин В.Н.¹, Макмак И.М.¹, Марихин В.А.²,
Ткаченко В.М.¹, Терехов С.А.¹***

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина, Донецк.

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург.

liu2000@mail.ru

В настоящее время интенсивно развивается твердофазный метод переработки реакторных порошков (РП) сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в высокопрочные изделия, альтернативный дорогостоящему и экологически небезопасному методу гель-технологии. Твердотельная прокатка частично-кристаллических полимеров с последующим ориентационным упрочнением позволяет осуществить непрерывный процесс производства ориентированных высокомолекулярных пленок, лент и листов [1]. Важными переменными этого процесса являются температура валков, толщина исходного листа, средняя скорость деформации при прохождении валков (скорость вращения валков, диаметр валков) и исходное морфологическое состояние монолитизированного порошка, дополнительно спеченного при температуре ниже температуры плавления полимера после компактирования [2].

В работе проведены систематические исследования влияния скорости и температуры валков, используемых при многостадийной прокатке спеченных реакторных порошков СВМПЭ (серия 5230), на физико-механические свойства прекурсоров, получаемых на разных стадиях прокатки с использованием шип-паза.

При многостадийной горячей прокатке ($T=128^{\circ}\text{C}$ и $T=131^{\circ}\text{C}$) спеченных образцов в валковом прессе с последовательно уменьшающимися зазорами между валками (280, 200, 100 и 50 μm) и при различных скоростях прокатки (5, 50 и 167 mm/s) показано, что морфозы слоевого типа, предположительно состоящие из кристаллических ламелей под действием сдвиговых усилий, развивающихся в полимере при прохождении узкого зазора между валками, перестраиваются постепенно в пачки макрофибрилл. На молекулярном уровне должны происходить два физических процесса: перестройка структуры из ламеллярной в микрофибриллярную с разворачиванием цепей в направлении ориентации, а затем – пластическая деформация микрофибриллярной структуры.

При существенном увеличении скорости прокатки до 183 mm/s и в более широком интервале температур 68–128 $^{\circ}\text{C}$ также наблюдается рост параметра кристаллографической плоскостной ориентации «crystallographic plane orientation» (КРО), который сопровождается увеличением модуля упругости (от 2 до 3.1 ГПа) и предела прочности при разрыве (от 84.2 до 242.4 МПа).

С увеличением средней скорости деформации до $\sim 22\text{--}36\text{ s}^{-1}$ достигаемые значения упругих модулей и пределов прочности на разрыв у лент при всех температурах меньше механических показателей лент, получаемых при меньшей скорости прокатки.

Модуль упругости и предел текучести коррелируют с пределом прочности при прокатке как линейные функции, независимые от температуры (85, 116 и 124 $^{\circ}\text{C}$) и скорости деформации (1.1 - 36.1 s^{-1}).

Результаты данного исследования могут способствовать улучшению проектирования и прогнозирования механических характеристик компонентов и конструкций из СВМПЭ.

1. Е. К. Голубев, Т. С. Куркин, А. Н. Озерин. // Известия Академии наук, Серия химическая, Т. 72, № 3, С.749-762, (2023).

2. В.А. Марихин, Л.П. Мясникова; Под ред. д-ра физ.-мат. наук С.Я. Френкеля. - Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1977. - 238 с.



УДК 669.539.620+534.29

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Ломач М.С.

ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси»,
г. Витебск
ita@vitebsk.by

Равноканальное угловое прессование (РКУП) представляет собой один из популярных методов интенсивной пластической деформации металлов и сплавов. Этот процесс позволяет получать объемные заготовки с размером зерен, варьирующимся от единиц микрон (ультрамелкозернистые) до десятков и сотен нанометров [1]. Суть метода заключается в продавливании заготовки через пересекающиеся каналы матрицы с одинаковой площадью поперечного сечения [1, 2]. Многократное продавливание заготовки через эти каналы способствует контролю структуры и механических свойств обрабатываемых материалов. В зависимости от характеристик обрабатываемого материала возможны предварительный нагрев заготовки, а также вращение её вдоль продольной оси.

Одним из методов уменьшения деформационных напряжений при обработке металлов давлением является наложение ультразвуковых колебаний (УЗК), для чего разрабатываются различные устройства и схемы передачи ультразвука к зоне деформации. Ультразвуковое воздействие в процессе обработки материалов приводит к изменению их структуры и физико-механических свойств. В зависимости от частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний, а также от локальности воздействия возможно как упрочнение металла, так и его разупрочнение. В Институте технической акустики Национальной академии наук Беларуси спроектировано оригинальное устройство для ультразвукового РКУП, в котором волновод с матрицей выполнены как единое целое, а элементы крепления волновода расположены в узловой плоскости механических смещений стоячей волны, возбуждение которой происходит непосредственно в матрице и заготовке в процессе прессования [3]. Это позволило повысить эффективность ультразвукового воздействия за счет снижения сил трения между поверхностью заготовки и поверхностью каналов матрицы, а также за счет снижения деформационных усилий в зоне пересечения каналов матрицы, где происходит простой сдвиг деформируемого металла. Установлено, что наложение УЗК при РКУП цинка и алюминиевого сплава А7 приводит к снижению усилия прессования в 1,5 раза. Структура прессуемых материалов изменяется после одного прохода РКУП с УЗК: наблюдается уменьшение размера зерен и изменение их кристаллографической ориентировки. Выявлено повышение механических свойств деформируемого металла, увеличение микротвердости. Изменения фазового состава для всех образцов, полученных РКУП с УЗК и без УЗК, не наблюдается.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T22КИТГ-011).

1. Сегал В.М., Резников В. И., Копылов В. И. и др. *Процессы пластического структурообразования металлов*, Минск: Наука и техника, 1994, 232 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией*, М.: Логос, 2000, 272 с.
3. Рубаник В.В., Рубаник В.В., Ломач М.С., Луцко В.Ф. *Пресс для равноканального углового прессования: описание к полезной модели к патенту Республики Беларусь № BY 13457*, 2024. 6 с.



УДК 621.762

ДИФФУЗИЯ ПРИ СПЕКАНИИ И ДЕФОРМАЦИИ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК

Рябичева Л.А., Бабич И.Н., Белозир И.И.

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск

При спекании порошковых пористых заготовок наблюдаются процессы диффузии, за счет которых происходит образование связей между частицами порошка. Для характеристики процессов диффузии применяют законы Фика, связывающие величины направленного потока атомов с вынуждающим его градиентом концентрации. Пластическая деформация при различных температурно-скоростных условиях способствует ускорению диффузионного взаимодействия и влияет на процесс гомогенизации порошковых материалов.

Целью работы является анализ процесса диффузии при уплотнении порошковой пористой заготовки при различных температурно-скоростных условиях на основе математической модели, учитывающей взаимосвязь параметров диффузии и деформирования.

Для анализа одномерной диффузии использовали второе уравнение Фика, решение которого осуществляли методом функций Грина. Этот метод заключается в нахождении функции Грина и проверке его законности дифференцированием под знаком интеграла необходимое число раз. Функция Грина является решением второго уравнения Фика и зависит от координаты, времени и точности вычислений. Для решения уравнения диффузии использовали начальные и граничные условия изменения концентраций во времени.

Полученное выражение математической модели диффузии в порошковой пористой заготовке связывает концентрацию диффундирующего вещества со временем процесса диффузии и координатой, в направлении которой происходит диффузия. Это выражение дает возможность определить концентрацию компонентов в диффузионной зоне и сравнить ее с экспериментальными значениями.

Экспериментальные исследования выполнены на образцах, изготовленных из механической смеси порошка меди ПМС-1 и порошка титана ВТ1-0. Массовая доля титана составляла 0,5 %, пористость 5 % и 10 %. Получено, что коэффициент диффузии меди D_{Cu} на порядок больше, чем титана D_{Ti} , что свидетельствует о преимущественной диффузии меди в титан. После спекания коэффициенты диффузии принимают наименьшие значения и несколько увеличиваются в результате деформации. При спекании с ростом исходной пористости коэффициенты диффузии уменьшаются и составляют $D_{Cu} = 0,65 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$, $D_{Cu} = 0,54 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно при пористости 5 и 10 %. Температура деформации оказывает значительное влияние на величину коэффициентов диффузии. При температуре деформации, соответствующей температуре возврата (100 °С), наблюдается начало диффузионного взаимодействия, в результате чего коэффициент диффузии D_{Cu} увеличивается в 1,6-2 раза, а D_{Ti} – в 1,3-1,8 раза по сравнению с их величиной после спекания.

Температура начала интенсивной диффузии соответствует температуре начала рекристаллизации. Ускорение диффузии при 600 °С приводит к образованию дополнительного числа свободных вакансий благодаря увеличению количества и миграции большеугловых границ, вдоль которых диффузия идет с максимальной скоростью. С ростом температуры деформации от 100 до 600 °С величина D_{Cu} возрастает в 2,5 раза, а D_{Ti} – в 2 раза, что свидетельствует об интенсификации процесса диффузии.

С увеличением скорости деформации коэффициенты диффузии увеличиваются вследствие увеличения энергии активации процесса деформации.



УДК 880.3:539.386

**ВЛИЯНИЕ РАЗОВОЙ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМЦ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
ОБРАБОТАННОГО РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ**

***Сенникова Л.Ф., Гангало А.Н., Свиридова Е.А., Васильев С.В., Ткаченко В.М.,
Климова Е.Х.***

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
ludsennikova@mail.ru

Известно, что обработка металлов методами интенсивной пластической деформации (ИПД) является одним из наиболее перспективных методов получения материалов с высокими физическими и механическими свойствами, так как приводит к формированию нано- или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Методы ИПД позволяют достигать высоких пластических деформаций, сохраняя заготовку практически в неизменном виде. Один из известных методов ИПД – равноканальное угловое прессование (РКУП) [1]. Однако эти методы не являются формообразующими, а предназначены для формирования структуры и свойств материала. Для дальнейшего получения из этих заготовок изделий необходимо использовать традиционную обработку металлов давлением (ОМД). Поэтому в последнее время получение нано- и УМЗ-структуры металлов все больше концентрируется на комбинации методов ИПД и традиционных ОМД. Одним из перспективных методов ОМД является гидроэкструзия (ГЭ). Особенностью метода является выдавливание заготовок жидкостью высокого давления. При ГЭ снижаются силы трения в очаге деформации и тем самым повышается качество получаемого изделия. Кроме того, ГЭ можно существенно повысить прочностные свойства материала.

Цель данной работы – изучить влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства сплава АМц, предварительно деформированного РКУП.

Материалом для исследований служил промышленный горячепрессованный пруток алюминиевого сплава АМц. Образцы сплава отжигали при температуре 400⁰С и деформировали, используя 8 переходов РКУП и его комбинацию с ГЭ, с разовой степенью деформации $e = 0,3; 0,6; 0,9; 1,2$. РКУП осуществлялось с использованием пресса силой 100 т.с. при комнатной температуре с применением контейнера с рабочим диаметром каналов 20 мм и углом пересечения $\theta = 90^\circ$ по схеме В_с (с поворотом заготовки на 90⁰ вокруг своей оси). Деформация за один проход РКУП $e \sim 1$. Гидроэкструзию осуществляли при комнатной температуре. В качестве рабочей жидкости было выбрано индустриальное масло И30. Для реализации процесса ГЭ использовались прессы силой 500 и 100 т.с.

В результате пластической деформации по комбинированной схеме обработки с увеличением разовой степени деформации ГЭ наблюдается монотонное повышение прочностных свойств сплава. При увеличении разовой степени деформации до $e = 1,2$ получено значительное (в 1.9 раз) упрочнение алюминиевого сплава АМц по отношению к отожженному состоянию материала. Пластичность остается на удовлетворительном уровне. Предполагается, что основной вклад в упрочнение вносит фаза Al₆(Mn,Fe). Прочность этой фазы при деформации может увеличиваться до 48% [2]. Она является своего рода «арматурой» для структуры алюминиевой матрицы, поскольку она более плотная и ее частицы некогерентно связаны с алюминиевой матрицей, т.к. имеют другой тип кристаллической решетки.

1. Валиев Р.З., Жилиев А.П., Лэнгдон Т. Дж. / Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы применения. Санкт-Петербург, Эко-Вектор, 2017, 479 с.
2. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. / Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Киев, «Наукова думка», 1989. - 255 с.



УДК 538.9:53.091:539.374.6

**ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ
МЕДИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Ткаченко В.М., Варюхин В.Н., Сапронов А.Н.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
v.tkachenko@mail.ru

Материалы с нано- и субмикрокристаллической структурой обладают уникальными физическими и механическими свойствами [1,2], которые широко востребованы в машиностроении, медицине, строительстве и других отраслях. Одним из эффективных способов достижения мелкозернистого структурного состояния в металлических материалах является применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Суть этих методов заключается в многократной обработке массивной заготовки в специальной оснастке с сохранением первоначальных формы и размеров обрабатываемого материала, что позволяет накапливать в нем большие степени деформации за определенное количество циклов обработки.

Зависимость изменения структурных параметров и механических свойств от величины накопленной деформации, как правило, носит немонотонный характер с выходом на насыщение данных параметров при достижении определенной величины деформации. При изменении условий внешних механических воздействий в субмикрокристаллических металлах происходят дальнейшие перестройки тонкой структуры и совершенствование механических свойств [3,4].

Для получения в меди субмикрокристаллического состояния в данной работе используются такие методы ИПД, как винтовая экструзия и кручение под высоким давлением. Внешнее механическое влияние на субмикрокристаллическую медь создается путем воздействия традиционными методами обработки металлов давлением (прокатка и осадка), а также с помощью ультразвуковой обработки. Расчет напряженно-деформированного состояния материала при деформационной обработке осуществлялся методом конечных элементов. Структурные исследования проводились с помощью просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Прочностные свойства образцов определялись путем измерения микротвердости в разных сечениях образца и испытаний на растяжение.

Проведенные исследования влияния комбинированных методов обработки, сочетающих методы ИПД и один из традиционных методов обработки металлов давлением, на изменения структуры и прочностных свойств меди показали более высокую эффективность применения данных методов обработки по сравнению с одностадийными методами. Применение комбинированных методов обработки способствует дальнейшему преобразованию кристаллической структуры материалов и повышению комплекса механических свойств.

Представлены схемы для ультразвуковой обработки субмикрокристаллической меди, полученной методами винтовой экструзии и кручения под высоким давлением и предложен способ подключения ультразвукового оборудования к установке винтовой экструзии для совместного воздействия этих методов.

1. Валиев Р.З., Александров И.В. *Объемные наноструктурные металлические материалы*, М: Академкнига, 2007, 398 с.
2. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. // *Progress in Materials Science*, V.53, P.893–979 (2008).
3. Palyanskaya E. G., Myshlyayev M. M., Varyukhin V. N. and all // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics*, Vol. 73, No.9, P. 1249-1252 (2009).
4. Сенникова Л.Ф., Волкова Г.К., Ткаченко В.М. и др. // *Вопросы материаловедения*, Т.105, №1, С. 21-27 (2021).



УДК 621.77, 620.172

ВЛИЯНИЕ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ

Яшарова Е.В.^{1,2}, Гангало А.Н.^{1,3}, Сенишкова Л.Ф.¹, Бурховецкий В.В.¹, Глазунова В.А.¹,
Суравицкий В.Д.,¹ Ткаченко В.М.¹

¹ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

²ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк

³ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк

yasharova.liza@yandex.ru

Одним из перспективных процессов традиционной обработки давлением является гидроэкструзия (ГЭ). Этот метод позволяет проводить обработку с высоким уровнем гидростатических давлений, реализовывать большие разовые степени деформации, в результате чего в значительной мере повышаются прочностные свойства металлических материалов [1]. Большинство работ по ГЭ направлено на исследование влияния процесса на изменения механических свойств крупнозернистых материалов. В то же время особенности влияния ГЭ на механические свойства материалов с малыми размерами зерна, исследованы недостаточно. Цель данной работы оценить влияние гидроэкструзии на механические свойства в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии заготовок.

В качестве материала для исследования использовалась медь марки М06 с размером равноосных зерен 200-300 нм. УМЗ-состояние материала было достигнуто после интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП). Механические свойства в исходном состоянии $\sigma_b=434$ МПа, $\delta=19,3\%$.

Для реализации ГЭ использовалась установка с рабочим диаметром контейнера $D_k=22$ мм. Исследуемые заготовки продавливались через коническую матрицу диаметром $D_m=11$ мм. Величина разовой степени деформации ГЭ определена $\varepsilon = \ln(D_0^2/D_m^2) = 0.3 \dots 1.2$, где D_0 – исходный диаметр, на который предварительно токарной обработкой протачивались заготовки из УМЗ-меди с шагом $\varepsilon = 0.3$.

Механические свойства оценивали испытаниями на растяжения, для этого из обработанного ГЭ материала вытачивались образцы по ГОСТ 1497–84 с диаметром разрывной части 5 мм. Также применялся фрактографический анализ поверхности разрыва образцов с помощью визуального осмотра и сканирующей электронной микроскопии.

Фрактографический анализ показал, что в исходном состоянии УМЗ-медь после РКУП разрушается по типу вязкого конического излома под углом к оси нагружения $\alpha=50^\circ$ с одной волокнистой зоной разрушения, проекция излома перпендикулярная к оси нагружения имеет овальную форму с изопериметрическим коэффициентом $k_f=0.81$, что, по-видимому, связано с приобретенной материалом текстурой в процессе РКУП. Применение ГЭ даже при малых значениях деформации $\varepsilon = 0.3$ приводит к переходу на тип разрушения «чашка-конус» с образованием дополнительной зоны среза. Увеличение разовой степени деформации ГЭ до $\varepsilon = 1.2$ приводит к постепенному переходу в тип разрушения «чашка», увеличению: угла излома с $\alpha=50^\circ$ до $\alpha=90^\circ$; изопериметрического коэффициента с $k_f=0.81$ до $k_f=0.98$; доли зоны среза с $\gamma=0$ до $\gamma=0.53$. Полученные результаты указывают, что при ГЭ с $\varepsilon = 1.2$ происходит полный переход УМЗ-меди в аксиальную текстуру.

Прочностные свойства меди увеличиваются с накоплением деформации ГЭ вплоть до $\varepsilon = 0.9$ и достигают $\sigma_b=477$ МПа. При деформации ГЭ свыше $\varepsilon = 0.9$ идет падение прочностных свойств, связанное с процессами возврата вследствие деформационного разогрева. Это подтверждается увеличением относительного удлинения, которое возрастает с $\delta=18,9\%$ при $\varepsilon = 0.9$ до $\delta=21\%$ при $\varepsilon = 1.2$.

1. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Спусканюк В.З. Теория и практика гидроэкструзии. Киев: Наукова Думка, 2007. – 245 с.



УДК 662.697

ТЕПЛОАККУМУЛЯТОР НА ОСНОВЕ ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Соболь О.В., Савенков Н.В., Греднев Д.С., Борисов Д.В., Костровский М.О.

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

o.v.sobol@donnasa.ru

В современной энергетике к числу актуальных и наиболее интенсивно разрабатываемых направлений с использованием разных веществ относятся аккумулирование теплоты на основе фазовых превращений; применение кристаллогидратов различных солей, низкомолекулярных органических соединений, сплавов цветных металлов для создания теплоаккумулирующих аппаратов ТА. Их используют в приборостроении для снятия тепла при больших тепловых нагрузках, для защиты электронных приборов от перегрева, для стабилизации температур в помещении. В теплоэнергетике они служат для рационального использования тепловой энергии и аккумулирования солнечного тепла, для сглаживания суточных и сезонных пиков потребления энергии, снижения энергетических затрат. Сейчас появилась необходимость в аккумуляторах тепла для хранения и транспортировки медицинских препаратов и пищевых продуктов, для поддержания температуры в кабинах автомобилей и летательных аппаратов, в скафандрах для летчиков, космонавтов и водолазов.

Теплоаккумулятор с применением фазопереходных теплоаккумулирующих материалов (ФПТАМ) работает следующим образом. Принудительная циркуляция теплоносителя в гидравлическом контуре системы отопления осуществляется с помощью насоса через нагреватель и радиатор обогрева (рис. 1). При этом движение теплоносителя во внутреннем объеме корпуса ТА организовано через межтрубное пространство групп (каскадов) трубок последовательно. Нагрев («зарядка») до полного расплавления ФПТАМ, расположенных во внутреннем пространстве трубок всех каскадов, осуществляется от внешнего источника энергии (для этого может применяться электрическая энергия, природный или нефтяной газ, жидкое углеводородное топливо, разогретый пар и т.д.). Обогрев осуществляется за счет отбора теплоты от радиатора, которая отводится от теплоносителя, нагреваемого в межтрубном пространстве корпуса ТА за счет разницы температур с внешней поверхностью трубок до момента полной кристаллизации и последующего охлаждения («разрядки») расположенных в их внутреннем пространстве ФПТАМ. Трубки разделены перегородкой на группы (каскады) (рис. 2), отличающиеся температурами фазового перехода теплоаккумулирующих материалов – от максимальной $t_{\max} \approx 80^\circ\text{C}$ до минимальной $t_{\min} \approx 20^\circ\text{C}$. Получаемый в итоге ступенчатый (каскадный) режим работы ТА, особенностью которого является последовательная разрядка (отдача тепла) трубок, позволяет длительное время поддерживать температуру теплоносителя даже при условии непостоянной работы системы терморегуляции.

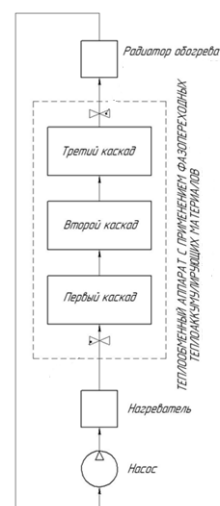


Рис.1. Принципиальная схема теплообменного аппарата с применением

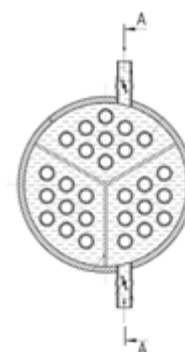


Рис.2. Основной вид ТА с применением ФПТАМ системы терморегуляции (поперечный разрез).



УДК 538.945.91

ПОДЪЁМНЫЕ СИЛЫ И ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ВАКУУМНОМ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ ВТСП

Каманцев А.П.^{1,2}, Карпухин Д.А.¹, Коледов В.В.¹, Терентьев Ю.А.¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк
kaman4@gmail.com

Больше 100 лет назад была опубликована статья замечательного русского учёного Б.П. Вейнберга: «Пятьсот миль в час. Электромагнитный способ переместиться по вакууму из Нью-Йорка в Сан-Франциско за полдня» [1]. В настоящее время идея вакуумного магнитолевитационного транспорта (ВМЛТ) приобрела еще большую актуальность. Экологичный и экономичный ВМЛТ как для грузового, так и для пассажирского высокоскоростного сообщения (до 6000 км/ч) крайне необходим для развития России в XXI веке. Смысл концепции ВМЛТ под названием «квантовый гравилёт» [2] заключается в управлении движением транспорта за счет условно-бесплатной энергии гравитационного поля Земли, что позволяет использовать процессы рекуперативного перехода потенциальной и кинетической энергий в процессе движения [3]. А также в реализованном здесь особом механизме вертикальной и боковой стабилизации движения высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) элементов за счет пиннинга вихрей. Уникальные электромагнитные свойства ВТСП керамик известны с момента их открытия в 1985 г. и изучались в том числе и в ДонФТИ [4].

В наших экспериментах криостат с ВТСП керамикой из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ левитирует над трассами из линеек постоянных магнитов (ПМ) из NdFeB , выложенных специальным образом. Для оценки силы левитации между ВТСП и ПМ запишем силу, действующую на магнитный материал в поле. Магнитная работа, совершаемая при увеличении намагниченности материала на бесконечно малую величину dM , равна $dW = VBdM$, где V – объем образца, B – приложенное поле. Магнитная работа, совершаемая при перемещении магнитного материала на бесконечно малое расстояние dz , равна $dW = F_z dz$, где F_z – z -компонента силы, действующей на образец.

$$F_z = \frac{dW}{dz} = \frac{d}{dz} (V B M) \quad (1)$$

Если образец ферромагнитный, то его намагниченность практически не зависит от приложенного поля, поэтому сила будет $F_z = V M (dB/dz)$. Градиент поля dB/dz отрицательный, поэтому сила будет притягивающей. Если образец – сверхпроводник, то намагниченность отрицательна (в направлении, противоположном приложенному полю), поэтому сила будет отталкивающей. В состоянии Мейснера намагниченность ВТСП не постоянна – она зависит от приложенного поля как $M = -B/\mu_0$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Значит сила левитации зависит как от напряженности магнитного поля, так и от градиента поля dB/dz .

$$F_z = -\frac{V}{\mu_0} \frac{d}{dz} (B) = -\frac{2V}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} \quad (2)$$

Поскольку dB/dz отрицательно, сила – положительна (ВТСП в состоянии Мейснера отталкивается от ПМ). Взяв $B = 1$ Тл и $dB/dz = -20$ Тл/м, получим, что сила на единицу объема ВТСП составляет около 30 Н/см³. Плотность $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ около 6 г/см³, поэтому сила тяжести будет намного меньше – всего 0,06 Н/см³.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2024-0007).

1. Weinberg B. // *Popular Science Monthly*, V.90 (1917).
2. Карпухин Д.А., Петров А.О., Коледов В.В. и др. // *ЖРЭ*, № 8, С. 20 (2021).
3. Карпухин Д.А., Петров А.О., Коледов В.В. и др. // *ЖРЭ*, № 11, С. 5 (2022).
4. Быков А.М., Коренивский В.Н., Ульянов А.Н. и др. // *ФТВД*, Т.2, №4, С. 77-82 (1992).



УДК 537.638.5, 536.212.2

ПАРАМЕТРЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО КЛЮЧА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МАГНИТНОМ ОХЛАЖДЕНИИ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 15-300 К

Колесов К.А.¹, Мусабилов И.И.², Коледов В.В.¹, Кузнецов А.С.¹, Маширов А.В.¹

¹ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», г. Москва

²ФГБУН «Институт сверхпластичности металлов РАН», г. Уфа

kolesovkka@mail.ru

Криогенные системы являются неотъемлемой частью многих областей науки и техники, однако управление теплом в этих системах остается сложной задачей. Тепловые ключи [1] являются устройствами, способными динамически изменять свою тепловую проводимость, обеспечивая тем самым тепловую связь во «включенном» состоянии и тепловую изоляцию в «выключенном состоянии». Данные устройства применяются, например, в системах космических аппаратов, детекторах излучения, магнитных холодильниках и других научных приложениях в широком диапазоне температур от милликельвинов до температур выше комнатных [2, 3].

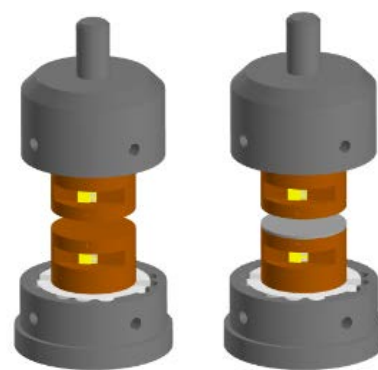


Рис.1. Механический тепловой ключ.

В данной работе исследуется процесс теплообмена в механическом тепловом ключе в условиях, приближенных к реальным, для применения в магнитном охлаждении. Изучаются тепловые характеристики механического теплового ключа, который состоит из разъемной контактной пары медь-медь, между которыми расположен термоинтерфейс из индиевой фольги толщиной 100 мкм. Рассматриваются два вида образцов, выполненных из меди, диаметром 15 мм, высотой 5 мм и 15 мм. Мы исследовали время достижения теплового равновесия «сухого» контакта между медными образцами при начальной разнице температур 3 К, 5 К и 10 К, а также влияние термоинтерфейса из индиевой фольги на время достижения теплового равновесия в диапазоне температур от 15 до 300 К. Для возвратно-поступательного перемещения подвижного медного образца до контакта с неподвижным медным образцом использовался линейный электродвигатель, с помощью которого также варьировалось усилие прижатия между медными образцами.

Экспериментальные данные позволили получить значения количества тепла, которое необходимо отобрать от объекта охлаждения, для поддержания заданной температуры. В работе также исследуются различные усилия прижатия между образцами контактной пары. Как показали результаты, использование индиевого термоинтерфейса толщиной 100 мкм существенно сокращает время наступления теплового равновесия в диапазоне температур 15-240 К при усилии прижатия 380 кПа.

1. Klinar K., Swoboda T., Rojo M.M. et al. // *Advanced electronic materials*. V.7, №.3, P.2000623 (2021).
2. Shu Q.S., Demko J.A., Fesmire J.E. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. V.278, №.1, P.012133 (2017).
3. Glaister D.S., Curran D.G.T., Mahajan V.N., et al. // *1996 IEEE Aerospace Applications Conference. Proceedings. IEEE*. V.2, P.115-127, (1996).



УДК 628.169.7

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ШАХТНОЙ ВОДЫ

Кудрявцев Ю.А., Прилипко С.Ю.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
ix@uask.biz

Керамические фильтры из оксида алюминия обладают исключительной химической стойкостью, благодаря которой их можно использовать при фильтрации отходов производств, а также термической стойкостью, позволяющей проводить регенерацию при помощи термической обработки. При этом оксид алюминия является одним из самых дешевых материалов для получения керамики.

В работе исследованы способы оптимизации режимов фильтрования и повышения эксплуатационных характеристик фильтров (рис. 1). Как видно из графика, скорость фильтрования почти линейно растет с повышением давления воды, что с учетом высокой прочности керамических фильтров (до 50 МПа) дает возможность многократно повышать их производительность по сравнению с фильтрованием без давления.

Для измерения фильтрующей способности полученной керамики применялась суспензия дезагрегированного нанопорошка углерода с минимальным размером частиц 50 нм в воде. Аналогичные исследования были проведены для пробы шахтной воды (рис. 2).

Применение керамических фильтров для механической очистки шахтной воды в составе очистных устройств экономически оправдано возможностью их восстановления. Структура материала позволяет фильтровать суспензии, в том числе с размером твердых частиц 50 нм.

Было установлено, что прочность пористых керамических фильтров позволяет применять давление до 200 кПа, что существенно повышает производительность установки.

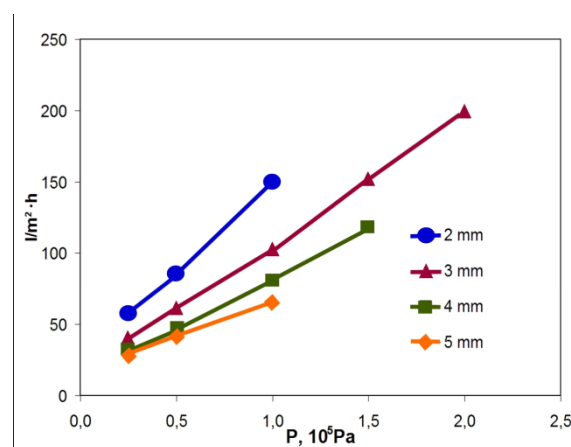


Рис.1. Производительность керамических фильтров различной толщины в зависимости от величины нагнетаемого давления. Пористость керамики 60%, температура воды 20°C.



Рис.2. Вид пробы шахтной воды до и после фильтрации.



УДК 538.91

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В 3D-ПЕЧАТИ

Нырков Н.Ю.¹, Беличко Д.Р.¹, Соколовский Я.С.¹, Наймушина Д.Е.¹, Якименко М.Н.¹,
Легенький Ю.А.²

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

²Донецкий государственный университет, г. Донецк

nekit.diver@gmail.com

Аддитивные технологии – одна из самых быстроразвивающихся отраслей в современном производстве, находящая своё применение в различных отраслях, начиная со строительства и машиностроения и заканчивая медициной. Особый интерес представляют композитные материалы, применяемые в 3D-печати, которые позволяют существенно облегчить производственные задачи по созданию деталей, не требующих постобработки, и существенно сократить производственные циклы по сравнению с классическими методами (токарная обработка, фрезеровка и т.д.). С учетом вышеизложенного технология трёхмерной печати керамическими материалами является довольно перспективной в силу трудоемкости механической обработки керамики. Применение технологий аддитивного производства помогает удешевить и упростить получение изделий сложных форм из керамических материалов.

Целью данной работы является получение композита на основе фотополимерной смолы и порошка $\text{Al}(\text{OH})_3$ для дальнейшего применения в фотополимерной 3D-печати методом DLP.

Для получения композита за основу была взята «чистая» фотополимерная смола Jewelry J-Cast производства HARZ Lab. Проведены ИК-спектроскопия данной смолы для уточнения исходного состава и сравнение с «эталоном» —стоматологической смолой Dental Sand Pro от HARZ Labs, содержащей керамический наполнитель. Далее на основе полимера была получена серия образцов путем добавления порошка $\text{Al}(\text{OH})_3$ в смолу.

В ходе работы были проведены измерения диэлектрической проницаемости серии образцов, показанные на рис. 1, и их механических свойств.

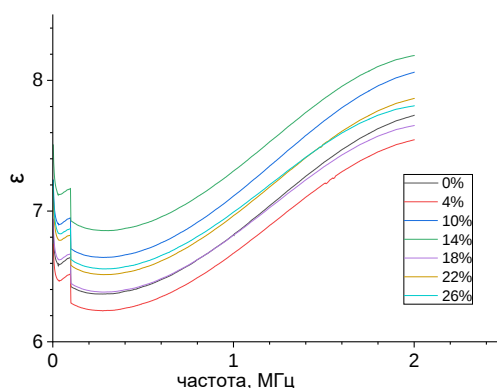


Рис. 1. Сравнение диэлектрической проницаемости фотополимерных композитов с разной концентрацией наполнителя

В ходе исследования было выявлено, что изменение диэлектрической проницаемости композита несущественно изменяется с увеличением доли наполнителя при повышении механических свойств материала, что делает данный материал интересным для применения в радиоэлектронике и создания на его основе волноводов сложных форм.



УДК 532.78:539.214:539.319

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛЕНТ ПРИПОЯ Cu-10Ag-37Zn , ПОЛУЧЕННЫХ ПРОКАТКОЙ И ЗАКАЛКОЙ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Свиридова Е.А.^{1,2}, Васильев С.В.^{1,2}, Гангало А.Н.^{1,3}, Янчев А.И.¹, Соколовский Я.С.¹,
Бурховецкий В.В.¹, Чернявская Н.В.¹, Ткач В.И.¹

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

²Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

³Институт физики горных процессов, г. Донецк

ksvir@list.ru

Тройные сплавы системы Ag-Cu-Zn широко используются в промышленности в качестве припоев для плавки стали и бронзы. Однако остаются актуальными задачи как разработки новых композиций с пониженным содержанием серебра, так и получения сплавов в форме, удобной для практического применения (например, пластин, тонких прутков или лент), что особенно важно для автоматической пайки.

Методами рентгенографии, сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, измерения микротвердости и испытаний на трехточечный изгиб были проведены исследования фазового состава, структуры и механических свойств лент припойного сплава Cu-10Ag-37Zn , полученных методами обработки металлов давлением (горячим прессованием и прокаткой с промежуточными отжигами) и непосредственно из расплава методом спиннингования.

Установлено, что впервые полученная путем быстрого охлаждения расплава со скоростью $2.4 \cdot 10^4$ К/с лента припоя Cu-10Ag-37Zn имеет такой же фазовый состав (г.ц.к. твердые растворы на основе Cu (α) и Ag (α') и на основе о.ц.к. β -фазы Юм-Розери), как и лента, полученная прокаткой, однако с более низким содержанием α -твердого раствора, повышенным содержанием β -фазы и более мелкодисперсной структурой. При этом прокатанная лента разрушается после деформации 4.6%, в то время как лента, полученная закалкой из расплава, не только деформируется без разрушения, но и выдерживает полный загиб на 180° с нулевым радиусом. Аналогичный уровень пластичности приобретает прокатанная лента после получасового отжига при 500°C , что обусловлено снижением величины микронапряжений в α -твердом растворе и β -фазе.

Одностадийный характер процесса, высокая производительность метода спиннингования расплава и приемлемый уровень механических характеристик (микротвердость 1.81 ГПа в сочетании с высокой пластичностью) быстроохлажденной ленты промышленного припойного сплава Cu-10Ag-37Zn свидетельствуют о перспективности применения этого метода для получения пластичных лент припойных сплавов.

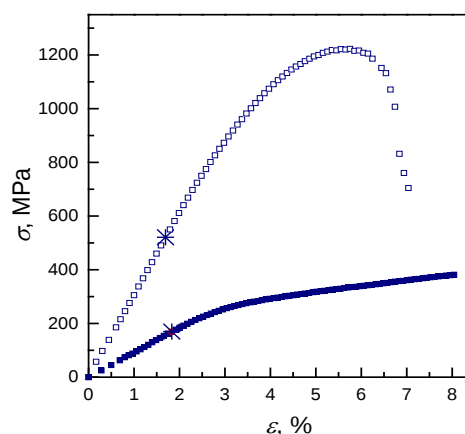


Рис.1. Испытания на трехточечный изгиб прокатанной (светлые символы) и быстроохлажденной (сплошные символы) лент сплава Cu-10Ag-37Zn (звездочками показаны пределы пропорциональности)



УДК 537.622.6

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ НА МАГНИТНЫЕ БИОКЛЕТКИ В ПЛЕНКЕ ФЕРРИТА-ГРАНАТА

Сирюк Ю.А.¹, Капиуков Р.А.¹, Кононенко В.В.², Легенький Ю.А.¹

¹ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк

²ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк

juliasiryuk@gmail.com

Экспериментально исследовано влияние индуцированных магнитным полем фазовых переходов в решетке цилиндрических магнитных доменов магнитоодносной пленки феррита-граната на особенности поведения магнитных биоклеток.

В настоящее время публикуется много работ, связанных с направленной транспортировкой коллоидных частиц по поверхности доменной структуры пленки феррита-граната [1]. Перемещение парамагнитных частиц происходит под влиянием внешних магнитных полей. Но эти поля влияют и на доменную структуру, вызывая в ней фазовые переходы (ФП). Такое влияние необходимо учитывать.

Цель работы – изучить особенности поведения парамагнитных коллоидных частиц на поверхности пленки при индуцированных магнитным полем фазовых переходах в доменных структурах. Результаты исследования могут быть использованы в разных областях науки: в микроэлектронике – запись и хранение информации; в биологии и медицине – направленная транспортировка биологических частиц, т.е. локальное лечение; в химии – сортировка частиц по их размерам.

Для исследования выбрана пленка с развитой поверхностью $\langle 111 \rangle$, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке состава $(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$. При температуре $T=300$ К намагниченность насыщения $4\pi M_S = 258 \cdot 10^4$ Тл, фактор качества $Q > 5$. В качестве магнитных частиц используются магнитомаркированные ионами Fe_3O_4 дрожжевые клетки *Saccharomyces cerevisiae*. Решетка цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) создается импульсным магнитным полем. На доменную структуру действуют два магнитных поля: 1 – поле смещения H_{cm} (перпендикулярно плоскости пленки, двух направлений); 2 – циркулярное поле в плоскости пленки. Раствор с биомангнитными клетками наносится на поверхность доменной структуры. Доменная граница (ДГ) генерирует сильный локальный градиент магнитного поля, который оказывает влияние на особенности поведения магнитомаркированных биологических клеток. Биоклетки выстраиваются вокруг границ ЦМД. Под действием циркулярного магнитного поля биоклетки совершают локальные движения вокруг ЦМД. Такое движение наблюдается в области намагниченности пленки $4\pi M_S = (\sim 01, +0,22)$ как в отсутствии поля смещения, так в его присутствии в пределах $H_{cm} = (-10 + 45)$ Э. При $H_{cm} > 45$ Э, антипараллельном намагниченности внутри ЦМД ($\uparrow H_{cm} \downarrow M_S$), в решетке ЦМД происходит фазовый переход первого рода; при этом исчезает каждый центральный домен гексагональной упаковки. Биоклетки хаотически распределяются по поверхности доменной структуры. При увеличении поля смещения, сонаправленного с намагниченностью внутри ЦМД ($\downarrow H_{cm} \downarrow M_S$), происходит фазовый переход второго рода: каждый ЦМД приобретает форму шестиугольника, а решетка переходит в сотовую структуру. При дальнейшем увеличении поля смещения ($H_{cm} > 10$ Э) в сотовой структуре происходит фазовый переход первого рода в ячеистую структуру.

Выводы. Доменные границы очень чувствительны к изменению внешнего магнитного поля и температуры. В них происходят фазовые переходы, которые вызывают фазовые переходы в самой доменной структуре. А поскольку доменная граница генерирует сильный градиент локального магнитного поля, она притягивает к себе магнитные биоклетки, которые визуализируют картину происходящих фазовых переходов. Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 124012400345-8).

1. Tierno P., Johansen T.H., Fischer T.M. // *Phys.Rev.Lett.*, Vol.99., P. 038303 (1-4) (2007).



УДК 538.91

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРНО-КЕРАМИЧЕСКОГО ПРУТКА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Соколовский Я.С., Беличко Д.Р., Ныркoв Н.Ю., Ковалёв О.Е., Шевелёва А.В.

ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк
yaroslav.sokolovskiy.80@mail.ru

Одним из наиболее перспективных направлений получения изделий из керамических материалов является аддитивное производство, при котором изделия изготавливают путем послойного наращивания. Это обусловлено тем, что многие виды керамики имеют чрезвычайно высокую температуру плавления и этот факт не позволяет использовать доступные технологии для литья металлов и полимеров. Кроме того, трёхмерная (3D) печать позволяет задавать сложную геометрическую форму как внешней поверхности изделия, так и внутренней, а также достигать необходимого уровня пористости.

Выбранное экспериментальное направление - метод послойного наплавления материала (FDM-технология). Принцип работы технологии послойного наплавления следующий: твердый термопластичный материал в виде прутка проталкивается роликами через небольшое нагретое сопло, где он плавится, а затем наносится в виде тонкого слоя на подложку. Сопло перемещается в соответствии с составленной программой, твердая форма медленно изготавливается слой за слоем, и получается уже готовый образец (рис. 3).

В качестве наполнителя было решено использовать порошок оксида алюминия дисперсный марки MITALOX A-95-1.5-LS производства ООО «МИКРОИНТЕК». В качестве связующего использовалась смесь порошков сэвилена и стеарата цинка. Массовая доля наполнителя составляла 65%. Полученная смесь засыпалась в шнековый экструдер (рис. 1), с помощью которого и получался композитный пруток (рис. 2). На стадии получения прутка основными параметрами являлись прочность, гибкость и температура, при которой материал становится достаточно текучим для 3D-печати образцов.

Основные технологические параметры:

- 1) температура экструзии филамента 115 - 145°C;
- 2) температура сопла 3D-принтера 200 - 210°C;
- 3) скорость перемещения сопла 3D-принтера 10 мм/с.



Рис.1. Шнековый экструдер
и блок управления



Рис. 2. Композитный пруток
с содержанием 65% масс.
порошкового материала Al_2O_3



Рис.3. Образец в виде
таблетки, напечатанный
на FDM 3D-принтере

1. Патент на изобретение RU 2760015 C1 / Анохин А.С., Стрельникова С.С., Ермакова Е.А., Иванов В.С., Александрова Д.С. и др., ИМЕТ РАН, 22.11.2021.
2. Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R. // *Progr. Mater. Sci.*, V.116, P.100736 (2021).



УДК 62-713.1

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Ткаченко А.М.

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк

Проблема дефицита воды в ДНР вызвала необходимость разработки альтернативных способов охлаждения приборов, требующих значительных объёмов воды, в частности просвечивающего электронного микроскопа JEM 200A, предназначенного для измерения линейных размеров фазовых и структурных составляющих металлов и сплавов, композиционных и полимерных материалов, порошков, локального микрорентгеноспектрального анализа, определения параметров кристаллических решеток.

Один из вариантов решения этой проблемы – подключение прибора к автономной системе охлаждения. Для этого был произведен мониторинг насосов, подающих воду в систему. В первую очередь рассматривались варианты, имеющие небольшие размеры и снабженные регулируемыми клапанами для поддержания оптимального давления. Например, циркуляционные насосы, предназначенные для систем отопления в частных домовладениях. Но технические характеристики таких насосов не позволили получать необходимые давления для обеспечения работы микроскопа.

Окончательным вариантом выбран диафрагменный автоматический насос к электрическому опрыскивателю «Умница» (модель Н-1, 12в, 3,5 л/мин) (рис.1). В опрыскивателях, которые можно использовать в промышленных объемах, необходимое, а главное – допустимое давление может быть 3-4 бар, а в некоторых и до 6 бар, что соответствует давлению в системе водопровода и позволяет использовать данный вид насосов для охлаждения электронного микроскопа.



Рис.1. Насос диафрагменный автоматический к электрическому опрыскивателю «Умница» (модель Н-1, 12в, 3,5 л/мин).



УДК 621.793

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ
КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

***Яр-Мухамедова Г.Ш., Мукашев К., Мурадов А.Д.,
Шидеров С.Р., Джапанов Н.М.***

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, НИИ ЭТФ, Алматы, Казахстан
shariphovna@gmail.com

Особый интерес к композиционным материалам и покрытиям появился в последние десятилетия в связи с резким ростом требований к уровню эксплуатационных свойств материалов, работающих в условиях агрессивных сред, трения и износа [1]. В связи с этим разработка эффективных и экономичных способов получения наноструктурированных композиционных электролитических покрытий nano-КЭП, изучение процессов электроосаждения [2], а также исследование влияния микроструктуры [3] на свойства электролитических покрытий является одной из актуальных проблем современного материаловедения.

Целью работы является разработка технологии получения nano-КЭП и выявление оптимального режима для осаждения эффективных коррозионно-стойких покрытий для штоков и цилиндров насосов, которые используют в АО «АлЭС» ТЭЦ-1 для перекачки холодной воды. Для исследования коррозионной стойкости наноструктурированных покрытий хром-белая сажа (таблица 1) были использованы гравиметрический и потенциодинамический методы исследования.

Таблица 1. Режимы получения и состав электролита-суспензии для получения nano-КЭП

Наименование	Единицы измерения	Показатели
Хромовый ангидрид CrO_3	г/л	250,0-300,0
Серная кислота H_2SO_4	г/л	2,5-3,0
Белая сажа SiO_2	г/л	5,0 – 45,0
Температура осаждения, Т	К	303-343
Плотность тока, j	А/м^2	3,0-7,0

Установлено, что наилучшей коррозионной стойкостью обладают nano-КЭП, полученные из электролита, содержащего 20 г/л SiO_2 при плотности тока 4 А/дм^2 и температуре 333 К. Глубинный показатель коррозии составляет $0,2-0,4 \cdot 10^{-3}$ мм/год. Высокие антикоррозионные свойства проявили наноструктурированные композиционные электролитические покрытия, сформированные из электролитов с 20-30 г/л «Аэросил -300».

1. Pokhmursky V. I., Khoma M. S. The role of electrochemical factors in the initial stage of fatigue-corrosion destruction of stainless steels / Protection of Metals, Russia, Vol. 43/ issue 3, pp. 247-254, 2020.

2. Farrokhzad, M. A.; Saha, G. C.; Khan, T. I. Three-body wear performance of co-electrodeposited cermet coatings / Wear, USA, Vol. 313/ issue 2, pp. 34-42, 2024.

3. Yar-Mukhamedova, G.Sh., Belyaev, V., Mussabek, G., Sagyndykov, A. Modern state of composite coatings formation problem // 17th Int.l Multidisc. Sc Geoconf. SGEM 2021. 17 (61), 2017, Pp 233-240.



Содержание

1. Новые функциональные материалы

<i>Барбашов В.И., Юрченко В.М., Прилипко С.Ю., Брюханова И.И., Бурховецкий В.В., Волкова Г.К. Влияние допирования самарием на проводимость керамики $\text{La}_{5-x}\text{Sm}_x\text{Mo}_3\text{O}_{16+\delta}$, полученной с использованием технологии соосаждения.</i>	<i>3</i>
<i>Беличко Д.Р., Волкова Г.К., Малецкий А.В., Исаев Р.Ш., Якименко М.Н., Носолев И.К. Влияние протонного облучения на процесс структурообразования керамической системы YSZ.</i>	<i>4</i>
<i>Брюханова И.И., Глазунова В.А., Волкова Г.К., Головань Г.Н., Прилипко С.Ю. Механоактивация и температурные факторы в совершенствовании технологии изготовления алюмооксидной керамики.</i>	<i>5</i>
<i>Джаманбаева Г.Т., Махамбет И.А. Технология получения структурированного перовскита для высокоэффективных стабильных солнечных батарей.</i>	<i>6</i>
<i>Журавлев С.В., Капитанчук Е.Ю. Влияние размера частиц на свойства феррита никеля.</i>	<i>7</i>
<i>Zellele D.M., Yar-Mukhamedova G.S. Mechanical, corrosion and tribological properties of electrodeposited iron-based composition coatings.</i>	<i>8</i>
<i>Кара А.В., Громенко В.О., Журавлев С.В., Серховец А.А., Боднарчук С. Исследование образования наноразмерной алюмоцинковой шпатель.</i>	<i>9</i>
<i>Лавренюк А.С., Недёркин В.В., Шемченко Е.И. Исследование морфологии поверхности плёнок $\text{CN}_x:\text{Eu}_2\text{O}_3$ с линейными упорядоченными пучками многостенных углеродных нанотрубок.</i>	<i>10</i>
<i>Лоладзе Л.В., Брюханова И.И., Головань Г.Н., Прилипко С.Ю. Кинетика спекания композита системы $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3$.</i>	<i>11</i>
<i>Магкоев Р.Т., Пухачева Н.Е., Такаев А.А., Григорян Г.Г., Хекилаев Р.А., Григоркин Д.В., Нугзарова М.Р., Бестаева З.Н., Магкоев Т.Т., Мен Y., Behjatmanesh-Ardakani R. Металлооксидные модельные катализаторы реакции окисления монооксида углерода и возможность настройки их функциональных свойств посредством облучения высокоэнергетическими частицами.</i>	<i>12</i>
<i>Наймушина Д.Е., Лыга Р.И., Беличко Д.Р., Брюханова И.И. Влияние бензотриазола на свойства эпоксиднокремнеземных композитов.</i>	<i>13</i>
<i>Прилипко С.Ю., Гангало А.Н., Кудрявцев Ю.А., Бурховецкий В.В., Брюханова И.И., Головань Г.Н., Глазунова В.А. Роль температуры и давления прессования в упрочнении композитов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Al}$.</i>	<i>14</i>
<i>Прохоров И.Ю. Компрессионная электроактивность слоистых полимерных протонообменных мембран.</i>	<i>15</i>
<i>Садовая И.В., Алехов Ю.А., Сагдеева Ф.Н., Кара А.В. Синтез фильтровальных материалов в системе Ni--Al в поле центробежных сил.</i>	<i>16</i>
<i>Салищев Г.А. Сплавы с несколькими основными элементами: структура и свойства.</i>	<i>17</i>
<i>Самсоненко С.Н. Варисторный эффект в поликристаллических алмазных плёнках.</i>	<i>18</i>



<u>Светлаков О.Ю., Громенко В.О. Метод получения наноразмерного феррита кобальта в системе $Fe_2(SO_4)_3 + CoSO_4 + Na_2O_2$.</u>	19
<u>Тихий А.А., Жихарев И.В. Оптические исследования поликристаллических наноразмерных плёнок $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_{3-\delta}$.</u>	20
<u>Шавшина А.Н., Берестовая А.А., Светлаков О.Ю., Фидинчик Е.Ю., Моряков В.В. Синтез шпинели $CuAl_2O_4$ в системе $CuSO_4 - Al_2(SO_4)_3 - Na_2O_2$ методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.</u>	21
<u>Шаповалов В.А., Токий Н.В. Распределение ионов кобальта Co^{2+} в монокристаллах литий-галлиевой шпинели $Li_{0,5}Ga_{2,5}O_4$.</u>	22
<u>Варюхин В.Н., Мельник Т.Н., Фельдман Э.П., Юрченко В.М. Модификация закона Холла-Петча в нанокристаллических и крупнозернистых материалах: роль межзёренных и межфазных границ раздела.</u>	23
<u>Якименко М.Н., Беличко Д.Р., Малецкий А.В., Лоладзе Л.В., Зозуля А.А. Исследование влияния размеров зёрен на механические характеристики керамики ZrO_2.</u>	24

2. Теория конденсированного состояния

<u>Абрамов В.С. Влияние фоновой поправки космологического красного смещения на аморфное состояние нанобъектов.</u>	25
<u>Гордей М.М., Метлов Л.С. Кинетика магнитоструктурного фазового перехода при дополнительном учете инварианта 5-го порядка.</u>	26
<u>Гребнева Е.А. Редкие таутомеры в одноцепочечной РНК.</u>	27
<u>Коришунов М.М., Тогущова Ю.Н. Динамическая спиновая восприимчивость в сильно-коррелированной электронной системе купратов и нематической фазе ферропниктидов.</u>	28
<u>Драгунов И.Е., Пилипенко Е.А., Семенюк Ю.А., Любчанский И.Л. Применение модели Кронига-Пенни для нахождения электронных спектров сложных одномерных сверхрешёток.</u>	29
<u>Мельник Т.Н., Юрченко В.М., Давыдова И.М. Промежуточные состояния сегрегационного слоя примеси на свободной поверхности тонкой плёнки.</u>	30
<u>Пилипенко Е.А. Влияние трёхчастичного взаимодействия и деформации электронных оболочек атомов на удельную теплоёмкость сжатых кристаллов Ne, Ar и Kr.</u>	31
<u>Фёдоров С.А., Безус Ю.А., Рыбалка А.Е. Квазичастичные возбуждения в неидеальных гексагональных решётках микропор.</u>	32
<u>Самигуллина А.И., Шарафуллин И.Ф. Моделирование спиновых волн в бислойной гетероструктуре.</u>	33
<u>Самолетов А.А. Кинетические процессы с инвариантной плотностью.</u>	34
<u>Гладилин О.А., Заворотнев Ю.Д., Гуменник К.В. Распространение волны переключения при наложении интенсивной пластической деформации кручением.</u>	35
<u>Сухорукова О.С., Тарасенко А.С., Тарасенко С.В., Шавров В.Г. Связанные состояния в акустике слоистых магнитных структур.</u>	36



Сухорукова О.С., Тарасенко А.С., Тарасенко С.В., Шавров В.Г. Скрытые «тёмные» поляритонные состояния (электромагнитная прозрачность магнитной гетероструктуры в условиях многомодовой интерференции). 37

Христов А.В., Червинский Д.А., Шелест В.В. Соотношения между термодинамическими коэффициентами, полученными с использованием развёрнутой формы якобианов. 38

3. Фазовые переходы и критические явления

Васильев С.В., Свиридова Е.А., Лимановский А.И., Ткач В.И. Термодинамика и кинетика процессов зарождения и роста кристаллов в металлических стёклах $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ и $\text{Fe}_{48}\text{Co}_{32}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 39

Карпунин Д.А., Морозов Е.В., Коледов В.В., Мусабилов И.И., Алиев А.М., Гамзатов А.Г., Абдулкадиров Н.З. Кинетика намагниченности и магнитокалорические свойства в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{50,5}\text{Mn}_{33,4}\text{In}_{15,6}\text{V}_{0,5}$ вблизи точки Кюри. 40

Кузнецов Д.В. Теплоёмкость сложных оксидов переходных металлов при структурном фазовом переходе, обусловленная скачком спонтанной поляризации и намагниченности. 41

Кузнецова И.Е., Анисимкин В.И., Шамсутдинова Е.С. Исследование фазового перехода жидкость-твёрдое тело при помощи акустических датчиков. 42

Кузнецов Д.Д., Маширов А.В., Кузнецова Е.И., Прокунин А.В., Данилов Д.В., Мусабилов И.И., Коледов В.В. Особенности тонкой структуры сплавов системы Ni-Mn-In после различных термических обработок. 43

Морозов Е.В., Карпунин Д.А., Коледов В.В. Твердотельные системы охлаждения на основе эластокалорического эффекта в функциональных материалах с эффектом памяти формы. 44

Покровский В.Я. Пайерлсовский переход в квазиодномерных проводниках: почему это интересно и актуально. 45

Соболь О.В., Покинтелица Е.А. Различные виды равновесной и неравновесной кристаллизации непрерывного и дискретного типов. 46

4. Магнитные явления

Гурбанович А.В., Митюк В.И., Ткаченко Т.М., Барайшук С.М., Головчан А.В., Вальков В.И., Анисимкин С.Г. Исследование железо-марганцевых германидов методом ядерного гамма-резонанса. 47

Дадоев Н.Н., Паняев И.С., Дадоев Ю.С., Глухов И.А., Санников Д.Г. Эффект Фарадея в бигиротропных фотонных кристаллах со сложной структурой элементарной ячейки. 48

Добрыднев А.В., Безкоровый В.С. Исследование выходного сигнала феррозондового магнитометра. 49

Драгунов И.Е. Равновесная доменная структура в плёнках железоиттриевого граната со слабой анизотропией. 50



<i>Ковалёв О.Е., Головчан А.В., Беличко Д.Р., Нырков Н.Ю., Шевелёва А.В., Сафонов Р.А., Маширов А.В., Митюк В.И. Смещение характерных температур метамагнитоструктурного фазового перехода в обогащённом никелем сплав Гейслера $\text{Ni}_{57,2}\text{Mn}_{31,6}\text{In}_{11,2}$.....</i>	<i>51</i>
<i>Коледов В.В., Вальков В.И., Ветошко П.М., Шавров В.Г., Суслов Д.А., Пойманов В.Д. Взаимодействующие фазовые переходы в твердотельных материалах: природа явления, физические эффекты, применения.</i>	<i>52</i>
<i>Кузнецов А.С., Маширов А.В., Колесов К.А. Теплоёмкость, температура Дебая и магнитные свойства редкоземельного соединения DyNi_2.</i>	<i>53</i>
<i>Гурбанович А.В., Митюк В.И., Барайшук С.М., Ткаченко Т.М., Головчан А.В., Вальков В.И., Аникеев С.Г. Области существования твёрдых растворов $\text{Mn}(\text{Co})\text{ZnSb}$ и $\text{Mn}(\text{Ni})\text{ZnSb}$.</i>	<i>54</i>
<i>Мухин А.Б., Николаенко Ю.М., Мезин Н.И., Драгунов И.Е. Анизотропные магнитные характеристики плёнок железиттриевого граната специальной формы.</i>	<i>55</i>
<i>Непочатых Ю.И. Влияние ориентации в магнитном поле и размеров плёнки феррита-граната на её высокочастотные характеристики.</i>	<i>56</i>
<i>Османов С.В., Михайлова Т.В. Магнитофотонный кристалл с массивом полос из серебра.</i>	<i>57</i>
<i>Прилепский И.В., Присяжнюк А.В., Ветошко П.М., Полулях С.Н., Белотелов В.И. Обменное смещение в эпитаксиальной плёнке компенсационного ферритмагнетика $(\text{BiGdLuTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.....</i>	<i>58</i>
<i>Грибанов И.Ф., Головчан А.В., Сафонов Р.А., Ковалёв О.Е., Нырков Н.Ю. Барические особенности магнитоструктурного перехода в магнитокалорическом сплаве $\text{NiMn}_{0,89}\text{Cr}_{0,11}\text{Ge}$.....</i>	<i>59</i>
<i>Сирюк Ю.А., Безус А.В., Кононенко В.В. Фазовые переходы в решётке цилиндрических магнитных доменов плёнки феррита-граната.</i>	<i>60</i>
<i>Метлов К.Л., Тарасенко А.С., Безус Ю.А., Запорожец В.Д. Двумерная модель магнитных хопфионов.</i>	<i>61</i>
<i>Тарасенко Т.Н., Волкова Г.К., Сафонов Р.А., Бурховецкий В.В., Ткаченко В.М., Потапская О.Н., Наймушина Д.Е., Шевелёва А.В., Михайлов В.И. Структурные и магнитные характеристики твёрдых растворов мультиферроиков $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ($0.0 \leq x \leq 0.1$), полученных золь-гель методом.....</i>	<i>62</i>
<i>Холин А.А., Ветошко П.М., Павлюк Е.И., Полулях С.Н., Белотелов В.И. Особенности регистрации спектров ФМР с помощью плоских полосковых резонаторов.</i>	<i>63</i>

5. Электронные и кинетические свойства

<i>Букин Г.В., Букина К.Г., Борзенко А.П., Юрченко В.М. Исследование дисперсии оптического вращения анизотропной плёнки сверхвысокомолекулярного полиэтилена.</i>	<i>64</i>
<i>Бутько В.Г., Гусев А.А., Хачатурова Т.А. Двумерный нитрид бора. От сверхтонкой плёнки к объёмному кристаллу.</i>	<i>65</i>
<i>Окунев В.Д., Самойленко З.А., Бурховецкий В.В., Николаенко Ю.М. Ионный звук, левитация и самоорганизация потока частиц LaSrMnO в магнетронной плазме.</i>	<i>66</i>



Тарасенко Т.Н. Гриффитсоподобная фаза в легированном висмутом манганите лантана.	67
Хачатурова Т.А., Гусев А.А., Бутько В.Г., Коркишко В.В. Электронные свойства оксидных диэлектриков в гетеропереходах.	68
Шалаев Р.В., Изотов А.И., Сироткин В.В., Яковец А.А. Особенности электрических свойств контактных переходов «металл-углеродная плёнка».	69
Эфрос Н.Б., Николаенко Ю.М., Мухин А.Б., Мезин Н.И., Самойленко З.А., Пушенко Е.И., Дьяченко Т.А. Влияние аммиака на проводимость поликристаллов, толстых и тонких пленок оксида галлия.	70

6. Разработка физических основ новых технологий обработки материалов

Барбашина Е.Р., Эссельбах Р.В., Корсунов К.А. Упрочнение прокатных валков плазмотроном с жидким электродом.	71
Кемелжанова А.Е., Атчибаев Р.А. Физические основы формирования наноструктурированных электролитических покрытий.	72
Huang Maohua, Yar-Mukhamedova G.S. Influence of electrolyte composition on selective performance of SY018 Fe-Mo alloy coatings.	73
Пересадченко А.Н., Алехов Ю.А., Афанасьев В.В., Шавишина А.Н. Прочность композиционного магнитно-абразивного зерна.	74
Чурилов Г.Н., Глуценко Г.А., Николаев Н.С., Локтев А.Н., Елесина В.И. Получение наноразмерного порошка бора путём плазменной обработки.	75

7. Процессы деформации и физико-механические свойства под действием высоких давлений и внешних воздействий

Бурховецкий В.В., Гаврилов Э.Н., Дорохин Г.В., Шкуратов Б.Е., Чернявская Н.В. Морфология и механизм образования поверхностных повреждений баббитового вкладыша подшипника турбоагрегата.	76
Хаймович П.А., Андреев В.А., Киселев А.Ю., Сундеев Р.В., Белоусов Н.Н., Камаев А.О., Остропоко Е.С., Волков Г.А., Вьюненко Ю.Н. Физико-механические свойства никелида титана, прошедшего барокриодеформирование.	77
Гангало А.Н., Суровицкий В.Д., Бурховецкий В.В. Влияние прессования и волочения медно-титанового биметалла на формирование границы раздела материалов.	78
Заворотнев Ю.Д. Поведение нанотвёрдости растворов меди и титана при наложении интенсивной пластической деформации кручением.	79
Малашенко В.В. Высокоскоростная деформация металлов и сплавов в условиях интенсивных внешних воздействий.	80
Мирошниченко С.В., Гангало А.Н. Численное исследование гидростатического напряжения в зоне пластической деформации при равноканальной угловой экструзии. Влияние угловых параметров.	81
Дроботько В.Ф., Мясникова Л.П., Варюхин В.Н., Макмак И.М., Марихин В.А., Ткаченко В.М., Терехов С.А. Влияние многостадийной прокатки на молекулярную структуру и механические свойства плёночных лент СВМПЭ.	82



<u>Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Ломач М.С. Интенсификация процессов обработки металлов давлением с помощью ультразвуковых колебаний.</u>	83
<u>Рябичева Л.А., Бабич И.Н., Белозир И.И. Диффузия при спекании и деформации порошковых пористых заготовок.</u>	84
<u>Сенникова Л.Ф., Гангало А.Н., Свиридова Е.А., Васильев С.В., Ткаченко В.М., Климова Е.Х. Влияние разовой степени деформации гидроэкструзией на механические свойства сплава АМЦ, предварительно обработанного равноканальным угловым прессованием.</u>	85
<u>Ткаченко В.М., Варюхин В.Н., Сапронов А.Н. Деформационное поведение субмикрокристаллической меди в условиях внешних механических воздействий.</u>	86
<u>Яшарова Е.В., Гангало А.Н., Сенникова Л.Ф., Бурховецкий В.В., Глазунова В.А., Суровицкий В.Д., Ткаченко В.М. Влияние гидроэкструзии на механические свойства ультрамелкозернистой меди.</u>	87

8. Перспективные прикладные разработки: устройства и технологии

<u>Соболь О.В., Савенков Н.В., Греднев Д.С., Борисов Д.В., Костровский М.О. Теплоаккумулятор на основе фазопереходных материалов.</u>	88
<u>Каманцев А.П., Карпухин Д.А., Коледов В.В., Терентьев Ю.А. Подъемные силы и диссипация энергии в вакуумном магнитолевитационном транспорте на основе ВТСП.</u>	89
<u>Колесов К.А., Мусабиров И.И., Коледов В.В., Кузнецов А.С., Маширов А.В. Параметры механического теплового ключа для применения в магнитном охлаждении в диапазоне температур 15-300 К.</u>	90
<u>Кудрявцев Ю.А., Прилипко С.Ю. Применение керамических фильтров для механической очистки шахтной воды.</u>	91
<u>Нырков Н.Ю., Беличко Д.Р., Соколовский Я.С., Наймушина Д.Е., Якименко М.Н., Легенький Ю.А. Исследование фотополимерного композита на основе $Al(OH)_3$ для применения в 3D-печати.</u>	92
<u>Свиридова Е.А., Васильев С.В., Гангало А.Н., Янчев А.И., Соколовский Я.С., Бурховецкий В.В., Чернявская Н.В., Ткач В.И. Структура и свойства лент припоя $Cu-10Ag-37Zn$, полученных прокаткой и закалкой из жидкого состояния.</u>	93
<u>Сирюк Ю.А., Капиуков Р.А., Кононенко В.В., Легенький Ю.А. Влияние фазовых переходов на магнитные биоклетки в пленке феррита-граната.</u>	94
<u>Соколовский Я.С., Беличко Д.Р., Нырков Н.Ю., Ковалёв О.Е., Шевелёва А.В. Получение термопластичного полимерно-керамического прутка для 3D-печати методом послойного наплавления.</u>	95
<u>Ткаченко А.М. Оптимизация работы электронного микроскопа в экстремальных условиях.</u>	96
<u>Яр-Мухамедова Г.Ш., Мукашев К., Мурадов А.Д., Шидеров С.Р., Джапашов Н.М. Разработка рекомендаций по применению коррозионностойких наноструктурированных композиционных электролитических покрытий.</u>	97

ФГБНУ ДОНФТИ:
<http://www.donfti.ru>
283048, г. Донецк,
ул. Розы Люксембург, 72