

IV Міжнародна конференція

**ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ
ІННОВАЦІЙНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ — ФМІЕ-2023**

Facing the future



FUNCTIONAL MATERIALS
for INNOVATIVE ENERGY



ЗБІРНИК ТЕЗ

Інститут металофізики
ім. Г. В. Курдюмова
НАН України



20-21 вересня 2023

Київ, Україна

У збірнику представлено тези доповідей учасників IV Міжнародної конференції «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики. ФМІЕ–2023». Наведено основні результати експериментальних і теоретичних досліджень будови та властивостей функціональних матеріалів, самоорганізації їх структури, розробки методів одержання металів, сплавів, кераміки, композитів і напівпровідникових систем, в тому числі у наноструктурованому стані, вуглецевих наноматеріалів, плівок, покриттів і поверхневих систем, а також методів діагностики, атестації та моделювання функціональних матеріалів для інноваційної енергетики.

Для фахівців у галузі матеріалознавства, електрохімії, електроніки, наноелектромеханіки та енергетичної техніки; може бути корисною викладачам, аспірантам і студентам за спеціальністю «прикладна фізика», «матеріалознавство», «наноматеріали та нанотехнології», представникам державних і комерційних компаній, орієнтованих на сучасну, відновлювальну та екологічно чисту енергетику.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦІЇ ФМІЕ-2023

- Функціональні матеріали для традиційних енергокомплексів
- Матеріали для розподіленої та автономної, у т.ч. відновлюваної, енергетики
- Енергоефективні технології на основі надпровідних і магнітних функціональних матеріалів
- Функціональні матеріали для мереж енерготранспортування
- Функціональні матеріали, наноматеріали
- Нові методи дослідження й атестації матеріалів для енергетики
- Теоретичні та чисельні методи фізичного та хімічного матеріалознавства
- Функціональні матеріали для утилізації тепла

Зміст

Секція 1. Функціональні матеріали для традиційних енергокомплексів	8
1. <u>Semerenco Yu.A.</u> Low-temperature relaxation in kapton	8
2. <u>Никитенко Ю.О.</u> , Шаповалов В.О., Якуша В.В., Гніздило О.М. Монокристали вольфраму у вигляді порожнистих тіл обертання для сучасної енергетики	9
3. <u>Зяхор І.В.</u> , <u>Левчук А.М.</u> , Завертанний М.С., Наконечний А.О., Кольцов В.В., Шило Ю.А. Біметалічні контакти високовольтної апаратури	10
4. <u>Довгий В.Т.</u> , <u>Боднарук А.В.</u> , <u>Дмитренко В.Ю.</u> , <u>Чишко В.В.</u> Магнетні та електричні властивості мультифероїків складу $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$	11
5. <u>Дехтяренко В.А.</u> , <u>Бошко О.І.</u> , <u>Загорулько І.В.</u> , <u>Прядко Т.В.</u> Створення захисного покриття на титані від дії водневого середовища з кобальтового сплаву (сплав типу ХТН-62) додатково легованого бором.	12
6. <u>Котречко С.</u> , <u>Зацарна О.</u> , <u>Філатов О.</u> , <u>Бондарчук В.</u> , <u>Фірстов Г.</u> Явище вибухоподібного руйнування при квазістатичному стиску високоентропійних сплавів, які містять Ti, Zr, Hf	13
7. <u>Zaporozhets O.I.</u> , <u>Mykhailovskyi V.A.</u> , <u>Halkina A.A.</u> , <u>Podobnyi O.V.</u> , <u>Torba Yu.I.</u> , <u>Pavlenko D.V.</u> Ultrasound testing of elastic, textural, and mechanical properties of aviation materials	14
8. <u>Zaporozhets O.I.</u> , <u>Mordiyuk B.N.</u> , <u>Mykhailovskyi V.A.</u> , <u>Halkina A.A.</u> , <u>Dordienko M.O.</u> The elastic, textural, and mechanical properties of the Ti–6Al–4V alloy obtained by «x3D metal printing» technology	15
Секція 2. Матеріали для розподіленої та автономної, у т.ч. відновлюваної, енергетики	16
9. <u>Yapontseva Yu. S.</u> , <u>Maltseva T. V.</u> , <u>Kublanovsky V. S.</u> Electrocatalytic and corrosion properties of ternary cowre electroplated from polyligand bath	16
10. <u>Прядко Т.В.</u> , <u>Дехтяренко В.А.</u> Водневосорбційні властивості евтектичного сплаву $Ti_{47,5}Zr_{28}Mn_{17,5}V_2Ni_5$	17
11. <u>Дехтяренко В.А.</u> Композитний матеріал на основі фази Лавеса з магнієм для зберігання водню	18
12. <u>Торчинюк П.В.</u> , <u>Лісовський І.В.</u> , <u>Федорчук О.П.</u> , <u>В'юнов О.І.</u> , <u>Білоус А.Г.</u> Вплив співвідношення вихідних реагентів та концентрації полімеру на стійкість органо-неорганічних перовскитів	19
13. <u>Patlun Dmitry</u> , <u>Vereshchak Anna</u> and <u>Khomenko Volodymyr</u> Electrochemical Hybrid Supercapacitor for Energy Harvesting Systems	20
14. <u>Podhurska V.Ya.</u> , <u>Ostash O.P.</u> , <u>Kuz'menko M.M.</u> , <u>Prikhna T.O.</u> , <u>Sverdun V.B.</u> , <u>Kyrysha A.A.</u> Titanium alloys and composites for lightweight hybrid SOFCs	21
15. <u>Rud M. O.</u> , <u>Mulenko S. A.</u> , <u>Popov V. M.</u> , <u>Galstian I. Ye.</u> , <u>Len E. G.</u> RPLD synthesis of heterostructures based on boron doped ZnO/Perovskite	22
16. <u>Vashchynskyi V.M.</u> , <u>Ilchuk H.A.</u> , <u>Semkiv I.V.</u> , <u>Solovyov M.V.</u> , <u>Karkulovska M.S.</u> Optimization of modes of obtaining $CdTe_{1-x}Se_x$ film solid solutions	23
17. <u>Золотаренко Ан.Д.</u> , <u>Золотаренко Ол.Д.</u> , <u>Матисіна З.А.</u> , <u>Аханова Н.Е.</u> , <u>Уалханова М.</u> , <u>Щур Д.В.</u> , <u>Габдуллін, Рудакова О.П.</u> , <u>Золотаренко О.Д.</u> , <u>Чимбай М.В.</u> , <u>Загорулько І.В.</u> розчинність атомів водню в сплавах АВ	24
18. <u>Золотаренко Ан.Д.</u> , <u>Золотаренко Ол.Д.</u> , <u>Матисіна З.А.</u> , <u>Аханова Н.Е.</u> , <u>Уалханова М.</u> , <u>Щур Д.В.</u> , <u>Габдуллін, Рудакова О.П.</u> , <u>Золотаренко О.Д.</u> , <u>Чимбай М.В.</u> , <u>Загорулько І.В.</u> Фероелектрики KDP кристалів	25
19. <u>Золотаренко Ан.Д.</u> , <u>Золотаренко Ол.Д.</u> , <u>Матисіна З.А.</u> , <u>Аханова Н.Е.</u> , <u>Уалханова М.</u> , <u>Щур Д.В.</u> , <u>Габдуллін, Рудакова О.П.</u> , <u>Золотаренко О.Д.</u> , <u>Чимбай М.В.</u> , <u>Загорулько І.В.</u> Атомне впорядкування у сплаві АзВ	26
20. <u>Лісовський І.В.</u> , <u>Хоменко В.Г.</u> , <u>Солопан С.О.</u> , <u>Білоус А.Г.</u> Модифікація поверхні шаруватих оксидних катодних матеріалів наночастинками $Li_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$	27

Секція 3. Енергоефективні технології на основі надпровідних і магнітних функціональних матеріалів

21. Боринський В.Ю., Поліщук Д.М., Савіна Ю.О., Пашенко В.О., Кравець А.Ф., Товстолиткін О.І., Коренівський В. Температурно індуковані зміни у гістерезисі нанодисків синтетичних антиферромагнетиків 27
22. Каленюк О.А., Футимський С.І., Шаповалов А.П. Високочастотні характеристики залізовмісного надпровідного монокристалу $\text{LaOFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$ 28
23. Fedorchuk O.P., Torchyniuk P.V., Lisovskyi I.V. New heteromaterial dielectric components for modern microwave communications 29
24. Мартиненко І.О., Каленюк О.А. Шаповалов А.П. Автоматизована методика визначення зміни станів СКВІДу 30
25. Прилипко О. О., Максимов С. Ю., Берднікова О. М. Структура металу зварних з'єднань конструкційної сталі при зміні частоти та конфігурації зовнішнього електромагнітного поля 31
26. Болясова О.О., Таренков В.Ю., Шаповалов А.П., Каленюк О.А., Дмитренко В.Ю., Шамаєв В.В. Контактна спектроскопія надпровідних плівок нітриду ніобію 32
27. Zhitlukhina E., Shapovalov A., Belogolovskii M., Seidel P. Delta- T Quantum noise in superconducting energy-efficient devices 33
28. Aliev A., Parra A., Shapovalov A., Belogolovskii M., Zhitlukhina E., Gregor M., Plecenik T. Magnetic characterization of transparent indium–tin oxide superconducting films 34
29. Terekhov A.V., Stepanov V.B., Kolesnichenko Yu. A., Löhderanta E., Rogacki K., Solovjov A.L. Possibility of dirac fermions existence in $\text{Bi}_{95.69}\text{Mn}_{3.69}\text{Fe}_{0.62}$ 35

Секція 4. Функціональні матеріали для мереж енерготранспортування

30. Solntsev V.P., Bagluk G.A., Solntseva T.O., Petrash K.M., Mamonova A.A., Molchanovska G.M. Observation of dynamic stability in nonequilibrium systems based on titanium alloys 36
31. Ziakhov I.V., Nakonechnyi A.O., Levchuk A.M., Wang Qichen, Linyu Fu, Koltsov V.V. Copper-Clad Aluminium wire for energy networks 37

Секція 5. Функціональні матеріали, наноматеріали

32. Palchekovskyi O.A., Kruhlov I.O., Voloshko S.M., Orlov A.K. Effect of additional layers of Cu AND Ag ON structural and phase transformations in Ni/Ti layered stacks 38
33. Мороз Г.В., Корольков Р.Ю., Коротун А.В. Вплив розмірних ефектів на радіаційні властивості сферичних металевих наночастинок 39
34. Дмитрієва Г.П., Черепова Т.С., Прядко Т.В., Носенко А.В. Фізико-хімічні властивості легованих евтектичних сплавів нікелю з карбідом ніобію 40
35. Galstian Iryna, Len Evgen, Yakymchuk Mykola, Tsapko Yevhen, Rud Mykhaylo, Shevchenko Mykola, Mykhaylova Halyna, Frolov Gennadii 41
36. Hrabovskyi Ye.S., Berezovska N.I., Dmytruk I.M., Dmytruk A.M. Mechanical replication of laser induced periodic surface structures 42
37. Hrubiak A.B., Ostafiychuk B.K. Effect of thermal induced reorganization of different structures to electroconductivity properties of hydrothermal synthesized hematite 43
38. Kedrovskyi S., Koval Yu., Slepchenko V., Slipchenko Vyach., Svystunov Ye. Martensitic transformation and shape memory effect in Zr–Ta binary alloys 44
39. Хрїпта Н.І., Мордюк Б.М., Малінін В.Ю., Скорик М.А., Закієв В.І., Подобний О.В., Торба Ю.І., Гребенніков М.О., Павленко Д.В. Оцінка енергетичних параметрів ультразвукового оброблення поверхонь деталей газотурбінних двигунів після електроерозійного різання 45
40. Бурлаков В.О., Погорелов О.Є., Філатов О.В. Тунельний струм контакту Fe/MgO/Fe за умов деформації 46

41. Кудрявцев Ю. В., Голуб В. О., Перекос А. О., Кабанцев Т. Г., Мельник М. П., Таренков В. Ю., Магнетні властивості плівок гойслерового стопу Fe₂CrGa 50
42. Коржик В.Н., Стухляк П.Д., Берднікова О.М., Кушнарєва О.С., Лепіліна К.М., Золотий Р.З. Багатошарові градієнтні покриття із оксиду алюмінію та епоксидних композитних матеріалів 51
43. Лісова О.М., Махно С.М., Гуня Г.М., Горбик П.П. Електрофізичні властивості гібридних нанокомпозитів Графені/FeCo та Вуглецеві нанотрубки/FeCo 52
44. Михайлова Г.Ю., Якимчук М.М., Шевченко М.Я., Галстян І.Є., Цапко Є.А., Лень Є.Г. Композитні матеріали полімер–ВНТ для ефективних поглинальних покриттів 53
45. Орловська С.Г. Особливості утворення і росту кристалів оксиду на поверхні вольфрамівих зразків, що нагріваються електричним струмом 54
46. Руденко Е.М., Короташ І.В., Полоцький Д.Ю., Новицька А.Є. Адгезія плівок ALN до поверхні кераміки ZERODUR 55
47. Дмитрієва Г.П., Черепова Т.С., Прядко Т.В., Семенова Ю.С. Кінетика високотемпературного окиснення евтектичних литих сплавів на основі нікелю з карбідом ніобію 56
48. Шевченко А.Б., Мельник О.Б., Олійник О.В.¹ Фрактальна природа доменної стінки з блоховою точкою в циліндричному феромагнітному нанодроті 57
49. Тітенко А.М., Демченко Л.Д., Трощенков Ю.М., Тітенко О.А., Муравйов В.М. Функціональні наноструктуровані композити на основі потрійних та четверних сполук міді 58
50. Царюк Д.В., Прядко Т.В., Шиванюк В.М., Владімірова Т.П., Бевз В.П., Загорулько І.В. Вплив надшвидкого гартування та термічної обробки на фазовий склад, структурний стан та механічні властивості евтектичного сплаву системи Al–Mg–Si 59
51. Турчак Т.В., Мордюк Б.М., Гаценко О.С., Баскова О.І., Кушнарєва О.С. Вплив ультразвукової ударної обробки (УЗУО) на структуру та механічні властивості алюмінієвих сплавів. 60
52. Воронцова Л.О., Бабкіна Н.В., Антоненко О.І., Косянчук Л.Ф., Бровко О.О. Поліуретановий SiO₂-вмісний нанокомпозит як прозорий демпферний матеріал з ефективним захистом від УФ–В-випромінювання 61
53. Золотаренко Ол.Д., Золотаренко Ан.Д., Щур Д.В., Габдуллін М.Т., Аханова Н.Е., Уалханова М., Рудакова О.П., Золотаренко О.Д., Чимбай М.В., Загорулько І.В. Наповнювачі для металевих та полімерних несучих матриць 62
54. Золотаренко Ол.Д., Золотаренко Ан.Д., Щур Д.В., Габдуллін М.Т., Аханова Н.Е., Уалханова М., Рудакова О.П., Золотаренко О.Д., Чимбай М.В., Загорулько І.В. Процеси електродугового синтезу вуглецевих наноматеріалів 63
55. Котречко С.О., Овсянніков О.В., Коливошко Є.В. Молекулярно-динамічне моделювання впливу температури на міцність карбін-графенових наноелементів за умови постійної швидкості деформації. 64
56. Смольнік С. В., Макеева І. М., Колесник В. М., Васильєв М. О., Шевченко М. Я., Лень Є. Г. Вплив пластичної деформації на роботу виходу вольфрамового катода термоемісійного перетворювача енергії 65
57. В.Н.Коржик В.Н., Стухляк П.Д., Берднікова О.М., Тотосько О.В., Стухляк П.Д., Лепіліна К.М. Захисні та поглинаючі покриття від електромагнітного випромінювання на основі епоксидних багатошарових композитів 66
58. Болясова О.О., Дмитренко В.Ю., Таренков В.Ю., Криворучко В.М. Колективні збудження надпровідного конденсату у надпровідному стані нанокомпозиту MgB₂/(La,Sr)MnO₃ 67
59. Золотаренко Ол.Д., Золотаренко Ан.Д., Щур Д.В., Габдуллін М.Т., Аханова Н.Е., Уалханова М., Рудакова О.П., Золотаренко О.Д., Чимбай М.В., Загорулько І.В. Створення керамічних композитів на основі вуглецевих нанотрубок (технології 3D-друку CJP) 68

60. <u>Krivoruchko V.N.</u> , Tarenkov V.Yu. Proximity-coupled spin singlet–triplet frequency even–odd superconducting condensates in $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ nanocomposite	69
61. <u>Куліш В.В.</u> Згасаючі дипольно-обмінні спінові хвилі у нанотрубці з легкоплотинного ферромагнетика	70
62. Булат А.Ф., Лисиця М.І., Калганков Є.В., <u>Агальцов Г.М.</u> Гума для масивних пружних елементів, що працюють за екстремальних умов експлуатації	71
63. Гохман О.Р., <u>Канівець Н.Г.</u> , Совкова Т.С. Дослідження впливу відпалу на дефектну структуру чистого заліза, яке опромінено нейтронами	72
64. <u>Байталюк Б.С.</u> , Носенко А.В., Євлаш І.К., Кирильчук В.В., Семирга О.М. Новітні порошкові магнітодіелектрики на основі нанокристалічних сплавів із цементною зв'язкою	73
Секція 6. Нові методи дослідження й атестації матеріалів для енергетики	74
65. <u>Яровицин О.В.</u> , Черв'яков М.О, Волосатов І.Р., Хрущов Г.Д., Пестов В.А., Наконечний О.О., Черв'якова Л.В., Воронін С.О., Чигилейчик С.Л., Кондратюк С.Є., Желізняк Н.П., Каменєва С.А., Зубкова В.Т. Формування критеріїв оцінки придатності до застосування присадних матеріалів з нікелевих сплавів у адитивних технологіях 3D-наплавлення	74
66. Zaporozhets O.I., Mordyuk B.M., Mykhailovskyi V.A., <u>Halkina A.A.</u> , Dordienko M.O., Burmak A.P., Langi E., Zhao L.G. The influence of temperature regimes of ultrasonic impact treatment on elastic, texture and mechanical properties of Cu–37Zn brass alloy plates	75
67. <u>Горбатенко Ю.В.</u> , Кривчіков О.І., Романцова О.О., Королюк О.О. Уніфікований аналіз температурних залежностей теплопровідності впорядкованих та розупорядкованих твердих тіл	76
68. <u>Кислюк В.В.</u> , Шиванюк В.М., Котречко С.О. Механічні випробування на повзучість орієнтованого полімерного інкапсулянту сонячних модулів	77
69. Грузевич А.В., Скірта Ю.Б., Герасимчук І.В., <u>Кривець С.В.</u> , Дереча Д.О. Визначення стану елементів енергетичного обладнання магнітометричними методами	78
Секція 7. Теоретичні та чисельні методи фізичного та хімічного матеріалознавства	79
70. <u>Карасевський А.І.</u> , Наумук А.Ю. Перенесення міжвузлових атомів при ударній деформації поверхні металу	79
71. <u>Бондар Є.А.</u> Статистична оцінка нерівностей поверхні алюмінію	80
72. <u>Гречиха О.С.</u> , Касаткін О.Л. Депінінг вихорів абрикосова у надпровідниках другого роду зі стовпчастими дефектами в поперечному магнітному полі	81
73. <u>Карасевський А.І.</u> , Наумук А.Ю. Термодифузійний механізм формування аморфного стану металевого розплаву	82
74. <u>Каширіна Н.І.</u> , Венгер Е.Ф. Муратов О.С., Роїк О.С. Вплив розподілу атомів Mg і Ti на фізичні характеристики Mg_2TiO_4	83
75. <u>Мельник О.Б.</u> , Шевченко А.Б., Олійник О.В. Моделювання фазових перетворень у високоентропійних сплавах NiTiCoCuZrHf	84
76. Uvarov V. N., Kudryavtsev Y. V., Rudenko E. M., Uvarov N. V., Perekos A. E., <u>Melnik M. P.</u> , Tarenkov V. Y. Lattice site occupation effect on the electronic structure and physical properties of quaternary CoMnCrAl heusler alloy	85
77. Котречко С. О., Ревка В. М., <u>Сорока К. Ф.</u> Фізично обґрунтований критерій визначення критичної температури крихкості при випробуваннях на ударну в'язкість реакторних сталей і їх зварних швів	86
78. <u>Timoshevskii Andrei</u> , Kotrechko Sergiy, Nedozdhiy Oleksii <i>Ab initio</i> -моделювання деформації і розриву нескінченних карбінових ланцюжків	87
79. <u>Kukusta D. A.</u> , Antonov V. N., Yaresko A. N. Resonant inelastic x-ray scattering from band structure calculations: application to MgB_2	88
80. Karbivskyu V.L., <u>Romansky A.O.</u> , Karbivska L.I., Svachko N.K., Zaika V.V., Su-	89

khenko I.V., Soroka A.P. Electronic structure of ordered copper and gold nanostructures

Секція 8. Функціональні матеріали для утилізації тепла

- | | |
|--|----|
| | 90 |
| 81. <u>Лень Є. Г.</u> , Васильєв М. О., Макеєва І. М., Колесник В. М., Шевченко М. Я., Смольнік С. В. Підвищення ефективності електрогенерації завдяки використанню прямих термоемісійних перетворювачів високотемпературної енергії | 90 |
| 82. <u>Ivchenko D.</u> , Hlek Ya., Kvasnytskyi B., Zhelezny V. Enthalpy hysteresis in heating–cooling cycle of the phase change materials paraffin wax/fullerene C ₆₀ | 91 |
| 83. <u>Константинов О.І.</u> , Хлієв Н.О. Матеріали з фазовим переходом на основі пропіленгліколю для низькотемпературного зберігання енергії | 92 |
| 84. <u>Hlek Ya.</u> , Sestopalov K., Khliyeva O., Zhelezny V. Phase change material paraffin wax/expanded graphite: search of rational composition | 93 |

СЕКЦІЯ 1. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНИХ ЕНЕРГОКОМПЛЕКСІВ

LOW-TEMPERATURE RELAXATION IN KAPTON

Semerenko Yu.A.*

¹ *B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, National Academy of Sciences of the Ukraine, 47 Nauky Ave., Kharkiv 61103, Ukraine*

**Тел.: +38 067 957 3190 E-mail: yuri.semerenko@gmail.com*

Kapton is a typical representative of an extensive class of heat-resistant polymers—polyimides. Kapton was first synthesized in the USA by the famous chemist, inventor of teflon Roy J. Plankett in 1964.

Kapton has excellent physical, chemical and electrical characteristics, is resistant to radiation, space environment, temperature extremes. It is stable in a wide range of temperatures from 4.2 K to 700 K, does not dissolve and does not swell in known organic solvents even with prolonged heating, does not burn, does not melt and does not soften up to the decomposition temperature. It is used as high-temperature insulation in electrical equipment, Due to a lower specific weight than other dielectrics it is often used as insulation for on-board wires and cables for aviation and astronautics.

In the temperature range 4.2–350 K was studied the viscoelastic properties of the PMDA / ODA polyimide film PMA (Kapton). Two low-temperature relaxation processes on the temperature dependences of the acoustic properties are recorded: δ -relaxation at 45 K and β -relaxation at 185 K.

A microscopic interpretation of these relaxations have been proposed. The β -process is responsible for the movement of chain segments that include imide groups that are free from hydrogen bonds with similar groups of neighboring macromolecules [1]. It is known that β -relaxation occurs only in the amorphous regions of the polymer [2]. The δ -relaxation mechanism is associated with the interaction of conformational kink-like defects in the almost parallel folding of molecular chains. The analogue of this process is the mechanism of the Bordoni peak in fcc metals [3]. δ -peak can only be associated with the presence of ordered regions. The existence of an amorphous halo on radiographs of an amorphous PMDA / ODA polyimide shows that it is not a completely disordered system; it contains local regions in which the short-range order is preserved [4].

Estimates of the activation energy for these relaxation processes are obtained: δ -relaxation ~ 0.05 eV, β -relaxation ~ 0.7 eV.

1. I.I. Perepechko, *Low-Temperature Properties of Polymers* (Moscow: Khimiya: 1977) (in Russian).
2. P.D. Golub', I.I. Perepechko, *Akusticheskij Zhurnal*, **20**, 38 (1974) (in Russian).
3. A.S. Nowick, B.S. Berry, *Anelastic relaxation in crystalline solids* (New York: Academic: 1972).
4. I.S. Braude, N.N. Galtsov, V.G. Geidarov, G.I. Kirichenko, V.A. Lototskaya, and Yu.M. Plotnikova, *Low Temperature Physics*, **43**, 1226 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5008418>

МОНОКРИСТАЛИ ВОЛЬФРАМУ У ВИГЛЯДІ ПОРОЖНИСТИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ДЛЯ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Никитенко Ю.О., Шаповалов В.О., Якуша В.В., Гніздило О.М.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, вул. К. Малевича 11, Київ, Україна
Тел.: +38 044 205-24-02, E-mail: niku80@gmail.com*

Удосконалення сучасного енергокомплексу неможливо без впровадження нових матеріалів і технологій. Насамперед це стосується атомної енергетики та досліджень термоядерного синтезу. Створення реакторів на основі термоємних перетворювачів також відкриває можливості щодо забезпечення електричною енергією космічних літальних апаратів. На даному етапі розвитку не вирішеним залишається питанням вибору матеріалів для конструктивних елементів, що зазнають впливу високої температури та радіації. Зокрема, в термоядерних реакторах з дейтерієво-третієвою плазмою відбувається бомбардування нейтронів з високою енергією, що створює високу концентрацію радіаційних дефектів в елементах конструкції. Тому до цих матеріалів висуваються високі вимоги як по термостійкості, так і по стійкості до радіаційного опромінення. Вольфрам має низьку розчинність практично всіх ізотопів водню, який практично не розчиняється у вольфрамі, а захоплюється лише дефектами структури. Накопичення дейтерію в полікристалічному вольфрамі в 4–5 разів нижче, ніж в шарі вольфраму, що формується шляхом напилювання, тому дуже важлива «досконалість» структури. І в цьому напрямку перспективною структурою є монокристал із заданою орієнтацією.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України була створена унікальна технологія вирощування монокристалів тугоплавких металів у вигляді пластин 170–160–20 мм і тіл обертання (циліндр) діаметром 85 мм. Наступним кроком стало відпрацювання технології вирощування монокристалів вольфраму у вигляді порожнистих тіл обертання. Було вирощено злиток Ø 85 мм з товщиною стінки 20–22



Рисунок 1 – Загальний вигляд монокристалу вольфраму у вигляді порожнистого тіла обертання Ø 85 мм

мм, заввишки 68 мм (Рис. 1). Така форма дозволить застосувати вольфрам у якості трубних заготовок, виготовлення елементів зі складною кривизною або тиглів для виплавки високо реакційних напівпровідників та тугоплавких сполук.

Первинний аналіз показав спадковість структури від монокристалічного зародкового кристала та всі ознаки монокристалічної структури у всьому кристалі.

БІМЕТАЛІЧНІ КОНТАКТИ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ АПАРАТУРИ

**Зяхор І.В.¹, Левчук А.М.^{1(*)}, Завертанний М.С.¹, Наконечний А.О.¹,
Кольцов В.В.², Шило Ю.А.¹**

¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, Казимира
Малевича, 11, Київ, Україна*

²*ТОВ «Ентерпрайз Текнолоджіз», 02125, м. Київ, вул. Старосільська, 1У, Київ,
Україна*

**Тел.: +38 067 135 8723 E-mail: levchuk.a@gmail.com*

У матеріалах електричних контактів повинні оптимально поєднуватись різноманітні, а іноді несумісні для звичайних металів властивості: тугоплавкість, зносостійкість, висока тепло- та електропровідність, корозійна стійкість та низький перехідний опір. Зазначені властивості мають композиційні матеріали (КМ) на мідній основі — дисперснозміцнені сплави та псевдосплави каркасної будови.

Для контактів високовольтної апаратури використовують псевдосплав каркасної будови на основі вольфраму. Для покращення тепловідведення від робочої поверхні контактних деталей їх корпус виконують з міді, а робочі поверхні — із псевдосплаву товщиною 4...5 мм. Такий біметалічний контакт має у 5 разів більший термін служби, ніж виготовлений тільки із псевдосплаву. З'єднання мідного корпусу із псевдосплавом, як правило, виконують паянням, причому загальний час процесу становить від десятків хвилин до 1–2 годин. Застосування для цієї мети способів зварювання тиском дозволить знизити вимоги до підготовки поверхонь, збільшити продуктивність та покращити гігієнічність процесу з'єднання.

В роботі досліджували можливість застосування контактного стикового зварювання (КСЗ) опором та зварювання тертям (ЗТ) для з'єднання вольфрам-мідного псевдосплаву (70%W+26%Cu+4%Ni), отриманого методом порошкової металургії, з міддю М1. ЗТ виконували без будь-яких проміжних прошарків, а при КСЗ використовували мідні профільовані вставки для локалізації тепловиділення в зоні контакту. Оцінку якості з'єднань проводили за результатами механічних випробувань на розрив, металографічних досліджень, локального мікрорентгеноспектрального аналізу, вимірювання мікротвердості.

У біметалічних з'єднаннях, виконаних КСЗ і ЗТ, не виявлено будь-яких дефектів, характерним є різка зміна концентрації хімічних елементів на границі розділу псевдосплав/мідь М1. Ширина дифузійної зони по перерізу заготовок залежить від встановлених значень технологічних параметрів і не перевищує 10...15 мкм, що обумовлено короткочасністю процесу зварювання.

Зниження твердості у зоні з'єднання не виявлено. Міцність з'єднань на розрив становить 210...220 МПа, що повністю відповідає технічним вимогам до електричних контактів високовольтної апаратури.

МАГНЕТНІ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МУЛЬТИФЕРОЇКІВ СКЛАДУ $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$

Довгий В.Т.^{1(*)}, Боднарук А.В.², Дмитренко В.Ю.¹, Чишко В.В.¹

¹Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН України,
просп. Науки, 46, 03028 Київ, Україна

²Інститут фізики НАН України, просп. Науки, 46, 03028 Київ, Україна

*Тел.: +380508209114 E-mail: vladimirdovgii@gmail.com

Останнім часом системи твердих розчинів на основі фериту вісмуту BiFeO_3 привертають величезну увагу не тільки з наукової точки зору, але і з точки зору їх практичного використання в різних багатофункціональних пристроях.

Нами досліджувалися системи твердих розчинів $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ ($0.05 \leq x \leq 0.4$). Мета роботи — вивчення впливу заміщення йонів Bi^{3+} йонами Y^{3+} на магнетні і електричні властивості мультифероїків $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$. Зразки керамік складів $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ ($0.05 \leq x \leq 0.4$), були одержані за нітратної технології. Рентгенофазова аналіза здійснювалася на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-1,5 (випромінювання CuK_α). Запис кривих магнетування проводили за кімнатної температури на вібраційному магнетометрі LDJ-9500 в магнетних полях $H = \pm 2.5$ кЕ. Для прикладу, результати вимірювань польових залежностей намагнетованості $M(H)$ за $T = 300$ К для керамічних зразків твердих розчинів $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ ($0.1 \leq x \leq 0.4$) представлені на рис.1. По характеру кривих магнетування можна зробити висновок, що сполуки $\text{Bi}_{1-x}\text{Y}_x\text{FeO}_3$ ($0.1 \leq x \leq 0.4$) — феромагнетики, чутливі до слабого магнетного поля. Перевага зразків цих систем у тому, що намагнетованість у малих магнетних полях (~ 2 кЕ) значно більша, ніж намагнетованість зразків із частковим заміщенням йонів Bi в низці тривалентних або дво-валентних іонів, а також із частковим заміщенням йонів Fe [1,2] (у магнітному полі $\sim 20\text{--}60$ кЕ), що важливо для практичних застосувань. Результати вимірювань питомого опору цього складу для концентрацій $x = 0; 0.1; 0.15; 0.2$ у температурному діапазоні $230\text{--}550^\circ\text{C}$ представлені на Рис.2.

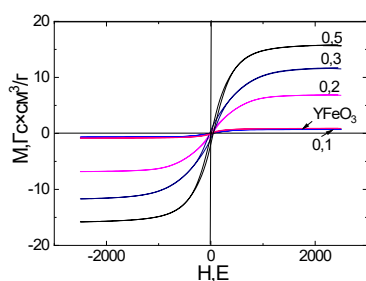


Рис.1.

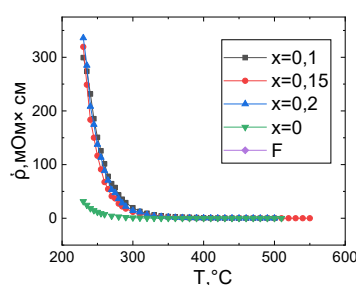


Рис.2.

1. R. Pandey, L. K. Pradhan, P. Kumar, M. Kar, *Ceramics International*, **44**, No.15: 18609 (2018).
2. L. Chen, L. Zheng, Y. He, J. Zhang, Z. Mao, X. Chen, *J. Alloys and Comp.*, **633**: 216 (2015).

СТВОРЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ НА ТИТАНІ ВІД ДІЇ ВОДНЕВОГО СЕРЕДОВИЩА З КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВУ (СПЛАВ ТИПУ ХТН-62) ДОДАТКОВО ЛЕГОВАНОГО БОРОМ.

Дехтяренко В.А., Бошко О.І., Загорулько І.В., Прядко Т.В.

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна

Тел.: +38 044 424 12 20 E-mail: Devova@i.ua

Титан та сплави на його основі можуть досить легко вступати в реакцію з воднем, що призводить до погіршення їх фізико-механічних властивостей і як наслідок, передчасне руйнування деталей машин та конструкцій. На даний час вже розроблено досить велика кількість захисних покриттів, що дозволяють працювати титану та сплавам на його основі у водневому середовищі та при підвищених температурах [1]. Проте, постійно зростаючи вимоги до таких матеріалів, потребує розроблення нових класів матеріалів для захисту титана та сплавів на його основі від негативної дії водневого середовища.

В Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України розроблено зносостійкі кобальтові сплави серії ХТН призначені для експлуатації при високих температурах в вузлах тертя енергетичного обладнання [2]. Ці сплави використовуються в якості матеріалу для захисту бандажних полиць робочих лопаток турбіни високого тиску ГТД від зношування, які здатні працювати досить довгий час (12000 год.) в агресивному середовищі при високих температурах та змінних навантаженнях. Крім того, було встановлено, що сплави даного типу, також є стійкими і від дії водневого середовища (тиск водню 2 МПа температура 700 °С). Проте, фізико-механічні властивості даних сплавів, не дозволяють існуючими методами отримувати з них порошки, для подальшого практичного використання в якості матеріалу при створенні захисних покриттів, що вимагає пошуку нових шляхів отримання з них порошків.

Встановлено, що додаткове легування кобальтового сплаву типу ХТН-62 бором в кількості 1,5 мас.% та деяка варіація вихідного хімічного складу, дозволили розробити методику отримання порошку для подальшого практичного використання. Для отримання високої адгезії створеного захисного покриття та матеріалу основи, було відібрано порошок з середнім розміром 65 мкм. Нанесення захисного покриття на титан відбувалось плазмовим методом в декілька етапів, щоб створити захисне покриття на усіх поверхнях зразка.

Методом скануючої електронної мікроскопії було досліджено створене захисне покриття. Визначено, що при нанесенні захисного покриття, зазначеним методом, відбувається часткове оплавлення поверхні порошків та в подальшому, при осадженні їх на поверхню основи, взаємодія між собою. Це дозволяє, отримати на поверхні основи достатньо суцільний шар, утворений завдяки взаємній дифузії.

1. T.V. Pryadko, V.A. Dekhtyarenko, V.I. Bondarchuk, M.A. Vasilyev, and S.M. Voloshko, Complex Approach to Protecting Titanium Constructions from Hydrogen Embrittlement, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No.10: 1419–1429 (2020).

<https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.1419>

2. T.S. Cherepova, G.P. Dmitrieva, A.V. Nosenko and A.M. Semirga, Wear-resistant alloy for protection of contact surfaces of working aircraft engine blades from oxidation at high temperatures. *Science and Innovation*. 10, No.4.: 20–28. (2014).

<https://doi.org/10.15407/scin10.04.022>

ЯВИЩЕ ВИБУХОПОДІБНОГО РУЙНУВАННЯ ПРИ КВАЗІСТАТИЧНОМУ СТИСКУ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ, ЯКІ МІСТЯТЬ Ti, Zr, Hf

С. Котречко^{1,2}, О. Зацарна¹, О. Філатов¹, В. Бондарчук¹, Г. Фірстов¹

¹*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна*

²*Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,
Берестейський проспект, 37, 03056 Київ, Україна*

**Тел.: +380 671379672, e-mail: serkotr@gmail.com*

Встановлене явище вибухоподібного руйнування зразків із високоентропійних сплавів із пам'яттю форми систем TiZrHfNiCu, TiZrHfCoNiCu при випробуваннях на квазістатичний стиск. Розроблена фізична модель ініціювання вибухоподібного руйнування високоентропійних сплавів на основі TiZrHf в умовах випробувань на одновісний квазістатичний стиск. Показано, що причиною цього явища є виділення енергії ланцюгової реакції окислення сплаву, яка ініціюється нагрівом дрібних частинок сплаву за рахунок тепла, що виділяється у вершині тріщини зсуву, яка утворюється при крихкому руйнуванні зразка в умовах квазістатичного стиску. Дана оцінка величини локального розігріву металу, необхідного для ініціювання реакції окиснення.

Показано, що загорання і вибухоподібне руйнування є особливістю крихкого руйнування цього класу високоентропійних сплавів. Цей феномен реалізується при досягненні певних критичних рівнів міцності і пластичності цих сплавів. Дана оцінка цих рівнів.

В цілому, високий рівень міцності високоентропійних сплавів на основі TiZrHf робить їх перспективними *конструкційними* та *функціональними* матеріалами, що мають переваги над існуючими сплавами, проте при досягненні критичних рівнів міцності та крихкості ці сплави набувають «протилежних» властивостей стаючи *енергетичними* сплавами, які здатні до вибухового виділення значної кількості теплової енергії. В цьому полягає феномен цього класу високоентропійних сплавів, який окреслює область їх використання. Віднайдені критичні рівні міцності і пластичності окреслюють границю, яка відділяє конструкційні і функціональні високоентропійні сплави від енергетичних.

ULTRASOUND TESTING OF ELASTIC, TEXTURAL, AND MECHANICAL PROPERTIES OF AVIATION MATERIALS

**O.I. Zaporozhets^{1*}, V.A. Mykhailovskyi¹, A.A. Halkina¹, O.V. Podobnyi²,
Yu.I. Torba², D.V. Pavlenko^{2,3}**

¹*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, NAS of Ukraine, 36 Academician Vernadskyi blvd., UA-03142, Kyiv, Ukraine;*

²*«Ivchenko-Progress» SE, Zaporizhzhia, Ukraine*

³*NU «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine*

**Tel.: +38 093 594 8612; E-mail: zapus.ua@gmail.com*

Like the research conducted on nuclear materials using ultrasonic equipment, as described in [1], quantitative data suitable for engineering calculations were obtained. This data includes the values of Young's (E), shear (G), and bulk (B) moduli, Poisson's ratio (η), Vickers hardness (HV), Milman's plasticity characteristic (δH), yield ($\sigma_{0.2}$), and ultimate strength (σ_S) for specimens of as-received aviation alloys EI698, VT8, and DN3SH. These measurements were taken both before and after soft (SP) and hard (HP) spark-cutting (SC) treatments. Bulk US velocities (v_{ij}) were measured in orthogonal directions on different sections of the specimens. In addition to measuring v_{ij} at fixed specimen sections, scanning by US beam using longitudinal US waves was performed on the specimens. Furthermore, when elastic anisotropy in the specimens was detected (as in the case of the VT8 alloy after SP SC), we utilized the layer-by-layer US texture analysis method [2]. Most of the specimens were determined to have the anisotropy and heterogeneity of the E and HV of no more than 1%. Only the VT8 alloy, after undergoing SP SC, exhibited a significant anisotropy (up to 6–8%) in both elastic moduli (EM) and mechanical parameters (MP), which can be attributed to the presence of texture in the alloy. Texture coefficients W_{ij0} ($i=2,4$; $j=0,2,4$), Kearns factors f_i ($i=1-3$), EM, and MP for orthogonal directions were determined, basal [0001] pole figures and 3D surface of E near the region of SC action and for the central parts of the specimens were plotted. A clear correlation between the modulus E_i , HV , and f_i was established, underscoring the main contribution of the texture factor to the anisotropy of the studied alloy. The effect of SC on the results of specimen scanning using the US beam was found to depend on the properties of the processed alloys. Scanning by US beam zone of SC action made it possible to determine the thickness of the affected layer while gradually mechanically removing the damaged layer. At the same time, determination of the presence of affected layer is possible using only US equipment without such removal.

1. Zaporozhets O.I., Kotrechko S.A., Dordienko N.A., Mykhailovskyi V.A., Zatsarnaya A.V., *Problems of Atomic Science and Technology*, 96, №2: 197 (2015) (in Ukrainian).

2. Zaporozhets O.I., Mordyuk B.N., Mykhailovskyi V.A., Halkina A.A., Dordienko N.A., *Surface and Coatings Technology*, 403: 126397 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126397>.

THE ELASTIC, TEXTURAL, AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE Ti-6Al-4V ALLOY OBTAINED BY «X3D METAL PRINTING» TECHNOLOGY

**O.I. Zaporozhets*, B.N. Mordyuk, V.A. Mykhailovskyi, A.A. Halkina,
M.O. Dordienko**

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine, 36 Academician Vernadsky blvd., UA-03142, Kyiv, Ukraine

**Тел.: +38 093 5948 612; E-mail: zapus.ua@gmail.com*

The 3D Ti-6Al-4V (VT6) alloy was studied with the precise ultrasonic (US) measurements on automated equipment [1] at 10–30 MHz. The specimens were manufactured by PSC "Chervona Khvylya" (Ukraine) using the "x Beam 3D Metal Printing" technology. Longitudinal (v_{ii}) and transverse (v_{ij}) US velocities in directions parallel to the horizontal layers of the 3D product on different specimen sections were measured. The directions of polarization vector were orthogonal. Based on the measured v_{ii} , v_{ij} , and density (ρ) values 5 texture coefficients W_{ij0} were determined and pole figures (0001) were constructed for α -phase of studied alloy. Kearns factors (f_i), Young's (E), shear (G), bulk (B) moduli, Poisson's ratio (η), hardness (HV), Milman's plasticity characteristics (δH), yield ($\sigma_{0.2}$), and ultimate (σ_S) strength were calculated. The difference in both E and G ranges from 6 to 8%, while HV , $\sigma_{0.2}$, σ_S ranged from 5.8 to 7.2%. Despite a relatively significant variation (4.0–4.6%) in η , δH changes insignificantly. The anisotropy of elastic and mechanical properties in orthogonal directions was within the range of 3.4–4.5%, while on some specific sections much more variations and anisotropy in these parameters were observed. Studied AD product was established to be constructed with shift strategy. Ultrasonic impact treatment (UIT) led to changes in v_{ii} in the surface region up to 1.45%, while the E and G decrease by approximately 3% and 2%, respectively. Such a decrease in elastic moduli for HCP anisotropic polycrystals results in an increase in the perpendicular direction and strengthens the surface due to the cumulative deformation component. The effects of UIT in metallic specimens' volume is primarily caused by the dynamic deformation component inducing the relaxation of residual stresses and the breakdown of fixators of textured elements. The results demonstrate the effectiveness of texture analysis using layer-by-layer US techniques and associated equipment, alongside other methods classical for the field of AD-production titanium-based alloys and other spatially inhomogeneous anisotropic materials.

1. O.I.Zaporozhets, B.N.Mordyuk, N.A.Dordienko, V.A.Mykhailovskyi, A.A.Halkina, Surface and Coatings Technology 403, 126397. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126397>
2. D. Kovalchuk, V.Melnyk, I.Melnik, D.Savvakina, O.Dekhtyar, O.Stasiuk, and P.Markovsky, Journal of Materials Engineering and Performance, JMEPEG, 2021. <http://doi.org/10.1007/s11665-021-05770-9>

СЕКЦІЯ 2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ТА АВТОНОМНОЇ, У Т.Ч. ВІДНОВЛЮВАНОЇ, ЕНЕРГЕТИКИ

ELECTROCATALYTIC AND CORROSION PROPERTIES OF TERNARY CoWRe ELECTROPLATED FROM POLYLIGAND BATH

Yu.S. Yapontseva^(*), T.V. Maltseva, V.S. Kublanovsky

*V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Ukraine,
pr. Acad. Palladin 32/34, 03142 Kyiv, Ukraine*

E-mail: juliya_yap@ukr.net

The desire to reduce greenhouse gas emissions, the use of environmentally friendly fuels, and the development of efficient fuel cells makes the production of pure hydrogen one of the most pressing problems. According to the International Energy Agency (IEA), hydrogen production in the world in 2022 amounted to 94.5 million tons. At the same time, the share of environmentally friendly green hydrogen was only 1% of the total [1]. Green hydrogen is produced electrochemically from 100% renewable sources. The only problem is the cost of production, most of which is the cost of catalysts based on platinum group metals. Reviews [2, 3] show the possibility of replacing expensive electrocatalytically active metals with multicomponent alloys based on metals of the iron subgroup with refractory metals, and also indicate [3] the special role and promise of rhenium in the development of catalysts.

The paper shows the effect of the chemical composition, crystal structure, and electrodeposition conditions on the electrocatalytic properties of CoWRe ternary alloys in the hydrogen evolution reaction (HER) in a 1M KOH solution. Electrolytic alloys were deposited from polyligand citrate–pyrophosphate electrolytes with different concentrations of perrhenate ions. It was found that the use of such alloys makes it possible to increase the exchange current density by an order of magnitude and reduce the hydrogen overvoltage by 150 mV compared to cobalt. With an increase of rhenium content in the alloys due to an increase in the concentration of perrhenate ions in the solution or an increase in the deposition current density, the electrocatalytic properties of the alloys in HER deteriorate.

Corrosion studies were carried out in KOH, H₂SO₄, and NaCl solutions. It is shown that the corrosion characteristics depend not only on the chemical composition of the coatings, but also on the crystal structure. Deposits with a crystalline structure have the highest corrosion resistance compared to x-ray amorphous ones. It was shown that the highest corrosion resistance of such coatings with the ratio Re:W = 2÷4 reached 8.8 kOhm·cm² in NaCl solution, and in KOH solution, 3.1 kOhm·cm² and increased in time.

1. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
2. C. C. L. McCrory, S. Jung, I. M. Ferrer, S. M. Chatman, J. C. Peters, T. F. Jaramillo J. Am. Chem. Soc. 2015, 137, 4347–4357, <https://doi.org/10.1021/ja510442p>
3. A. M. R. Ramirez, S. Heidari, A. Vergara, M. V. Aguilera, P. Preuss, M. B. Camarada, A. Fischer, *ACS Mater. Au* 2023, 3, 177–200, <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.2c00077>

ВОДНЕВОСОРБЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕВТЕКТИЧНОГО СПЛАВУ $\text{Ti}_{47,5}\text{Zr}_{28}\text{Mn}_{17,5}\text{V}_2\text{Ni}_5$

Прядко Т.В., Дехтяренко В.А.

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна

Тел.: +38 044 424 12 20 E-mail: Devova@i.ua

Раніше нами було показано [1] перспективи використання у якості матеріалу для безпечного зберігання та транспортування водню у зв'язаному стані (гідрид), евтектичних сплавів системи Ti-Zr-Mn-V , зі структурою фази Лавеса типу C14 та ОЦК-твердого розчину. Проте, неперервно зростаючи вимоги до матеріалів акумуляторів водню, вимагають постійного вдосконалення вже існуючих композицій. Досягти покращення сорбційних властивостей є можливим завдяки додатковому легуванню, як це було доведено неодноразово [1]. Додаткове легування даних сплавів, елементом здатним взаємодіяти з воднем (наприклад нікелем), відкриває нові горизонти для їх практичного використання в якості матеріалів для зберігання водню у зв'язаному стані. З метою встановлення впливу нікелю на водневосорбційні властивості евтектичних сплавів системи Ti-Zr-Mn-V , було виплавлено раніше досліджений сплав $\text{Ti}_{47,5}\text{Zr}_{28}\text{Mn}_{22,5}\text{V}_2$ [2] в якому було частково замінено марганець який не взаємодіє з воднем на 5 ат.% нікелю.

Методом скануючої електронної мікроскопії було встановлено, що після часткової заміни марганцю на нікель, у зазначених межах, змін у структурі вихідного сплаву не відбулося. Проте, методом рентгенівського фазового аналізу було встановлено, що у фазовому складі сплаву $\text{Ti}_{47,5}\text{Zr}_{28}\text{Mn}_{17,5}\text{V}_2\text{Ni}_5$ окрім фази Лавеса типу C14 та ОЦК-твердого розчину також були виявлені сліди нової фази, інтерметаліду $(\text{Ti,Zr})(\text{Mn,V,Ni})_{2-x}$. Присутність інтерметаліду $(\text{Ti,Zr})(\text{Mn,V,Ni})_{2-x}$ свідчить проте, що не весь введений у сплав нікель розчиняється у вихідних фазах.

Досліджуваний сплав $\text{Ti}_{47,5}\text{Zr}_{28}\text{Mn}_{17,5}\text{V}_2\text{Ni}_5$ витримували у атмосфері водню при тиску 0,6 МПа та кімнатній температурі впродовж 24 годин. Зазначені умови гідрування, не призвели до активації поверхні і відповідно активного поглинання водню досліджуваним сплавом. Сплав було додатково витримано при вказаних параметрах гідрування впродовж 50 годин, але збільшення часу витримки не призвело до активації поверхні і, відповідно, до помітного поглинання водню, інтенсивна сорбція водню сплавом розпочалась лише після нагрівання. Активне поглинання водню сплавом розпочалось при температурі 345 °С, а сам процес поглинання продовжувався лише 10 хвилин. При насиченні досліджуваного сплаву воднем відбулося повне руйнування монолітного зразку до стану порошку, через високу швидкість протікання процесу взаємодії (лише 10 хвилин), а отже, недостатність часу для релаксації напружень. Кінцевий продукт гідрування сплаву складався з гідриду на основі фази Лавеса типу C14, δ -гідриду на основі ОЦК-твердого розчину. Кількість поглинутого водню при кімнатній температурі та атмосферному тиску становила 2,70 мас.%.

При кімнатній температурі пониження тиску водню від 0,6 до 0,002 МПа не призводить до початку активного процесу виділення водню. Виділення водню спостерігалось лише при нагріванні. Так, при початковому тиску 0,0002 МПа виділення водню з гідридів отриманих на основі досліджуваного сплаву $\text{Ti}_{47,5}\text{Zr}_{28}\text{Mn}_{17,5}\text{V}_2\text{Ni}_5$, розпочалось при температурі 40 °С, а при досягненні температури 490 °С вдалося досягти повної десорбції.

1. V.A. Dekhtyarenko, D.G. Savvakina, V.I. Bondarchuk, V.M. Shyvanuk, T.V. Pryadko, and O.O. Stasiuk, TiMn_2 -Based Intermetallic Alloys for Hydrogen Accumulation: Problems and Prospects, *Progress in Physics of Metals*, 22, No. 3: 307–351 (2021). <https://doi.org/10.15407/ufm.22.03.307>

2. V.G. Ivanchenko, V.A. Dekhtyarenko, and T.V. Pryadko, Hydrogen Sorption Properties of $\text{Ti}_{0,475}\text{Zr}_{0,3}\text{Mn}_{0,225}$ Eutectic Alloy Alloyed with 2 at.% and 5 at.% of Vanadium, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 37, No. 4: 521—530 (2015). <https://doi.org/10.15407/mfint.37.04.0521>

КОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ФАЗИ ЛАВЕСА З МАГНІЄМ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ

Дехтяренко В.А.

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна

Тел.: +38 044 424 12 20 E-mail: Devova@i.ua

Авторами [1] показана перспективність застосування сплавів на основі фази Лавеса типу C14 (основний представник, сполука TiMn_2) в якості сорбенту для зберігання водню у зв'язаному стані. Оскільки, вони здатні взаємодіяти з воднем при кімнатній температурі та з високою швидкістю. Проте, основною проблемою, що лімітує їх використання, є відносно низька кількість поглинутого водню (до 2 мас.%). На противагу цьому, магній має високу кількість поглинутого водню, але надскладний процес гідрування. Поєднання переваг кожного з цих матеріалів в композиті (оскільки дані матеріали не мають взаємної розчинності) має великі переваги для практичного використання в якості матеріалів для зберігання водню.

В якості вихідних матеріалів було взято порошок магнію розміром 100 мкм, та сплав $\text{Ti}_{15,5}\text{Zr}_{30}\text{Mn}_{5,5}\text{V}_{5,5}\text{Cr}_{5,5}\text{Co}_{5,5}$. Відповідно до даних рентгенівського фазового аналізу та скануючої електронної мікроскопії основою сплаву $\text{Ti}_{15,5}\text{Zr}_{30}\text{Mn}_{5,5}\text{V}_{5,5}\text{Cr}_{5,5}\text{Co}_{5,5}$ є фаза Лавеса типу C14 (об'ємна доля більше 80 %). Порошок сплаву було отримано двома методами. Механічним подрібненням (середній розмір порошку 500 мкм) та за допомогою водневого диспергування (розмір 30 мкм). Композитні матеріали отримувались за допомогою змішування порошків сплаву (або гідриду на його основі) та магнію (5; 10; 20 мас.%) впродовж 8 годин, з послідовним пресуванням. Пресування дозволяє отримати високу контактну поверхню між порошками гідриду та магнію, а це у свою чергу, дозволяє полегшити процес насичення магнію воднем [1].

Процес взаємодії з воднем, спресованих композитів, проводився за такою методикою: у випадку використання порошку сплаву, спочатку насичувався воднем сплав при кімнатній температурі та тиску 0,23 МПа, після цього, тиск у реакторі знижувався до 0,0002 МПа та проводився нагрів до температури 400 °С (десорбція водню з гідриду на основі сплаву); у випадку використання гідриду на основі сплаву, одразу проводився нагрів до 400 °С. Даний нагрів дозволяв створити тиск водню в реакторі на рівні 0,1 МПа. Для кожного спресованого композиту проводилось по три цикли сорбція–десорбція.

Встановлено, що у випадку використання в якості вихідного матеріалу порошку сплаву, після першого насичення композиту воднем, відбувається його руйнування, що пов'язано з об'ємними ефектами які супроводжуються розчиненням водню. При використанні у якості вихідного матеріалу гідриду, спресований композит зберігав свою форму.

Методом рентгенівського фазового аналізу було встановлено, що після трьох циклів сорбція–десорбція у спресованому композиті окрім гідриду на основі сплаву та чистого магнію був присутній і гідрид магнію.

1. V.A. Dekhtyarenko, D.G. Savvakina, V.I. Bondarchuk, V.M. Shyvanyuk, T.V. Pryadko, and O.O. Stasiuk, *TiMn₂-Based Intermetallic Alloys for Hydrogen Accumulation: Problems and Prospects*, *Progress in Physics of Metals*, 22, No. 3: 307–351 (2021). <https://doi.org/10.15407/ufm.22.03.307>.

ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ВИХІДНИХ РЕАГЕНТІВ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ ПОЛІМЕРУ НА СТІЙКІСТЬ ОРГАНО-НЕОРГАНІЧНИХ ПЕРОВСЬКИТІВ

Торчинюк П.В., Лісовський І.В.^(*), Федорчук О.П., В'юнов О.І., Білоус А.Г.

*Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського,
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Україна*

**Тел.: +38 099 549 8750 E-mail: i-lisovskii@i.ua*

Органо-неорганічні галогенідні перовськіти володіють унікальними властивостями: гнучка кристалічна структура, регульована ширина забороненої зони, велика довжина дифузії носіїв заряду, високі коефіцієнти оптичного поглинання. Вони можуть знайти широке застосування у фотодетекторах, світло-випромінювальних пристроях, сонячних елементах з високою ефективністю перетворення енергії, але для цього необхідно підвищити їх стійкість до дії зовнішніх чинників. Для органо-неорганічних перовськітів характерна структурна деградація, яка зумовлена дією зовнішніх чинників (вологи, температури, ультрафіолетового випромінювання тощо). Для зменшення впливу цих чинників та підвищення стійкості плівок перовськіту можна використовувати різні полімери, наприклад, полівінілбутираль (PVB).

В даній роботі було проведено дослідження стійкості плівок органо-неорганічного перовськіту $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ до дії вологи залежно від співвідношення вихідних реагентів ($\text{PbI}_2:\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I} - 1:1, 1:2, 1:3$) у розчиннику DMF та концентрації PVB (2 та 5 мас.%).

Встановлено, що в плівках $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (1:3) вміст фази PbI_2 , яка утворюється при деградації перовськіту, при впливі вологи на 95 день становить $\sim 3,5$ %. Плівки, отримані при співвідношенні $\text{PbI}_2:\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I} - 1:2$, є найбільш чутливі до вологи і вміст PbI_2 в цих плівках при впливі вологи становить ~ 62 %. У плівках, отриманих при співвідношенні 1:1, вміст PbI_2 становить $\sim 21,5$ % при впливі вологи протягом 95 днів. Рентгенівські дослідження стійкості плівок показали, що стійкість плівок перовськіту зменшується залежно від співвідношення вихідних реагентів, що використовувалися для синтезу перовськіту у напрямку $1:3 \rightarrow 1:1 \rightarrow 1:2$.

Показано, що стійкість перовськіту можна підвищити за рахунок нанесення полімеру PVB. Встановлено, що незалежно від співвідношення вихідних реагентів плівки перовськіт/ PVB (5 мас. %) є стійкішими до дії вологи, ніж плівки PVB (2 мас. %). Використання полівінілбутирально дозволило значно підвищити стійкість плівок до дії вологи.

Роботу виконано за підтримки НАН України в рамках проєкту «Синтез та дослідження нанорозмірних функціональних матеріалів для енергогенеруючих та енергозберігаючих систем» (реєстраційний номер 0123U103024).

ELECTROCHEMICAL HYBRID SUPERCAPACITOR FOR ENERGY HARVESTING SYSTEMS

Dmitry Patlun, Anna Vereshchak and Volodymyr Khomenko^(*)

*Kyiv National University of Technologies and Design,
2, Nemyrovycha-Danchenka str., Kyiv, 01011, Ukraine.
Tel.: +38 098 849 8517 E-mail: v.khomenko@i.ua

The ability to harvest energy from the surroundings of a load and its conversion to electrical energy is known as Energy Harvesting. Today, this field has been attracting significant interest. This activity is growing due to developments in microelectronics. Energy systems based on footwear power generators can provide an alternative energy source for soldiers to power their low-power consumption devices such as GPS and communication devices. This can reduce the number of needed batteries during their long-range mission.

Energy storage from a piezoelectric generator is a complex, poorly defined process. Commonly, batteries are used as energy storage devices. However, batteries have certain disadvantages, such as low power density, limited life cycle, and comparatively slow response in accumulating puls energy from a piezoelectric generator. On the other hand, an Electric double-layer capacitor (EDLC) can effectively accumulate puls energy due to high power capability, cycle efficiencies, and long life cycles. However, the energy density in EDLCs is hundreds of times lower than in batteries. Hybrid capacitors offer distinct advantages over EDLC including improvements in energy density. In this work, hybrid capacitors based on the intercalation of ions of an ionic liquid in a graphite electrode and activated carbon were used for energy storage from a piezoelectric generator embedded in the sole of a shoe. The hybrid supercapacitor with high specific energy density systems will bring the advantage of an energy system based on footwear power generators. Moreover, the design of the hybrid supercapacitor using ILs electrolyte proposed in this project is based on safe concepts to guarantee the absence of the danger of thermal runaway as is in the case of lithium-ion batteries.

The piezoelectric generator prototype, including four PZT disks of 27 mm diameters, reached less than 25 mW as generated power. The laboratory prototype shows that the energy flow from human walking could be efficiently accumulated in our designed hybrid supercapacitors. The hybrid cell with a 4.0 V maximum working voltage reaches high specific energies of ~30 Wh/kg. Conversely, the EDLC capacity has up to 3.0 V maximum working voltage and specific energies of ~6 Wh/kg.

The work demonstrates the extraordinary capability of designed hybrid supercapacitors to accumulate energy from footwear piezoelectric power generators.

Acknowledgement

The authors acknowledge the NATO Science for Peace and Security Programme, which supports this work under grant SPS G5772. Also, the authors acknowledge the Ministry of Education and Science of Ukraine for support in the program's framework to support projects of the NATO Program "Science for Peace and Security".

TITANIUM ALLOYS AND COMPOSITES FOR LIGHTWEIGHT HYBRID SOFCs

**Podhurska V.Ya.^{1(*)}, Ostash O.P.¹, Kuz'menko M.M.², Prikhna T.O.³,
Sverdun V.B.³, Kyrsha A.A.¹**

¹ *Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine*

² *Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, 3, Krzhizhanovsky str., 03142, Kyiv, Ukraine*

³ *Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2 Avtozavodska str., Kyiv 04074, Ukraine.*

*Tel.: +38 097 313 8503 E-mail: podhurskavika@gmail.com

Solid oxide fuel cells (SOFCs) are widely used as means of alternative energy. The main trends in their improvement today are a decrease in operating temperature from 700–900°C to 550–650°C and weight (aircraft, cars, etc.), as well as an increase in efficiency. The weight of the SOFC interconnects can be reduced by replacing traditionally used steels with titanium alloys or composites (with a density of 3.9–4.5 g/cm³ versus 7.8–8.0 g/cm³). Its efficiency can be increased by combining it with a microgas turbine (MGT).

In this work, the structure and physical and mechanical properties of titanium alloys and composites of various alloying systems are studied: Ti–Al–V; Ti–Si–X; Ti–Nb–X; Ti–Al–X; Ti–Si–C; Ti–Al–C; (Ti, X)–Al–C; Ti–(Al, X)–C; (Ti, X)–(Al, X)–C, where X=Al, Zr, Si, Nb, Mo, Cr, Sn, B.

Materials for interconnects must possess high both oxidation resistance and electrical conductivity in the oxidized state, and materials for MGT — high both oxidation resistance and high-temperature strength. Long-term (1000 h) oxidation resistance at 600°C in air, which is characterized by the parameter $\Delta m/S$, where Δm is the increase in the mass of the sample, mg; S is the surface area of the sample, mm² was estimated. Surface electrical conductivity (σ) was determined by the four-point measurement scheme at 20°C after long-term oxidation. Flexural strength (σ_f) was estimated by 3-point bending at 600°C in air and hydrogen.

It was established that the Ti–6Al–6Zr–0.7Si–0.3Mo–0.2Nb alloy and the composite based on the Ti₂(Al_{0.75}Sn_{0.25})C MAX phase have the best combination of oxidation resistance and electrical conductivity ($\Delta m/S = 0.63$ mg/cm², $\sigma = 1.2 \cdot 10^3$ S/m) and ($\Delta m/S = 0.17$ mg/cm², $\sigma = 0.6 \cdot 10^2$ S/m), respectively.

Besides, Ti–47Al–4Nb–1Mo–0.5Cr alloy has a significant advantage in terms of the combination of high oxidation resistance and high-temperature strength ($\Delta m/S = 0.04$ mg/cm², $\sigma_f = 1230$ MPa in air and $\sigma_f = 1314$ MPa in hydrogen).

Acknowledgement The work was supported by the NATO project SPS G5949 “Light-Weight 600°C Solid Oxide Fuel Cells for Energy Security (LW-SOFC)”.

RPLD SYNTHESIS OF HETEROSTRUCTURES BASED ON BORON DOPED ZnO/PEROVSKITE

Rud M.O.¹, Mulencko S.A¹, Popov V.M.^{1,4}, Galstian I.Ye.^{1,2}, Len E.G.^{1,3}

¹*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, NASU,
36 Acad. Vernadsky Bvrd, 03142 Kyiv, Ukraine*

²*Leibniz Institute for Solid State and Materials Research,
Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden, Germany*

³*Kyiv Academic University, NASU and MESU,
36 Acad. Vernadsky Blvd., 03142 Kyiv, Ukraine*

⁴*Research Institute of Microdevices, NASU,
3 North Syretska Str., 04136, Kyiv, Ukraine*

Transparent conductive oxides (TCOs) are widely used as conductive films in advanced optoelectronic devices such as panels, solar cells, organic LEDs, and gas sensors. ZnO is one of the main TCO materials. It is an n-type semiconductor with high electrical conductivity at room temperature. It is highly transparent and, unlike ITO, is inexpensive, non-toxic and chemically stable in the hydrogen plasma process [1]. ZnO has a hexagonal wurtzite structure and has good electrical and thermal conductivity, high exciton binding energy and a wide bandgap. These properties make ZnO a promising replacement for ITO [1, 2]. However, the tendency to adsorb air oxygen leads to an increase in the resistivity of pure ZnO due to a decrease in the number of oxygen vacancies. In order to stabilize oxygen vacancies and interstitial zinc atoms and thereby reduce the resistivity, it is proposed to dope ZnO films with impurity elements from various groups, for example, group III elements such as boron, aluminium, indium, gallium, etc., or group VII element, such as fluorine. Among these elements, boron has the best effect on the photovoltaic efficiency and other physical properties of ZnO films. In addition, the radius of boron is about 27 pm, which is smaller than that of zinc and oxygen, consequently, boron can replace both interstitial atoms and positions of any component of the ZnO lattice. An additional incentive to study the properties of zinc oxide films in combination with various light-absorbing materials was the emergence of new materials for photovoltaics, especially cheap perovskites. The optimal ZnO film thickness for perovskite photovoltaic cells is 25 nm, resulting in a high efficiency (energy conversion efficiency) of 15.7% [1].

However, studies on the doping of ZnO films with other chemical elements are far from being completed. The RPLD method makes it possible to obtain thin (25–35 nm) ZnO films of uniform thickness with a controlled concentration of oxygen vacancies. The idea of this work is to combine fundamental research on the effect of boron doping of the structure and electronic properties of multilayer ZnO/perovskite heterostructures with the solution of applied problems of development and RPLD synthesis of the corresponding materials and optimization of their properties to increase the stability and energy conversion efficiency of perovskite solar cells.

1. Yin Tung Albert Sun, Po-Chuan Pan, Horng-show Koo, Nei-Yi Lin, *Precision Engineering*, **66**: 605 (2020).
2. Kun-Mu Lee, Sheng Hsiung Chang, Kai-Hung Wang, Chun-Ming Chang, Hsin-Ming Cheng, Chi-Chung Kei, Zong-Liang Tseng, Chun-Guey Wu, *Solar Energy*, **120**: 117 (2015).

OPTIMIZATION OF MODES OF OBTAINING $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ FILM SOLID SOLUTIONS

**Vashchynskyi V.M.^{*}, Ilchuk H.A., Semkiv I.V., Solovyov M.V.,
Karkulovska M.S.**

Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine

^{}Phone: +38 032 258 27 66 E-mail: v.vashchynskyi@gmail.com*

The rapid development of advanced technologies prompts the search for new, alternative sources of energy. Thin-film solar cells based on II–VI semiconductor compounds (CdSe , CdS , CdTe) are one of them. The electrical and optical properties of semiconductor films are sensitive to the used deposition method, so the choice of their production is principal in the study of optically active semiconductor thin films. One of the approaches to enhance the efficiency of solar cells is the incorporation of a solid solution $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ by introducing selenium (Se) into the absorbing material of CdTe . $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ is characterized by a smaller band gap and influences the increase of carrier lifetime. Therefore, the investigation of the properties of thin-film materials, particularly $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ of $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ group considering their different growing conditions is of high practical value.

CdX ($\text{X} = \text{S}$ and Te) thin films and solid solutions have been obtained by high-frequency magnetron deposition using a VUP-5M vacuum station (Selmi, Ukraine). The temperature has been controlled using a PE-202 PID temperature controller with a K-type thermocouple. The size of the substrate for the thin film deposition has been ~ 14 mm. Before the film deposition process, the substrate surface has been cleaned by boiling in a high-purity CCl_4 solution for 30 minutes.

The phase analysis and crystal structure refinement for obtained thin films have been examined using x-ray diffraction analysis at room temperature by the diffractometer DRON-2.0.

The spectral dependence of the optical transmittance (AvaSpec-2048 Avantes Fiber Optic Spectrometer) of the obtained samples in the visible and near-infrared regions has been studied at room temperature.

The transmission spectra of thin films exhibit a distinct absorption edge. By applying the obtained results to construct a Tauc plot, the optical band gap E_g has been determined.

Acknowledgments

The present work was supported by the National research foundation of Ukraine (project No 2022.01/0163).

РОЗЧИННІСТЬ АТОМІВ ВОДНЮ В СПЛАВАХ АВ

**Золотаренко Ан.Д.^{1,2(*)}, Золотаренко Ол.Д.^{1,2}, Матисіна З.А.¹,
Аханова Н.Е.^{4,5}, Уалханова М.⁵, Щур Д.В.^{1,3}, Габдуллін⁴, Рудакова О.П.¹,
Золотаренко О.Д.¹, Чимбай М.В.¹, Загорулько І.В.⁶**

¹ Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна

² Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижановського 3, Київ 03142, Україна

³ Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми 4000, Україна

⁴ Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁵ Національна нанотехнологічна лабораторія, КазНУ ім. Аль-Фарабі
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁶ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського 36, Київ 03142, Україна
*Тел.: +38 985060057 E-mail: a.d.zolotarenko@gmail.com

Розглянуто чинники, які впливають розчинність атомів втілення у металевих сплавах. Розглянуто електронні структури сплаву та розчинність у них. Розглянуто атомне впорядкування в сплаві АВ і методи розрахунку розчинності для сплавів, що впорядковуються, з ГПУ, ГЦК структурою і октаедричними порами втілення типу АВ. Встановлено параметри статичного розподілу атомів у сплаві. Розглянуто відносну розчинність, як функцію ступеня далекого порядку та вплив об'ємних ефектів на величину ступеня далекого порядку у сплаві. У дослідницькій роботі було розглянуто наступні системи: Fe–Ni, Au–Cu, Pd–Au, Fe–Cr, Ti–Al, Cu–Zn, Ag–Zn, Fe–Al, Au–Ag, Fe–V, Pd–Pt, Ni–Mn, Ni–Fe, Cu–Au, Cu–Pd, Pd–Nb, Pd–Ag, а також трикомпонентні сплави.

Висновки: Після огляду різноманітних металів і сплавів можна зробити висновок, що розуміння параметрів розчинності домішок може призвести до можливості прогнозувати та оцінювати багато фізичних характеристик багатокомпонентних сплавів у майбутньому. Дослідницька робота дала кілька важливих висновків, включаючи формули для визначення розчинності домішкових атомів в упорядкованих сплавах зі структурою АВ, а також той факт, що впорядкування зводить до нуля розчинність певних атомів у повністю впорядкованих сплавах. Встановлено також, що взаємодія атомів у потрійних твердих розчинах має істотний вплив на загальну побудову потрійної діаграми. Крім того, об'ємні ефекти сильно впливають на ступінь дальнього порядку в сплавах. Розуміння впливу тиску на міжатомну взаємодію може допомогти передбачити зміни властивостей сплаву під тиском. При вивченні процесу введення домішкових атомів важливо враховувати багато факторів, у тому числі взаємодію розчинених атомів між собою.

ФЕРОЕЛЕКТРИКИ KDP-КРИСТАЛІВ

**Золотаренко Ан.Д.^{1,2(*)}, Золотаренко Ол.Д.^{1,2}, Матисіна З.А.¹,
Аханова Н.Е.^{4,5}, Уалханова М.⁵, Щур Д.В.^{1,3}, Габдуллін⁴, Рудакова О.П.¹,
Золотаренко О.Д.¹, Чимбай М.В.¹, Загорулько І.В.⁶**

¹ *Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна*

² *Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижановського 3, Київ 03142, Україна*

³ *Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми 4000, Україна*

⁴ *Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан*

⁵ *Національна нанотехнологічна лабораторія, КазНУ ім. Аль-Фарабі
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан*

⁶ *Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського 36, Київ 03142, Україна
Тел.: +38 985060057 E-mail: a.d.zolotarenko@gmail.com

У даній роботі представлена термодинамічна теорія для фероелектриків різних структур, включаючи кристали KDP, які можуть бути сорбентами водню, а також – статистична теорія кристалів KDP, заснована на молекулярно-кінетичних уявленнях, що дозволяє визначити, пояснити та обґрунтувати їх фізичні властивості.

Визначено температурну залежність параметра порядку, пропорційного ступеня спонтанної поляризації та деформації, а також з'ясовано умови, за яких фазовий перехід у кристалах KDP проявляється перетворенням другого роду, близьким до першого. Проведено оцінку конфігураційної теплоємності, її температурної залежності та перепадів у точці фазового переходу. Визначено температурні залежності прямої та зворотної діелектричної проникності або чутливості.

До основних висновків можна віднести: Була розроблена статистична теорія спонтанної поляризації та деформації у порошках KDP кристалів з урахуванням фазового переходу параелектрик–фероелектрик як типу упорядкування. За допомогою цієї теорії вдалося встановити температурну залежність параметра порядку, його характер, залежність від напруженості зовнішнього електричного поля, а також прояв її нелінійності. Було розглянуто особливості температурної залежності конфігураційної теплоємності та показано, що вона близька до експериментальної саме для випадку фазового переходу, близького за родом до першого. Також було показано, що температурні залежності прямої та зворотної сприйнятливостей такі, що справедливим є закон Кюрі–Вейсса для кристалів KDP. Усі результати порівняли з експериментальними даними та отримали якісну відповідність, що говорить про коректність розробленої статистичної теорії.

АТОМНЕ ВПОРЯДКУВАННЯ У СПЛАВІ A_3B

**Золотаренко Ан.Д.^{1,2(*)}, Золотаренко Ол.Д.^{1,2}, Матисіна З.А.¹,
Аханова Н.Е.^{4,5}, Уалханова М.⁵, Щур Д.В.^{1,3}, Габдуллін⁴, Рудакова О.П.¹,
Золотаренко О.Д.¹, Чимбай М.В.¹, Загорулько І.В.⁶**

¹ Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна

² Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижановського 3, Київ 03142, Україна

³ Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми 4000, Україна

⁴ Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁵ Національна нанотехнологічна лабораторія, КазНУ ім. Аль-Фарабі
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁶ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського 36, Київ 03142, Україна
*Тел.: +38 985060057 E-mail: a.d.zolotarenko@gmail.com

У даній роботі було проведено теоретичне дослідження атомного впорядкування у сплаві A_3BC_x та вивчено взаємний вплив процесів упорядкування та розчинності домішки C у сплаві A_3B . Було знайдено та вивчено залежність розчинності від складу сплаву, температури та ступеня далекого порядку. Також у роботі отримано критерії прояву екстремальності у концентраційній та температурній залежності розчинності. Процес атомного впорядкування вивчався з допомогою методу середніх енергій, особливості процесу розчинності домішки C у сплаві A_3B , що вдалося з'ясувати з допомогою способу змін.

Висновки: У цій роботі було проведено теоретичне дослідження атомного впорядкування в бінарних сплавах A_3B структури $A15$ з домішкою третього компонента C . Розраховано вільну енергію системи залежно від складу сплаву, температури, параметра атомного впорядкування та енергетичних констант взаємодії між атомами. Знайдено рівняння рівноваги, що визначає ступінь далекого порядку, як функцію складу сплаву та температури. Встановлено, що у системі можливе фазове перетворення першого порядку типу порядок–порядок. Встановлено критерій такого переходу. Розрахована розчинність домішки C у сплаві A_3B . Визначено залежність розчинності компонента C у сплаві від концентрацій компонентів A та B , температури та ступеня далекого порядку. Отримано формули, що дозволяють передбачати закономірності зміни ступеня далекого порядку та розчинності домішки C у сплаві A_3B при зміні температури та складу сплаву.

Робота виконана за часткової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проекту 2020.02/0301 "Розроблення нових функціональних матеріалів для потреб водневої енергетики".

МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ ШАРУВАТИХ ОКСИДНИХ КАТОДНИХ МАТЕРІАЛІВ НАНОЧАСТИНКАМИ $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$

Лісовський І.В.¹, Хоменко В.Г.^{2(*)}, Солопан С.О.¹, Білоус А.Г.¹

¹Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського,
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Україна

²Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Немировича-Данченка, 2, Україна

*Тел.: +38 098 849 8517 E-mail: v.khomenko@i.ua

Літій-іонні акумулятори (ЛІА) переважно використовуються в портативних електронних пристроях, електроінструментах та батареях для електротранспорту. Перспективними катодними матеріалами для ЛІА, завдяки високій розрядній ємності (180–220 мА·год/г) та високій щільності енергії (>280 Вт·год/кг), є шаруваті оксиди нікелю, кобальту та мангану $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (NMC, $x + y + z = 1$). Проте, через заміну частину кобальту на нікель, цим катодним матеріалам притаманні низька стабільність характеристик впродовж заряд/розрядного циклування та високий рівень пожежної небезпеки ЛІА, зумовлені структурною нестабільністю та побічними реакціями на границі катодний матеріал/електроліт. Одним з найбільш ефективних підходів, які можуть бути використані для покращення характеристик катодних матеріалів, є модифікація їх поверхні літій-іонними провідниками. Перспективним матеріалом для модифікації поверхні катодних матеріалів є $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) зі структурою NASICON, неорганічний літій-іонний провідник з іонною провідністю $\sim 10^{-4}$ См/см. Захисний шар з частинок LATP може одночасно підвищити стабільність характеристик катодного матеріалу та зменшити перехідний опір на границі катод/твердий електроліт при розробці твердотілого літійового акумулятора з твердим електролітом на основі LATP.

В даній роботі було проведено дослідження впливу методу нанесення захисного покриття з наночастинок LATP на електрохімічні характеристики комерційних катодних матеріалів типу NMC, зокрема, $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$, $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ та $\text{LiNi}_{0.4}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.4}\text{O}_2$. Показано, що створення захисного покриття з наночастинок LATP на поверхні частинок NMC покращує електрохімічні характеристики вищезазначених катодних матеріалів. Зокрема, втрата ємності для модифікованого катодного матеріалу $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ на 150-му циклі в 2 рази менша, порівняно з вихідними катодними матеріалами. Таким чином, нанесення покриття з наночастинок LATP на катодні матеріали може суттєво покращити стабільність електрохімічних характеристик літій-іонних акумуляторів та збільшити строк їх експлуатації.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту «Розробка нових типів твердотілих літійових акумуляторів високої ємності для забезпечення енергетичної безпеки України» (ID 2022.01/0154).

СЕКЦІЯ 3. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ НАДПРОВІДНИХ І МАГНІТНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

ТЕМПЕРАТУРНО ІНДУКОВАНІ ЗМІНИ У ГІСТЕРЕЗИСІ НАНОДИСКІВ СИНТЕТИЧНИХ АНТИФЕРОМАГНЕТИКІВ

**Боринський В.Ю.^{1(*)}, Поліщук Д.М.², Савіна Ю.О.², Пашченко В.О.²,
Кравець А.Ф.^{1,3}, Товстолиткін О.І.¹, Коренівський В.³**

¹ Інститут магнетизму НАН України та МОН України, бульв. Акад. Вернадського 36-б, Київ, Україна

² Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна
НАН України, просп. Науки 47, Харків, Україна

³ Nanostructure Physics, Royal Institute of Technology, Hannes Alfvéns väg 12,
Stockholm, Sweden

*Тел.: +38 068 928 6729 E-mail: vladyslav.borynskyi@imag.kiev.ua

Сфера наномagnetизму наразі активно займається пошуком енергоефективних способів локалізованої теплової регуляції, важливих для біомедичних і технічних розробок [1]. Синтетичні антиферромагнетики (САФ) представляються перспективним рішенням, адже завдяки своїй унікальній конструкції здатні не лише перебувати в ферромагнітному чи антиферромагнітному стані, але й зазнавати температурно керованого перемагнічування між ними. Зокрема, нещодавно було показано [2], що таке перемикання САФ зумовлюється фазовим переходом слабо ферромагнітного легованого спейсера FeCr і дозволяє досягти гігантського магнітокалоричного ефекту.

У нашій роботі [3] ми демонструємо, що термомагнітний перехід можливо реалізувати у нанорозмірних планарних дисках $\text{Ru}/\text{Ni}_{60}\text{Cu}_{40}/\text{Ru}$ шляхом подавлення дипольної міжшарової взаємодії і перетворенням їх у квазіодношарові елементи. Немонотонна температурна залежність коерцитивної сили гістерезису яскраво відображає зміни в енергетичному балансі під час цього процесу. Мінімум коерцитивності досягається при рівності конкуруючих ефективних полів дипольної та обмінної взаємодій, і співпадає з точкою фазового переходу спейсера NiCu ($T_C \approx 150$ K). За таких умов коерцитивна сила визначається виключно анізотропними властивостями шарів що складають САФ. При подальшому охолодженні масивів САФ в області $T < T_C$ вона починає стрімко зростати, що ми пов'язуємо з посиленням магнітного впорядкування та анізотропії у легованому спейсері NiCu.

1. L. Peixoto, R. Magalhães, D. Navas, S. Moraes, C. Redondo, R. Morales, J. P. Araújo and C. T. Sousa, *Appl. Phys. Rev.*, **7**, No. 1: 011310 (2020).

<https://doi.org/10.1063/1.5121702>

2. D. M. Polishchuk, Yu. O. Tykhonenko-Polishchuk, E. Holmgren, A. F. Kravets, A. I. Tovstolytkin and V. Korenivski, *Phys. Rev. Materials*, **2**, No. 11: 114402 (2018).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.114402>

3. V. Yu. Borynskyi, D. M. Polishchuk, Yu. O. Savina, V. O. Pashchenko, A. F. Kravets, A. I. Tovstolytkin and V. Korenivski, *Low Temp. Phys.*, **49**, No. 7: 863 (2023).

<https://doi.org/10.1063/10.0019699>

ВИСОКОЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЛІЗОВМІСНОГО НАД- ПРОВІДНОГО МОНОКРИСТАЛУ $\text{LaOFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$

Каленюк О.А.^{1,2}, Футимський С.І.^{1,2(*)}, Шаповалов А.П.^{1,2}

¹Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна

²Київський академічний університет, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна.

* E-mail: futimsky@imp.kiev.ua

В роботі досліджувалися температурні характеристики високочастотних втрат ($\sim 0,93$ ГГц) на перемагнічування надпровідного залізвмісного монокристалу $\text{LaOFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{As}$, де $x=0,0576$ з орієнтацією змінного магнітного поля H_{rf} перпендикулярно та паралельно ab площині кристалу. Фото кристалу на фоні міліметрового масштабу клітинок приведено на рис.1.б. Отримання характеристик відбувалось за допомогою резонансного методу з вимірюванням добротності Q мідного роздільно-кільцевого резонатора (SRR), в середині якого розміщувався монокристал (рис.1.а). Просторове розділення магнітної та електричної складової високочастотного поля є основною особливістю такого резонатора, яка дозволяє розміщувати зразок безпосередньо виключно у високочастотному магнітному полі. Для резонатора виконується співвідношення між втратами високочастотної енергії $P_{dis} \sim 1/Q$: $\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_d}$, де втрати енергії: $1/Q_c$ – у провіднику резонатора, $1/Q_d$ – у діелектрику, $1/Q_s$ – у надпровіднику.

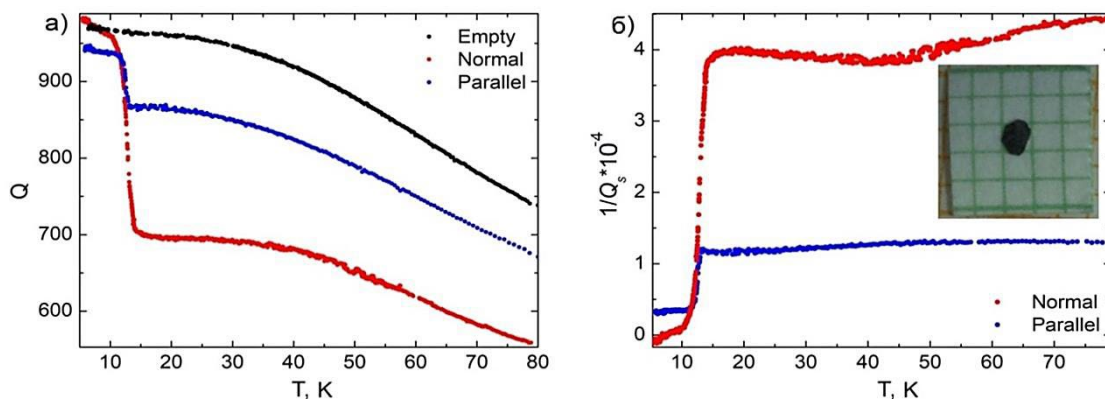


Рис.1. Температурні залежності: добротностей порожнього SRR резонатора (Empty), а також з паралельною (Parallel) і перпендикулярною (Normal) орієнтацією магнітного поля H_{rf} по відношенню до площини ab монокристалу (а); високочастотні втрати на перемагнічування для двох орієнтацій (б).

Результати досліджень вказують на існування анізотропії високочастотних втрат у кристалі, причина якої може бути в існуванні в структурі кристалу надпровідних площин, що розділені нормальними шарами.

Ця робота частково підтримувалася в рамках проекту 2020.02/0408, що фінансується Національним фондом досліджень України.

NEW HETEROMATERIAL DIELECTRIC COMPONENTS FOR MODERN MICROWAVE COMMUNICATIONS

Fedorchuk O.P., Torchyniuk P.V., Lisovskii I.V.*

*V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry,
32/34 Palladina Ave, Kyiv 03142, Ukraine*

**Phone: +38 099 549 87 50, E-mail: i-lisovskii@i.ua*

Communication and microwave systems heavily depend on microstrips, low-loss dielectric materials, and magnetics as non-reciprocal constituents. Non-magnetic dielectrics have negligible energy losses, high stability of properties. The advancement and downsizing of modern microwave devices and networks necessitate the development of “smart” components with adjustable characteristics, which proves infeasible when employing pure dielectric constituents. Ferrites possess the ability to change transmission characteristics under a constant magnetic field but fall short of meeting energy loss requirements. In this work, we combine nonmagnetic dielectrics with ferrites to obtain materials that possess the advantages of both components.

Nickel NiFe_2O_4 and nickel–zinc $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrites particles, with an average particle size of 50 nm, were utilized. Suspensions containing ferrite particles mixed with Permabond UV630 photopolymer were applied to the ends of the BaTi_4O_9 resonators. Obtained films were covered with protective glass and exposed to UV light for polymerization. Films with varying film thicknesses (50, 80, 100, 200 nm) and different concentrations of ferrites in the suspension (100, 175, 200, 350, 300, 500 mg/ml) were produced.

Impact of obtained elements on the transmission characteristics of a x-band waveguide was examined. This evaluation was conducted using an Agilent N5230A PNA-L vector analyzer. By placing the elements inside the waveguide, researchers were able to analyze how different film thicknesses and ferrite concentrations influenced the waveguide's transmission characteristics.

The most promising outcomes were obtained from the element with a film thickness of 100 nm and a ferrite concentration of 300 mg/ml. Under the influence of a magnetic field, this element exhibited a remarkable maximum absorption of approximately 50 dB, while the absorption in the transmission band remained low (<1 dB). Moreover, the frequency shift recorded was approximately 70 MHz.

These results strongly advocate for the possibility of the integration of these created elements into microwave lines, potentially serving as replacements for non-reciprocal components such as valves, circulators, phase shifters, and concentrators.

The work was carried out with the support of the National Academy of Sciences of Ukraine as part of the project "Synthesis and research of nanoscale functional materials for energy-generating and energy-saving systems" (registration number 0123U103024).

АВТОМАТИЗОВАНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ СТАНІВ СКВІДу

Мартиненко І.О.¹, Каленюк О.А.^{1,2}, Шаповалов А.П.^{1,2}

¹Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна

²Київський академічний університет бульвар ак. Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна
*Тел.: +38 0638928286 E-mail: i.martynenko@kau.edu.ua

В роботі розглянуто методику автоматичного визначення оптимальної зондуєчої частоти для отримання максимальної чутливості при зміні стану ВЧ СКВІДу. Така науково-технічна задача вкрай необхідна для швидкого визначення змін станів зв'язаного з ВЧ СКВІДом кубіту. Було розроблено та виготовлено ВЧ СКВІД, який базується на точковому контакті Nb–Nb з можливістю регулювання величини критичного струму при температурі 4,2 К. Контур СКВІДу зв'язаний з ВЧ резонатором який мав резонансну частоту 12,57 МГц. За допомогою аналізатора НВЧ кін були отримані амплітудно-частотні (АЧХ) та фазо-частотні (ФЧХ) характеристики резонатору СКВІДу у режимі максимальної і мінімальної потужності. В цих режимах струм значно менше або значно більше критичного струму контакту СКВІДу (рис. 1, криві -40 та -5 відповідно). Таким чином, було визначено дві крайні АЧХ, які визначають діапазон зміни резонансної частоти СКВІДу. На нижніх графіках приведені частотні залежності різниці між АЧХ та ФЧХ. Ці залежності визначають чутливість детектування зміни стану СКВІДу від зондуєчої частоти. Слід зауважити, що для АЧХ і ФЧХ ці частоти не співпадають. Принцип запропонованої методики полягає у автоматичному вимірі АЧХ і ФЧХ, та визначенні значення скануючої частоти для досягнення максимальної чутливості системи детектування станів СКВІДу.

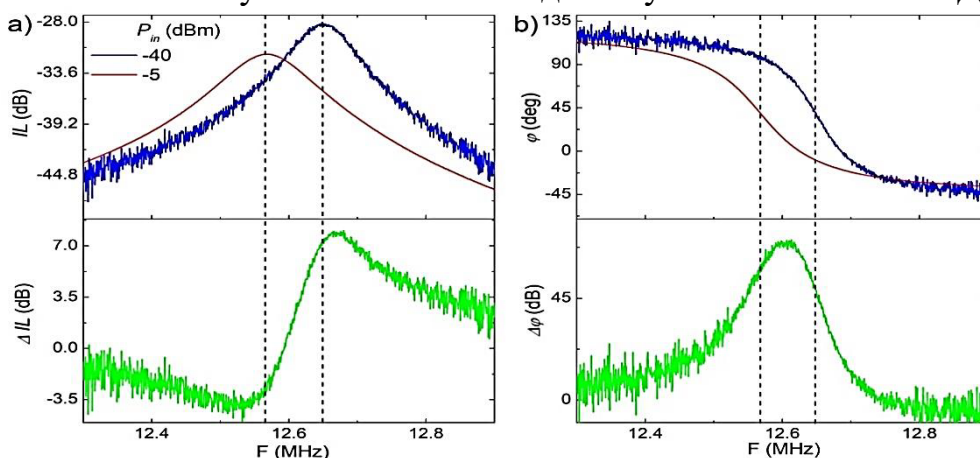


Рис. 1 Амплітудно-частотні а) та фазово-частотні б) характеристики РЧ СКВІДу зі струмом у контакті меншим (залежність -40) та більшим (залежність -5) ніж критичне значення. Чутливість

Ця робота проводилася в рамках проекту SPS G5796, що фінансується НАТО, та проекту № 0123U103334, що фінансується МОН України.

СТРУКТУРА МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ПРИ ЗМІНІ ЧАСТОТИ ТА КОНФІГУРАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Прилипко О. О., Максимов С. Ю., Берднікова О. М.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
Тел.: +38 00671274409. E-mail: ead56@ukr.net*

Потреба в розширенні асортименту добре зварюваних сталей призвела до розвитку наукового напрямку щодо використання зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ) на розплав зварювальної ванни для інтенсифікації процесів його дегазації, подрібнення структури, підвищення значень показників міцності і пластичності швів. В результаті експериментальних досліджень була показана ефективність ЗЕВ для зниження схильності металу швів до утворення пор, а механізм дегазації, сформований під впливом ЗЕВ, сприяє досягненню високого ступеня однорідності дрібної пористості [1, 2].

Більшою мірою дія ЗЕВ при зварюванні низьколегованої сталі спостерігається у лінії сплавлення та зоні термічного впливу (ЗТВ) по ділянках перегріву (великого зерна) і нормалізації (повної перекристалізації). При застосуванні поздовжнього магнітного поля (МП) у зоні лінії сплавлення при формуванні крупнозернистої структури спостерігається градієнт по мікротвердості, що призводить до тріщиноутворення. Це може бути причиною подальшого крихкого руйнування зварного з'єднання [3]. Поперечне МП забезпечило формування найприйнятнішої структури з'єднання при рівномірному рівні мікротвердості як у металі шву, так і по ділянках ЗТВ, та помітному подрібненні структури на ділянці перегріву (І ЗТВ) та нормалізації (ІІ ЗТВ). Вивчено фазовий склад, мікроструктуру та мікротвердість металу зварних з'єднань, отриманих із застосуванням поздовжнього МП при різних частотах ($f = 2; 12; 50$ Гц). Дія частоти ЗЕВ спостерігається у металі швів та ЗТВ на ділянці перегріву (великого зерна). При $f = 12$ Гц забезпечується рівномірний рівень мікротвердості як у металі шву, так і у ЗТВ. Таки структурні зміни будуть сприяти одержанню якісних зварних з'єднань та забезпечать їх зміцнення і тріщиностійкість.

1. R.N. Ryzhov, V.D. Kuznetsov, Automaticheskaya svarka, № 10 (2006) (inRussian).
2. M. V. Ageeva, A. D. Razmyshlyayev, Technical sciences and technologies, **18**, № 4 (2019). (inRussian). DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-22-27
3. O.M Berdnikova, S.Y. Maksimov, O.O. Prilipko, T. A. Alekseenko E.V. Polovetskyi and I.I. Alekseenko, Materials Science, **57**, № 1 (2021). DOI 10.1007/s11003-021-00515-4.

КОНТАКТНА СПЕКТРОСКОПІЯ НАДПРОВІДНИХ ПЛІВОК НІТРИДУ НІОБІЮ

**Болясова О.О.^{1,2}, Таренков В.Ю.^{1,3(*)}, Шаповалов А.П.^{2,3}, Каленюк О.А.^{2,3},
Дмитренко В.Ю.¹, Шамаєв В.В.⁴**

¹ *Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О Галкіна НАН України,
пр. Науки, 46, 03028, Київ, Україна*

² *Державна наукова установа «Київський академічний університет», бульвар
Академіка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна*

³ *Інститут металофізики імені Г.В. Курдюмова НАН України, бульвар Акаде-
міка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна*

⁴ *Донецький національний технічний університет, пл. Шибанкова, 2, 85300, По-
кровськ, Україна*

*E-mail: tarenko304@gmail.com

Завдяки порівняно високій критичній температурі та відносній простоті виготовлення надпровідні плівки нітриду ніобію мають великий потенціал щодо застосування в електроніці. Наявні дані тунельної спектроскопії для величини надпровідної енергетичної щільності в плівках NbN добре узгоджуються з теоретичними уявленнями, але водночас вакуумна тунельна спектроскопія не має достатньої роздільної здатності для одержання детальної інформації про спектри колективних збуджень у надпровідниках. Більш якісну інформацію про величину параметра порядку можна отримати з вимірювань провідності контактів надпровідник–нормальний метал з андреєвським характером проходження струму в зразку.

Нами досліджено характеристики тонких плівок NbN, отриманих лазерним розпиленням мішені на сапфірові підкладки. Критична температура надпровідного переходу становила $T_c = 13,2$ К. У диференціальній провідності контактів NbN–Ag ми спостерігали особливості при напрузі $V_1 = 2,56$ мВ і $V_2 = 0,9$ мВ. Характер цих особливостей дозволяє пов'язати їх із двома щільностями в спектрі збуджень нітриду ніобію, що вказує на двозонний характер надпровідності в цьому матеріалі. Цей висновок підтверджується також спостереженням осциляційної структури Леггетта, пов'язаної з фазовою взаємодією двох надтекучих конденсатів у різних зонах NbN.

Робота частково підтримана Європейською федерацією академій наук і гуманітарних наук у рамках "Європейського фонду для переміщених учених" (Grant No. EFDS-FL2-05). Б.О. і Ш.А. вдячні проєкту НФДУ 2020.02/0408 "Багатозонність електронних станів: фізика та застосування" за підтримку даних досліджень.

DELTA- T QUANTUM NOISE IN SUPERCONDUCTING ENERGY-EFFICIENT DEVICES

Zhitlukhina E.^{1(*)}, Shapovalov A.², Belogolovskii M.², Seidel P.³

¹ *O.O. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, 46 Nauki Ave., Kyiv 03028, Ukraine*

² *Kyiv Academic University, 36 Vernadsky Blvd., Kyiv 03142, Ukraine*

³ *Institut für Festkörperphysik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 5 Helmholtzweg, Jena 07743, Germany*

*E-mail: elena_zhitlukhina@ukr.net

The reduction in sizes of novel electronic systems to the nanoscale often results in very large temperature gradients leading to new unexpected heat transfer regimes. Therefore, probing temperature fields with nanometer resolution is critical for improving our capability to manage thermal transport in small-scale circuits and create novel efficient heat removal techniques.

Measurements of delta- T noise arising due to the discrete nature of current-carrying carriers in mesoscopic nanoscale samples and probing thus their granularity is a new technique whose most fascinating feature is the presence of current fluctuations despite the absence of an average current $\bar{I} = \langle I(t) \rangle$ through the sample. In particular, it can occur due to a temperature bias ΔT when the voltage bias $V = 0$. In the work, we apply this idea to hybrid normal-metal–superconductor bilayers where the effect is more pronounced due to the strongly nonlinear energy dependence of interface scattering characteristics in the gap region. We show that the temperature-induced noise is strongly sensitive to the interface scattering strength in superconducting nanojunctions where it is enhanced due to the presence of additional electron-into-hole scattering events while suppressed when the interface transparency grows. Increase of the temperature gradient reduces and smears the effect. Our numerical calculations show that related frequency-dependent noise spectra can be used to find the amplitude and the frequency of stochastic ac fluctuations in the sample or to increase the output signal. Such experiments are of particular importance for studying multiband superconducting materials due to the emergence of a new energy scale.

In general, sensitivity of delta- T fluctuations to properties of quasiparticles in superconductors can make such noise a valuable tool for analyzing quantum-transport experiments and developing thermal design in complex integrated circuits. A multitip scanning tunneling microscope can be used for practical implementation of the proposed approach. It has the advantage over the conventional four-probe technique in that this method does not require injected current and therefore it is enough to apply only two tips.

This work was carried out within the framework of the project 2020.02/0408 funded by the National Research Foundation of Ukraine and was partly supported by the German–Ukrainian collaborative project “Controllable quantum-information transfer in superconducting networks” (DFG project SE 664/21-1, No. 405579680).

MAGNETIC CHARACTERIZATION OF TRANSPARENT INDIUM–TIN OXIDE SUPERCONDUCTING FILMS

**Aliev A.¹, Parra A.¹, Shapovalov A.², Belogolovskii M.²,
Zhitlukhina E.^{3(*)}, Gregor M.⁴, Plecenik T.⁴**

¹ *Alan G. MacDiarmid NanoTech Institute, University of Texas at Dallas, 800 West Campbell Rd., 75080 TX, Richardson, USA*

² *Kyiv Academic University, 36 Vernadsky Blvd., 03142, Kyiv, Ukraine*

³ *O.O. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, 46 Nauki Ave., Kyiv 03028, Ukraine³*

⁴ *Comenius University, Mlynská dolina, 84248, Bratislava, Slovak Republic*

*E-mail: elena_zhitlukhina@ukr.net

Transparent superconductors exhibiting zero resistance and high optical transparency simultaneously are part of a larger family of transparent electronics, an emerging science and technology field focused on invisible electronic circuitry and optoelectronic devices. Although the material properties of high electrical conductivity and optical transmittance seem to be mutually exclusive, a careful adjustment of the physical parameters in some functional materials has led to the development of wide-bandgap oxides with critical temperatures (T_c) of several K and small absorption in the infrared and visible regions. A typical representative of such unique materials is doped indium–tin-oxide (ITO).

In this work, we report detailed magnetotransport properties of $\text{In}_{2-y}\text{Sn}_y\text{O}_{3-\delta}$ layers ($y \sim 0.2$) doped by sodium or magnesium by studying temperature and angular dependences of the upper critical field H_{c2} . The simplest way to find these parameters in type-II superconducting condensates is resistive $R(T)$ measurements across the normal metal-to-superconductor transition fixed by the resistance drop. In this case, the transition temperature $T_c(H)$ in an applied magnetic field H measures the upper critical field as $H_{c2}(T=T_c(H)) = H$. It should be noted that the parent amorphous compound In_2O_3 exhibits superconductivity with T_c lower than 0.3 K. Our results showed that the critical temperature can be enhanced up to 4–5 K by increasing the carrier density with wet electrochemical doping. In addition to the emergence of superconductivity, other properties of the ITO layers varied greatly upon doping by Na or Mg, including the color of the films changing from transparent to dark brown with increasing charge injection. Detailed analysis of resistive non-local four-probe measurements showed that the highest T_c and a fairly uniform superconducting state are achieved at a charging time near 1000 s with 0.1 mA/cm² cathodic current density most likely due to a more homogeneous dopant distribution. The relatively high critical magnetic fields of about 1–2 T in sodium and magnesium doped ITO films correspond to a short Ginzburg–Landau coherence length of nearly 13–18 nm.

The joint activities in the field of electrochromic metal oxides for transparent superconducting electronics are supported by the NATO Science for Peace and Security Programme, project G6082.

POSSIBILITY OF DIRAC FERMIONS EXISTENCE IN $\text{Bi}_{95.69}\text{Mn}_{3.69}\text{Fe}_{0.62}$

A.V. Terekhov¹, V.B. Stepanov¹, Yu. A. Kolesnichenko¹,
E. Löhderanta³, K. Rogacki², A.L. Solovjov^{1,2,*}

¹*B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv 61103, Ukraine*

²*Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences, Wrocław 50-422, Poland*

³*Lappeenranta University of Technology, School of Engineering Science, 53850 Lappeenranta, Finland*

*Tel.: +38 099 005 1479 E-mail: solovjov@ilt.kharkov.ua

It was found that the $\text{Bi}_{95.69}\text{Mn}_{3.69}\text{Fe}_{0.62}$ polycrystal, which consists of a bismuth matrix and $\alpha\text{-BiMn}$ inclusions, has a number of unusual properties [1]. The anomalous temperature dependence of the magnetization can be associated with a reorientation transition of the magnetic moments of Mn in the $\alpha\text{-BiMn}$ phase, caused by a change in the sign of the magnetic anisotropy constant. In turn, the dependences $\rho(T)$ in a magnetic field are strongly anisotropic. A huge positive magnetoresistance $MR(T) = \{[\rho(H) - \rho(0)]/\rho(0)\}$ is observed with a maximum value of 4500% for a magnetic field of $B = 14$ T, when B is perpendicular to the transport current. One possible explanation is a change in the overlap between the electron and hole Fermi surfaces under the influence of $\alpha\text{-BiMn}$ phase magnetism, as well as the magnitude and direction of the external magnetic field.

In addition, Dirac fermions existence may be taking place in $\text{Bi}_{95.69}\text{Mn}_{3.69}\text{Fe}_{0.62}$. $\text{Bi}_{95.69}\text{Mn}_{3.69}\text{Fe}_{0.62}$. In a quantum limit all the carriers occupy only the lowest Landau level (LL). To satisfy the quantum limit, i.e., when the difference between the zeroth and first Landau levels, $\Delta_{LL} > k_B T$, a very large magnetic field is needed. But in some materials hosting Dirac fermions with linear energy dispersion, such as graphene, pure bismuth [2], topological insulators etc., the quantum limit can be achieved in low-field region. We perform the same analysis of our MR results and obtained the same $B^*(T) = (1/2e\hbar v_F^2)(k_B T + E_F)^2$ dependence, which was previously observed in systems with Dirac fermions [3]. This suggests the possibility of Dirac fermions existence in our sample.

- [1] A. V. Terekhov, K. Rogacki, A. L. Solovjov et al., Low Temp. Phys. **44**, 1153 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5060969>
- [2] Chuang-Han Hsu, Xiaoting Zhou, Tay-Rong Chang, Qiong Ma, Nuh Gedik, Arun Bansil, Su-Yang Xu, Hsin Lin, and Liang Fu, PNAS **116**, 13255 (2019); <https://doi.org/10.1073/pnas.1900527116>
- [3] Yue Sun, Sunseng Pyon, and Tsuyoshi Tamegai, Phys. Rev. B **93**, 104502 (2016); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.10450>

СЕКЦІЯ 4. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ МЕРЕЖ ЕНЕРГОТРАНСПОРТУВАННЯ

OBSERVATION OF DYNAMIC STABILITY IN NONEQUILIBRIUM SYSTEMS BASED ON TITANIUM ALLOYS

**Solntsev V.P.^(*), Bagluk G.A., Solntseva T.O.,
Petrash K.M., Mamonova A.A., Molchanovska G.M.**
*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU
Omeliana Pritsaka., 3, Kyiv 03142, Ukraine*
**Mob.: +38 050 800 3845 E-mail: solntcevp@gmail.com*

The search for self-organizing inorganic systems is of fundamental importance in connection with the development of hypersonic, thermonuclear and other types of technology operating in extreme conditions. Materials based on them are able to dissipate energy, self-restore their internal structural defects that accumulate during operation, and thereby significantly increase not only their service life, but also their functional properties [1, 2]. Such systems have been discovered [3, 4]. More complex systems are of interest, so the composition of the VT-14 alloy was chosen as the basis, due to its low aluminum content (up to 4%). When a source of thermodynamic instability (sulfur and selenium compounds) is introduced into the composition, aluminum should, by analogy with oxygen, form stable compounds with these elements due to its greater thermodynamic affinity for these elements. The compositions were sintered in a vacuum at temperatures significantly higher than the range of existence of compounds based on selenium and sulfur.

X-ray microspectral analysis showed that the system retains its nonequilibrium, as evidenced by the presence of titanium sulfides and selenides. X-ray phase analysis showed that if in the system with sulfur there are only Ti_2S and TiS compounds, then in the composition with selenium, in addition to Ti_2Se and $TiSe$, the $TiSe_2$ compound is also present. When sulfur is introduced in the form of molybdenum disulfide, a significant amount of aluminum intermetallides is released, while when molybdenum diselenide is introduced, only Ti_3Al is present.

The obtained results indicate that compounds of the transition metals with sulfur and selenium, being thermodynamic unstable compounds in complex systems, are sources of excitability and the formation of nonequilibrium dynamically stable states, and in essence they form self-organizing compositions.

1. Солнцев В.П. Теоретические и экспериментальные предпосылки наблюдения элементов самоорганизации в технологии реагирующих порошковых систем / В.П. Солнцев, В.В. Скороход // Порошковая металлургия. – 2012. – №11/12. – С. 5–17.
2. Солнцев В.П. Развитие работ в области создания износостойких материалов конструкционного назначения для космической техники // Порошк. металлург., 2014. – №3/4. – С. 30–38.
3. Солнцев В.П. Особенности взаимодействия титана с диселенидами Переходных металлов IVA группы в области их термодинамической неустойчивости / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.А. Солнцева // Совр. пробл. физ. материал., вып. 20, 2011. – С. 65–72.
4. Солнцев В.П. Физико-химические принципы выбора источника постоянной возбудимости при создании порошковых материалов с элементами самоорганизации / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.А. Солнцева // Совр. пробл. физ. материал., – 2010. – Вып. 19. – С. 112–121.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ В НЕРІВНОВАЖНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ ТИТАНУ

**Солнцев В.П.^(*), Баглюк Г.А., Солнцева Т.О.,
Петраш К.М., Мамонова А.А., Молчановська Г.М.**

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України
вул. Омеляна Прицака, 3, Київ 03142, Україна*

**Тел.: +38 050 800 3845 E-mail: solntcevp@gmail.com*

Пошук неорганічних систем, що самоорганізуються, має принципове значення у зв'язку з розвитком гіперзвукової, термоядерної та інших видів техніки, що працюють в екстремальних умовах. Матеріали на їх основі здатні розсіювати енергію, саме відновлювати свої внутрішні структурні дефекти, що накопичуються в процесі експлуатації, і тим самим істотно підвищувати не тільки термін експлуатації, але і свої функціональні властивості [1,2]. Такі системи були виявлені [3,4]. Цікаві складніші системи, тому в якості основи було обрано склад сплаву ВТ-14, що зумовлено невеликим вмістом у ньому алюмінію (до 4 %). При введенні в композицію джерела термодинамічної нестійкості (сполук сірки та селену) алюміній повинен за аналогією з киснем з цими елементами утворювати стійкі сполуки з більшою термодинамічною спорідненістю до цих елементів. Спікання композицій проводилося у вакуумі при температурах, що значно перевищують область існування сполук на основі селену та сірки.

Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що система зберігає свою нерівноважність, про що свідчать наявність сульфідів та селенідів титану. Рентгенофазовий аналіз показав, що якщо в системі з сіркою є тільки сполуки Ti_2S і TiS , то в композиції з селеном крім Ti_2Se і $TiSe$ є і сполука $TiSe_2$. При введенні сірки у вигляді дисульфиду молібдену спостерігається виділення інтерметалідів алюмінію у значній кількості, у той час як при введенні диселеніду молібдену є тільки Ti_3Al .

Отримані результати свідчать, що сполуки перехідних металів з сіркою і селеном, такі, що є термодинамічно нестійкими сполуками в складних системах, є джерелами збудливості та утворення нерівноважних динамічно стійких станів, а по суті вони утворюють композиції, що самоорганізуються.

1. Солнцев В.П. *Теоретические и экспериментальные предпосылки наблюдения элементов самоорганизации в технологиереагирующих порошковых систем* / В.П. Солнцев, В.В. Скороход // Порошковая металлургия. – 2012. – №11/12. – С.5–17.
2. Солнцев В.П. *Развитие работ в области создания износостойких материалов конструкционного назначения для космической техники* // Порошк. металлург., 2014. – №3/4. – С. 30–38.
3. Солнцев В.П. *Особенности взаимодействия титана с диселенидами Переходных металлов IVA группы в области их термодинамической неустойчивости* / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.А. Солнцева // Совр. пробл. физ. материал., вып.20, 2011. – С. 65–72.
4. Солнцев В.П. *Физико-химические принципы выбора источника постоянной возбудимости при создании порошковых материалов с элементами самоорганизации* / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, Т.А. Солнцева // Совр. пробл. физ. материал., – 2010. – Вып.19. – С. 112–121.

COPPER-CLAD ALUMINIUM WIRE FOR ENERGY NETWORKS

**Ziakhor I.V.¹, Nakonechnyi A.O.¹, Levchuk A.M.^{1(*)},
Wang Qichen², Linyu Fu³, Koltsov V.V.⁴**

¹*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazymyr Malevych str.,
03150, Kyiv, Ukraine*

²*CIMC Offshore Engineering Institute Company Ltd, Yantai, Shandong, P.R. China*

³*Yantai Fisend Bimetal Co. Limited, Yantai, Shandong, P.R. China*

⁴*Enterprise Technologies LTD. 1U Starosilska str., 02125, Kyiv, Ukraine*

**Tel.: +38 067 135 8723 E-mail: levchuk.a@gmail.com*

Bimetallic copper–aluminium (Cu–Al) composites are widely used in the energy transmission, telecommunications, and electronics industries. The production of Cu–Al composites is based on a combination of several technologies, namely: composite continuous casting of liquid aluminium on solid copper, multistage rolling, drawing, and heat treatment. In manufacture of copper clad aluminium (CCA) wire the significant problem arose of reliable welding of Cu–Al composite blanks before the operation of drawing the wire billets to a given diameter.

The complexity of reliable welding of Cu–Al composite blanks is associated with the possibility of delaminating of the aluminium core and the copper cladding layer (sheath), as well as the fact that when heated, aluminium and copper enter into a chemical reaction with the formation of brittle intermetallic layers. The problem of joining Cu–Al composites by fusion welding methods is associated with the formation of brittle eutectic and intermetallic layers in the fusion zone, which predetermines the low strength and ductility of the welded joints, and the impossibility of performing the subsequent drawing operation. The most promising methods for joining copper–aluminium composites are pressure welding methods.

The paper presents the results of investigations on pressure welding Cu–Al composite billets 8 mm dia. with 0.6...0.8 mm thickness of the outer copper sheath. Objective of the work is determination of the possibility of obtaining defect-free (without cracks and rupture of the copper sheath) welded joints of Cu–Al composite billets by the resistance butt welding (RBW). Regularities of the processes of heating, deformation, formation of welded joint microstructure were established, in particular, formation of intermetallic phases and eutectic interlayers in Cu–Al system under the conditions of thermal and deformational impact at different modifications of RBW.

Developed RBW technology allows ensuring good metallurgical bond between copper sheath and aluminium core, all the joints are covered by copper without any delaminating. Welded joint properties are: tensile strength not less than 120 MPa, the specific resistance is almost equal to the specific resistance of the Cu–Al billets itself.

The next stage of the research involves the multistage drawing of Cu–Al welded blanks in industrial conditions to achieve the specified diameter of the CCA wire for use in power transmission networks.

СЕКЦІЯ 5. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, НАНОМАТЕРІАЛИ

EFFECT OF ADDITIONAL LAYERS OF Cu AND Ag ON STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS IN Ni/Ti LAYERED STACKS

Palchekovskyi O.A., Kruhlov I.O., Voloshko S.M., Orlov A.K.

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Beresteisky Avenue 37, 03056 Kyiv, Ukraine*

**Тел.: +38 0930173611 E-mail: palchekovski2003@gmail.com*

NiTi thin films are widely used in microelectromechanical systems (MEMS) as a key component of microactuators, microsensors, microdrives, etc. due to their shape memory effect, good corrosion resistance, and high-yield strength. The primary benefits of NiTi thin films compared to bulk NiTi alloy include their rapid phase transition and high cooling rate, resulting in higher operational frequency and reduced response time. Typically, for synthesizing NiTi thin films, Ni and Ti targets are simultaneously sputtered to achieve a preformed NiTi alloy. An alternative approach which provides better control over NiTi chemical composition involves deposition of Ni/Ti layered stacks followed by their thermal treatment. Additionally, phase composition and properties of NiTi thin films may be tailored by their alloying with other elements such as Ag or Cu [1, 2]. However, while numerous studies applied film alloying during its deposition, the application of an additional intermediate Ag (Cu) layer in Ni/Ti stacks has not been reported yet.

Our study has showed that introduction of Ag(10 nm) and Cu(10 nm) layers in-between the Ni and Ti plays a vital role on the thermally-induced diffusion reactions in Ni(30 nm)/Ti(30 nm) stacks magnetron sputtered on Si(100) substrate. As follows from the data of XRD and SIMS measurements, an incorporation of Ag results in the formation of homogeneously distributed Ni₃Ti/NiTi₂ intermetallic phases after vacuum annealing at 400 °C. Furthermore, the Ag atoms segregate on the outer surface of the films that should positively impact their corrosion resistance. It is assumed that the presence of Ag layer inheres the amorphization between Ni and Ti at low temperatures, which is followed by the Ag solid-state dewetting promoting the anomalously fast diffusion of Ni into Ti. For the case of Cu, the Ni–Ti reactive diffusion is not observed due to the formation of NiCu substitutional solid solution at 300 °C. Even after 500 °C annealing, no NiTi intermetallics are formed in this system. Therefore, the introduction of Ag layer into the Ni/Ti stacks can be useful for the synthesis of NiTi intermetallics with shape memory effect and high corrosion resistance promising for MEMS applications.

1. K.T. Oh, U.H. Joo, G.H. Park, C.J. Hwang and K.N. Kim, *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.*, 76, № 2: 306–314 (2006).
<https://doi.org/10.1002/jbm.b.30369>
2. H. Du and Y. Fu, *Surface and Coatings Technology*, 176, № 2: 182–187 (2004).
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00625-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00625-X)

ВПЛИВ РОЗМІРНИХ ЕФЕКТІВ НА РАДІАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ СФЕРИЧНИХ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТИНОК

Мороз Г.В.¹, Корольков Р.Ю.¹, Коротун А.В.^{1,2(*)}

¹Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, 69063 Запоріжжя, Україна

²Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна

*Тел.: +38 061 764 6733 E-mail: andko@zpr.edu.ua

Спектральне перенесення випромінювання між частинками широко застосовується у багатьох областях, зокрема, для збереження енергії, в біоінженерії та для морського дистанційного зондування. Металеві наночастинки впроваджуються в поглинальний шар тонкоплівкових сонячних елементів, що сприяє підвищенню їх ефективності, внаслідок збудження локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Тому дослідження радіаційних властивостей металевих наночастинок, вбудованих у тонкоплівкові сонячні елементи є актуальною задачею.

Покращення характеристик тонкоплівкових сонячних елементів може відбуватися двома шляхами. По-перше, через збільшення розсіювання внаслідок його перенаправлення вглиб напівпровідника. По-друге, збудження ППР сприяє додатковому розсіянню падаючих фотонів і створює поблизу частинки сильне локальне електричне поле, яке призводить до дисоціації екситонів.

Для характеристики ефективності розсіювання електромагнітної енергії наночастинками використовують їх альбедо, що визначається відношенням енергії електромагнітного поля, розсіяної наночастинками, до енергії падаючої електромагнітної хвилі

$$AL = \left(1 + \frac{C_{\text{abs}}}{C_{\text{sca}}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де відношення

$$\frac{C_{\text{abs}}}{C_{\text{sca}}} = \frac{3}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 \frac{\text{Im} \alpha}{|\alpha|^2}; \quad (2)$$

c — швидкість світла; ω — частота падаючого електромагнітного випромінювання; α — поляризованість наночастинки.

Проведені розрахунки свідчать про доцільність впровадження в поглинальний шар тонкоплівкових сонячних елементів відносно великих ($R \sim 50$ нм) наночастинок срібла, в яких $AL \rightarrow 1$ в оптичній області частот.

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ СПЛАВІВ НІКЕЛЮ З КАРБІДОМ НІОБІЮ

Г.П. Дмитрієва, Т.С. Черепова, Т.В. Прядко, А.В. Носенко

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, Україн

**Тел.: +38 067 231 8476 E-mail: galina1225@gmail.com*

Розроблені в ІМФ НАН України промислові литі кобальт-карбідні сплави для енергетичного машинобудування серії ХТН, є композитами, в яких використовується перевага високодисперсної стабільної структури, що утворюється внаслідок евтектичної реакції кристалізації між твердим розчином легуючих елементів в кобальті та фазою втілення — карбідом NbC. Зважаючи на те, що кобальт і нікель взаємно розчинюються, а діаграма плавлення Ni–NbC належить евтектичному типу, актуальним вбачається заміна кобальтової основи сплавів ХТН на споріднений до матеріалу турбінної лопатки нікель без втрати основних властивостей. При заміні нікелем кобальту поряд з високотемпературним композиційним карбідним зміцненням при середніх температурах сплав додатково зміцнюватиметься γ' – фазою; важливе значення матиме також економічна доцільність розробки, оскільки нікель значно дешевший за кобальт.

Об'єктом дослідження є леговані однаковим зі сплавами ХТН комплексом елементів евтектичні литі сплави з карбідом ніобію на основі нікелю та нікелю з кобальтом нарівно. В результаті експериментального дослідження встановлено основні параметри евтектичної кристалізації таких сплавів. Температура плавлення (солідус) на рівні 1300 °C. Структура сплавів має ознаки злегка заевтектичної, визначається присутністю первинних нерозвинених дендритів карбіду ніобію в евтектиці, що притаманно серійним кобальтовим сплавам з карбідом ніобію серії ХТН. В фазовому складі сплавів, отриманих в умовах надшвидкої кристалізації, додатково з твердим розчином легуючих елементів в нікелі (γ) і карбідом ніобію (NbC) присутні метастабільні фази, збагачені хромом. Додаткове легування ренієм підвищує температуру плавлення нікелевих сплавів до рівня серійного кобальтового з карбідом ніобію евтектичного композиту ХТН і доповнює фазовий склад фазами, які містять реній [1]. За комплексом визначених фізико-хімічних властивостей досліджені литі евтектичні нікелеві з карбідом ніобію сплави перспективні для застосування в якості альтернативи кобальтовим сплавам серії ХТН для захисту від високотемпературного зношування робочих лопаток ГТД.

1. G.P. Dmytriieva, T.S. Cherepova, T.V. Pryadko, T.A. Kosorucova, A.V. Nosenko, *Metallophysics and Advanced Technologies*, **44**, №. 7: 873 (2022). <https://doi.org/10.15407/mfint.44.07.0873>

FORMATION OF METAL–CARBON HETEROSTRUCTURES
USING CONCENTRATED SOLAR RADIATION

**Iryna Galstian¹, Evgen Len^{1,2}, Mykola Yakymchuk¹, Yevhen Tsapko¹, Mykhaylo Rud¹,
Mykola Shevchenko¹, Halyna Mykhaylova¹, Gennadii Frolov³**

¹*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, NASU, 36 Acad. Vernadsky Bvrd, 03142 Kyiv, Ukraine*
²*Kyiv Academic University, NASU and MESU, 36 Acad. Vernadsky Blvd., 03142 Kyiv, Ukraine*
³*I. M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, NASU, 3 Omeliana Pritsaka Str., 03142 Kyiv, Ukraine*

Using metal-carbon composites, the temperatures of electron emission beginning can be reduced to 500 K [1]. Elucidation of the mechanisms of this effect requires further study of such systems, which is the subject of this work. The XPS method was used to measure the work function values of the Ti-TEG composite and its initial components. Comparing the experimentally obtained data, it can be argued that a mixture of hydrogenated Ti + 0.53 wt% TEG forms a composite whose emission properties differ significantly from those of a simple mixture and its pure components (Table 1).

Table 1. Work function values of the Ti-TEG composite and its initial components.

Ti	TEG	Ti-TEG
4.8 eV	4.29 eV	3.8 eV

By SEM and AFM methods, we have studied the changes in surface morphology of a nanostructured material based on Ti and TEG during its vacuum annealing in a solar energy concentrator. The results obtained show that this type of heat treatment leads to the formation of a surface with a high aspect ratio of relief elements (Figs. 1, 2), which is one of the main factors influencing the increase in the emissive properties of the composite.

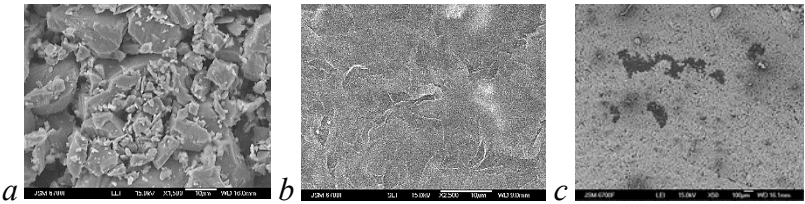


Fig. 1. SEM image of the surface of the initial composite, hydrogenated Ti-TEG (c) after pressing under a pressure of about 0.8 t/cm² and its metal (a) and carbon (b) components separately.

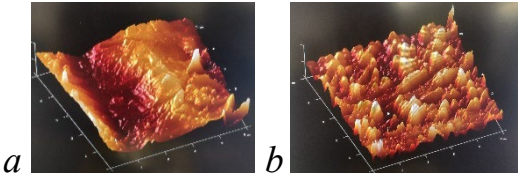


Fig. 2. Atomic force microscopy of the surface of the Ti-TEG composite before (a) and after (b) annealing in a solar concentrator at a temperature of about 650 K.

It has been found that a short-term temperature increasing significantly and irreversibly changes the structure of the composite and improves its emission properties. At the same time, the electrical properties of the composite material under the influence of temperature and solar radiation do not show significant changes during such treatment.

All the results obtained are important for the creation of low-temperature cathodes for direct thermionic energy converters.

1. I. Ye. Galstian et al., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 4: 451–470 (2020).

MECHANICAL REPLICATION OF LASER-INDUCED PERIODIC SURFACE STRUCTURES

Hrabovskyi Ye.S.^{1(*)}, Berezovska N.I.¹, Dmytruk I.M.¹, Dmytruk A.M.²

¹*Faculty of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Volodymyrska Street 64/13, Kyiv, 01601, Ukraine*

²*Institute of Physics of the NAS of Ukraine,
Avenu Nauki 46, Kyiv, 03028, Ukraine*

**Phone: +38 095 083 41 92 E-mail: hrabovskye@gmail.com*

Laser induced periodic surface structures (LIPSS) are (quasi-) periodic modulations on surfaces of materials which are formed as a result of irradiation with appropriate parameters. For linearly polarized beam, they appear in the form of regular gratings with period, which is slightly smaller than laser wavelength. This phenomenon was first discovered a few years after creation of the first lasers, it has some characteristic features of self-organization. Nowadays it is a contemporary field of surface functionalization and of light-matter interaction research. On the one hand LIPSS can be created on most of materials with a rather straightforward setup and in a wide range of process parameters. On the other hand, this phenomenon is not thoroughly understood and result depends on many parameters of laser beam, material and processing. This makes reproducibility and obtaining functional surface with predetermined properties for practical applications often difficult. The abundance of parameters involved although complicates fundamental studies of LIPSS. One of promising application of LIPSS is as elements of SERS substrates. Unfortunately, controlling properties like regularity of LIPSS on plasmonically active metals is more difficult than on Mo, W or steel.

LIPSS is naturally a field built around application of lasers, and most researchers have corresponding skills and mindset. But for some practical results it can be advantageous to turn to different methods, like mold casting or pressing (stamping). Obtaining surface structures with morphologies similar to LIPSS but created in a different way can although be beneficial for LIPSS research.

In this work we studied our first attempt of making of LIPSS replicas by means of straightforward mechanical pressing of Cu and Ag foils with molds in form of LIPSS on surfaces of Mo and W foils. LIPSS were created by irradiation of foils with linearly polarized 800 nm radiation of femtosecond Ti/sapphire laser. Then mold (Mo or W) and sample (Ag or Cu) foils were placed between gauge blocks (Johansson gauges) and pressed for around 30 seconds in a small manual hydraulic press. Resulting surface structures and molds before and after pressing were investigated by SEM and AFM. Quasiperiodic surface structures were obtained, though their relief depth is 25–50% smaller than on initial structure. Surface structure of mold did not receive noticeable damage in the process after a few repetitions. Technical complications of this approach and ways of overcoming them were identified. To evaluate applicability of such structures for SERS, Raman spectra of test substance (Rhodamine 6G) on smooth and structured surfaces were taken.

EFFECT OF THERMAL INDUCED REORGANIZATION OF DIFFERENT STRUCTURES TO ELECTROCONDUCTIVITY PROPERTIES OF HYDROTHERMAL SYNTHESIZED HEMATITE

Hrubiak A.B.^{*}, Ostafiychuk B.K.

G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine, 36 Academician Vernadsky Boulevard, 03142 Kyiv, Ukraine

^{}Tel.: +38 068 057 2434, E-mail: hrubiak0andrii@gmail.com*

In this work was recorded and interpreted that as a result of hydrothermal treatment of iron-containing solutions, along with the phase of crystalline hematite, the phase of defective hematite is formed, which can significantly affect the manifestation of conductivity. The relationship between thermal induced reorganization of different hematite structures with different types of conductivity and the formation of the intrinsic semiconductorness of hematite as a result of internal activation revealed.

Frequency measurements of electroconductivity at different temperatures (25–175°C) were carried out for the synthesized ultrafine crystalline/defective α -Fe₂O₃. At low temperatures of 25–75°C conductivity increases due to thermal activation of the charge. In the range of 100–175°C, there is a decrease in electroconductivity, which is characteristic of materials with metallic conductivity: the decrease in conductivity with increasing temperature due to increased scattering of charge carriers.

Since the change of type in conductivity occurs near the Morin temperature, this process can be described by considering a thermodynamic model of magnetic transitions antiferromagnet (AF) $\rightarrow$ ferromagnet (F), for which the transition with changing magnetic properties occurs not through one activated state but through the so-called unbound ions phase (UIP) in which individual spins have different orientations. The presence of a defective hematite structure increases the number of phase states with different spin orientations, which makes magnetic transitions more efficient. The processes of transformation of AF $\leftrightarrow$ UIP and UIP $\leftrightarrow$ F are temperature induced due to induced reorganization of different structures and with increasing temperature the transition AF $\rightarrow$ UIP is initiated, followed by depletion of C_{AF} and C_{UIP} concentrations and increase of C_F concentration. As a result, the formation of intrinsic semiconduction for hematite occurs due to the processes $2Fe^{3+} + h\nu \rightarrow Fe^{4+} + Fe^{2+}$, which leads to the formation of two types of charges for unalloyed hematite, which make a major contribution to intrinsic conductivity. At low temperatures (25–75 °C) the conductivity increases with increasing temperature, due to the transition AF $\rightarrow$ UIP and growth C_{UIP} . With further temperature increase, the process of magnetic transition UIP $\rightarrow$ F is initialized, as a result of which the concentration C_{UIP} decreases. Starting at 100°C, the competition of the two C_{UIP} inputs causes decrease in conductivity over the entire frequency range. Also given the presence of a significant contribution of defective hematite in the sample with increasing temperature, the mechanisms of surface conductivity are initiated by the defective structure, which causes an increase in the frequency of the dependent component of conductivity at temperatures of 100°C with increasing frequency.

MARTENSITIC TRANSFORMATION AND SHAPE MEMORY EFFECT IN Zr–Ta BINARY ALLOYS

Kedrovskiy S., Koval Yu., Slepchenko V., Slipchenko Vyach., Svystunov Ye.

*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine
Тел.: +38 097 5548275 E-mail: sergeyv88001@gmail.com

An actual research area in the materials science of functional materials for medical use is the search for hypoallergenic nickel-free alloys that are not inferior in their properties to the widely known nitinol. Biocompatible elements of groups IV and V, such as Ti, Zr, Hf, Nb, Ta [1] can serve as a promising basis. The presence of the shape memory effect (SME) in the alloys of the Zr–Nb system was previously discovered, and it was found that the martensitic transformation (MT) occurs in a wider concentration range [2, 3] than was previously believed [4]. Similar behavior is also possible in Zr–Ta alloys.

Alloys of the Zr–Ta system were investigated in the quenched state in the range of tantalum content from 6 to 14 at.%.

Metallographic structure analysis of the samples and x-ray structural studies revealed that the Zr₉₄Ta₆ alloy consists of martensitic hcp α' -phase, the Zr₉₀Ta₁₀ alloy is a three-phase—orthorhombic α'' -phase, bcc β -phase and hexagonal ω -phase, while the composition of the Zr₈₆Ta₁₄ alloy contains two phases— β -phase and ω -phase. The structural phase inhomogeneity of the samples is confirmed by the data of durometric analysis of the microhardness of the phases present in the alloys.

Using the method of dependence of deflection on temperature, it was established that only the Zr₉₄Ta₆ alloy exhibits the shape memory effect. According to calculations, the shape recovery coefficient for this alloy is 85%.

1. W. Tasaki, Y. Akiyama, T. Koyano, S. Miyazaki, H. Y. Kim, *Journal of Alloys and Compounds*, V. 931: 167496 (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167496>
2. S.N. Kedrovsky, Yu.N. Koval', and V.N. Slepchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 12: 1651 (2014) (in Russian)
<https://doi.org/10.15407/mfint.36.12.1651>
3. F. Okabe, H. Y. Kima, and S. Miyazaki, *Scr. Mater.*, 162: 412 (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.12.005>
4. S. Banerjee, P. Mukhopadhyay, *Phase Transformations. Examples From Titanium And Zirconium Alloys* (Pergamon Materials Series: 2007), 12, p 840.

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО РІЗАННЯ

**Н.І. Хріпта¹, Б.М. Мордюк¹, В.Ю. Малінін¹, М.А. Скорик¹, В.І. Закієв²,
О.В. Подобний³, Ю.І. Торба³, М.О. Гребенніков³, Д.В. Павленко^{3,4}**

¹*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. акад. Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна*

²*Національний авіаційний Університет,
просп. Любомира Гузара 1, 03058, Київ, Україна*

³*ДП «Прогрес імені академіка О.Г. Івченка»
вул. Іванова, 2, 69068, Запоріжжя, Україна*

⁴*Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна*

Враховуючи дрібносерійний характер виробництва авіаційної та ракетно-космічної техніки, на сьогодні проблема пошуку високопродуктивних методів формоутворення складнопрофільних поверхонь деталей газотурбінних та ракетних двигунів є актуальною. Одним із перспективних методів формоутворення є електроерозійне різання металевим дротом на верстатах з числовим програмним керуванням. Конкретним прикладом їх використання є заміна комплектів протяжок для обробки пазів в дисках компресора та турбіни, формоутворення профіля зубців шестерень, шліцьових з'єднань тощо. Головним фактором, що до сьогодні стримує розвиток цієї технології є негативний вплив тонкого шару, який формується на поверхні різання, на експлуатаційні характеристик деталі.

Одним із чинників підвищення несучої здатності деталей газотурбінних двигунів може бути використання оптимізованих термомеханічних оброблянь і модифікування поверхні виробів задля одержання заданих структурно-фазового стану та властивостей.

Відомо, що одним із ефективних методів нейтралізації дефектного шару після електроерозійного різання є методи інтенсивної пластичної деформації поверхні, у тому числі метод високочастотного ударного оброблення (ВЧУО) ультразвуковим ударним інструментом. За умови модифікування поверхні деталей з раціональними режимами суттєво зменшена шорсткість поверхні, нанорозмірна зеренна структура поверхневого шару та залишкові напруження стиснення в ньому сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик, а саме опору втомі, зношуванню та корозії. Таким чином у деяких випадках їх використання забезпечує можливість заміни методу формоутворення складнопрофільних поверхонь деталей газотурбінних двигунів на більш продуктивну електроерозійну обробку.

В роботі проведено дослідження енергетики процесу високочастотного ударного оброблення за допомогою ультразвукового інструменту з одним ударним елементом і нормальним до поверхні прикладенням ударів. Експериментально виміряно максимальну кінетичну енергію (або швидкість) і частоту стохастичних коливань бойків при амплітудах коливання ультразвукового концен-

тратора в діапазоні від 16 до 28 мкм. Проведено оцінку ряду параметрів удару, таких як час удару, максимальна сила удару, максимальне ударне напруження, щільність енергії та щільність потужності, що акумулюються при ударі у зоні контакту, та загальні щільності енергії та потужності, що передаються зразку за час ударної обробки.

За допомогою високочастотного ударного оброблення ультразвуковим інструментом проведена модифікація поверхні зразків нікелевого сплаву EI-698ВД (XH73МБТЮ-ВД), отриманих за двох режимів електроерозійного різання (ЕЕР). Аналіз стану поверхневих шарів за допомогою растрової електронної мікроскопії (SEM), мікрорентгено-спектрального аналізу (EDX), рентгеноструктурного аналізу (XRD) та наноіндентування показав, що після ЕЕР відбувається зміна механічних властивостей, пов'язана із термічним впливом ЕЕР і легуванням елементами латунного дроту (міддю та цинком). Вміст легувальних елементів і глибина їх проникнення (10–20 мкм та ~50 мкм у м'якому та жорсткому режимі, відповідно) корелює із змінами інструментальної твердості та модуля Юнга, визначених за кривими індентування. Модифікація поверхні веде до зменшення шорсткості Ra (відповідно у шість разів і втричі для поверхні після м'якого та жорсткого режимів ЕЕР).

Отримані результати доводять доцільність застосування фінішної модифікації поверхні авіаційних матеріалів у якості складової частини комплексного оброблення, що усуває наслідки мікролегування та зростання параметрів шорсткості. Позитивні ефекти полягають у зниженні ймовірності концентрації напружень на елементах мікрорельєфу чи у поверхневих шарах, що за умов експлуатації сприятиме запобіганню/унеможливленню передчасного руйнування, тобто забезпечуватиме підвищений ресурс експлуатації модифікованих виробів. Результати досліджень можуть бути використані для виконання задач, спрямованих на відбудову України у воєнний та повоєнний періоди, зокрема, для розроблення актуальних авіаційних технологій і матеріалів.

Роботу виконано завдяки НФДУ (2022.01-0038) та підтримки НАН України науково-технічних робіт за пріоритетним напрямом «Технології (зокрема квантові) одержання, з'єднання та діагностики інноваційних матеріалів і систем для потреб стратегічних галузей промисловості, оборони та медицини» (конкурсна тематика 6541230: проєкт 0123U100898).

ТУНЕЛЬНИЙ СТРУМ КОНТАКТУ Fe/MgO/Fe ЗА УМОВ ДЕФОРМАЦІЇ

Бурлаков В.О.^(*), Погорелов О.Є., Філатов О.В.¹

¹Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, Київ, Україна

^{*}Тел.: +380935671384 E-mail: odinpwnzpacan@gmail.com

Тунельний струм має нелінійну залежність від напруги і його величина залежить від площі контакту та товщини бар'єрного шару. За допомогою установки для кінетичного індентування УПМ-11 прикладалось навантаження (P) до залізного зонду (рис. 1), який поступово заглиблювався в шар діелектрика. Це приводило до його локальної деформації, в процесі якої реєстрували зміну тунельного струму та вольт-амперні характеристики між зондом та напорошеним шаром Fe (40 нм).

Це дозволило дослідити електричні властивості системи Fe/MgO/Fe за зміни фізичних параметрів, таких як площа контакту та товщина діелектрика. За отриманими результатами вимірів провідності для системи Fe/MgO/Fe визначено відповідні коефіцієнти та закономірності, що дали змогу аналітично розраховувати

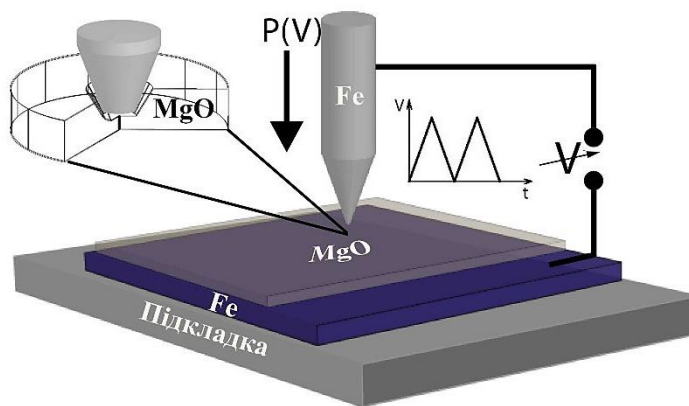


Рис. 1. Схема дослідження контакту Fe/MgO/Fe

вольт-амперні характеристики у широкому діапазоні товщини діелектрика та площі контакту. Встановлено, що опір тунельної системи Fe/MgO/Fe має немонотонну залежність від товщини діелектрика та зростає приблизно в 3 рази за збільшення товщини MgO напівперіод ґратки. Збільшення площі контакту приводить до лінійного зменшення опору системи Fe/MgO/Fe зі збереженням величини густини струму та наближенню експериментальної вольт-амперної характеристики до лінійної залежності. Це пов'язували з впливом на характер провідності системи локальних областей провідності, що виникають за рахунок дефектів та домішок.

МАГНЕТНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ГОЙСЛЕРОВОГО СТОПУ Fe_2CrGa

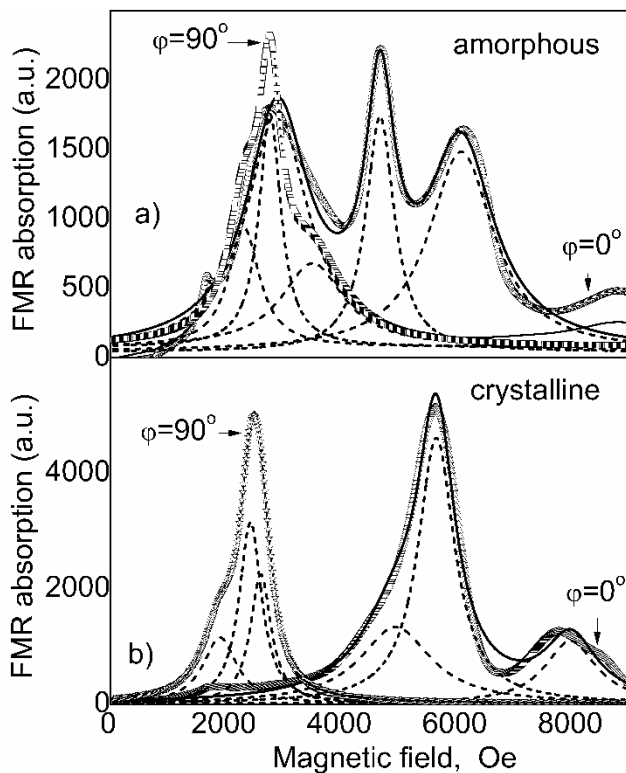
**Ю.В. Кудрявцев¹, В.О. Голуб², А.О. Перекос¹,
Т.Г. Кабанцев¹, М.П. Мельник¹, В.Ю. Таренков³**

¹Інститут металофізики ім. Г.В.Курдюмова НАН України, бульв. Академіка Вернадського, 36, UA-03142 Київ, Україна

²Інститут магнетизму НАН та МОН України, бульв. Академіка Вернадського, 366, UA-03142 Київ, Україна

³ Donetsk Physical and Technical Institute of the N.A.S. of Ukraine, Nauki 46, 03028, Kyiv, Ukraine
E-mail: kudr@imp.kiev.ua

В роботі досліджено статичні та динамічні магнетні властивості аморфних і впорядкованих за типом A2 кристалічних плівок Гойслерового стопу Fe_2CrGa , яких порівняно з магнетними властивостями масивного стопу Fe_2CrGa зі структурою типу A2. На відміну від літературних даних для масивного стопу Fe_2CrGa атомовий безлад в аморфному стані стопу приводить до значного зменшення його намагнетованості наситу. Відпал аморфних плівок стопу Fe_2CrGa за температури $T_{\text{від}}=740$ К спричинює їх кристалізацію з формуванням розупорядкованої структури типу A2 та відновлення намагнетованості наситу плівок до величин, близьких до намагнетованості масивного стопу.



Дослідження феромагнетного резонансу (ФМР) (див. рис.) показали, що як аморфні, так і кристалічні плівки стопу Fe_2CrGa у магнетному та кристалічному аспектах є неоднорідними. Виходячи з аналізу спектрів ФМР, зроблено висновок, що кристалічні плівки стопу Fe_2CrGa містять області, структура порядку в яких близька до $L2_1$ - і Hg_2CuTi -типів. Ці висновки добре корелюють з результатами першопринципних розрахунків магнетних властивостей стопу Fe_2CrGa . Також показано, що правило Слетера–Полінга не виконується для Гойслерових стопів із інверсною кристалічною структурою типу Hg_2CuTi .

БАГАТОШАРОВІ ГРАДІЄНТНІ ПОКРИТТЯ ІЗ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ ТА ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

**В.Н. Коржик¹, П.Д. Стухляк², О.М. Берднікова³,
О.С. Кушнарєва³, К.М. Лепіліна⁴, Р.З. Золотий²**

¹*Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Є.О. Патона в провінції Чжецзян,
вул. Фенар, 233, район Сяошань, м Ханчжоу, провінція Чжецзян, 311225, КНР*

²*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56, Тернопіль, 24600, Україна*

³*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150, Україна*

⁴*НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна*

**Тел.: +38 0442052563 E-mail: [*omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com)*

Експлуатації виробів в екстремальних умовах приділяють особливу увагу їх надійності та довговічності. Робота параболічних антен при мінусових температурах та атмосферних опадах зумовлює створення системи обігріву. Найбільш ефективним є використання плоских резистивних електронагрівачів за рахунок створення на тильній стороні антени багатошарового покриття на основі напилених шарів із оксиду алюмінію та сформованих наступних шарів із епоксидних композитів.

Перший та другий шари покриття виконані методом високошвидкісного багатокамерного детонаційного напилення [1] з порошку оксиду алюмінію Al_2O_3 : фракції 5...22 мкм (1 шар); 60...150 мкм (2 шар). У 1-му шарі слід очікувати пористості до 1,0%, а в другому – близько 25%. Пористість 2-го шару підвищить адгезійну міцність за рахунок механічної складової. Далі формують шар композиту, що містить епоксидний зв'язувач (ЕД-20), Al_2O_3 дисперсністю 10–20 мкм і аеросил (SiO_2) дисперсністю 100 нм. Для забезпечення електричної та механічної міцності, 4-й шар — на основі епоксидного композиту, що містить ЕД-20, оксид хрому (Cr_2O_3) дисперсністю 5–10 мкм і знежирену базальтову тканину товщиною 200 мкм. Вказані оксиди металів перспективні при нанесенні на алюмінієву основу. Такі шари мають високу електричну міцність на пробій, теплопровідність та адгезійну міцність за рахунок кристалічної сумісності між алюмінієвою основою та матеріалом напиленого шару. У матеріалі покриття при напиленні виникають наноструктурні утворення. Це забезпечує широкий комплекс експлуатаційних характеристик та тріщиностійкість при термоциклюванні. Запропоновано механізм збільшення електричної міцності матеріалів. Встановлено її підвищення на пробій епоксикомпозитів у 30–50 разів у порівнянні з вихідним, ненаповненим матеріалом.

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІБРИДНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ ГРАФЕНИ/FeCo ТА ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ/FeCo

Лісова О.М.^{1,2}, Махно С.М.^{1,3}, Гуня Г.М.¹, Горбик П.П.¹

¹*Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна, oksana.garkusha@gmail.com*

²*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бул. Академіка Вернадського, 36, Київ 03142, Україна*

³*Китайсько-український інститут промислових технологій новітніх матеріалів
15-й поверх, № 777, західна вулиця Чжунгуань, проспект Чжуаніши, район
Чженьхай, м. Нінбо, пров. Чжецзян, Китай*

Нанорозмірні металеві частинки можуть мати не тільки підвищену каталітичну активність, суперпарамагнітну поведінку та надпластичність, але також нижчу температуру та теплоту плавлення порівняно з матеріалами мікронного розміру. Унікальні оптичні та теплофізичні властивості графенових нанопластин (ГНП) та вуглецевих нанотрубок (ВНТ), а також особливості електронної структури були широко досліджені. У поєднанні з металевими наночастинками гібридні карбонові системи викликають значний інтерес з точки зору каталізу, біомедицини, оптики та енергетики.

Метою даної роботи є синтез металевих наночастинок FeCo, композитів багат шарові вуглецеві нанотрубки/FeCo (БВНТ/FeCo) та графенові нанопласти/FeCo (ГНП/FeCo) з різним вмістом наночастинок металів та встановлення вмісту для оптимального співвідношення магнітної та діелектричної компонент композитів.

Синтез двох серій композитів БВНТ/FeCo та ГНП/FeCo проводили методом співсаджень з розчину солей заліза, кобальту та водної суспензії БВНТ або ГНП. Композити досліджували методами електронної мікроскопії, РФА та комплексу електрофізичних методів [1].

Складові комплексної діелектричної проникності на частоті 9 ГГц значно вищі для наночастинок металів, ніж для їх композитів, що може свідчити про взаємодію наночастинок металів з поверхнею вуглецевої підкладки. Низькочастотні характеристики, зокрема провідність та діелектрична провідність також вищі для металевих частинок через більшу концентрацію металевого компонента. Гібридні наноккомпозити БВНТ/FeCo та ГНП/FeCo мають однаковий порядок величин електрофізичних показників.

Композити ефективно взаємодіють з електромагнітним випромінюванням НВЧ-діапазону за рахунок наявності високої магнітної проникності та магнітних втрат.

1. S.M. Makhno, O.M. Lisova, R.V. Mazurenko, P.P. Gorbyk, K.O. Ivanenko, M.T. Kartel & Yu.I. Sementsov. Appl. Nanosci. (2023), <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02763-z>

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ПОЛІМЕР–ВНТ ДЛЯ ЕФЕКТИВНИХ ПОГЛИНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

**Михайлова Г.Ю.^{1*}, Якимчук М.М.¹, Шевченко М.Я.¹,
Галстян І.Є.¹, Цапко Є.А.¹, Лень Є.Г.^{1,2}**

¹*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України*

бульвар Академіка Вернадського, 36; 03142, Київ, Україна

²*Київський академічний університет,*

бульвар Академіка Вернадського, 36; 03142, Київ, Україна

mihajlova.halina@gmail.com

Нові напрями нанотехнологій активно розвиваються, спираючись на використання композитних полімерних матеріалів. Це створює умови розвитку та впровадження нових методів та технологій, зокрема в напрямку поглинаючих електромагнітні хвилі покриттів. При переході до наномасштабних структур спостерігаються нові властивості, які не притаманні макроскопічним системам, що використовується для розширення спектру застосувань наноматеріалів.

Включення вуглецевих нанотрубок (ВНТ) в аморфно-кристалічну структуру полімерів фіксує їх орієнтацію, захищає від негативного впливу оточуючого середовища і може перевести полімер в провідний стан стрибком на 8 порядків величини електропровідності при перколяційному переході. Крім того, відомо, що деформація нанотрубок, змінює її електронну структуру й електропровідність на декілька порядків величин і приводить до нелінійних вольт-амперних характеристик. При поєднанні зазначених факторів можна забезпечити надвисоку чутливість композиту до дії деформацій, різного роду випромінювань, тощо. Наявність електронів провідності в нанотрубках, які введені в полімер, а також нанопор в композиті може привести до більш ефективного поглинання електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот за рахунок збудження колективних коливань електронів у розгалуженій стохастичній провідній мережі, яку формують нанотрубки, та дисипації енергії цих коливань через значну електрон-фононну взаємодію та її відведення завдяки підвищеній теплопровідності композитів, що є важливим для створення плівкових поглинаючих матеріалів.

Композитні матеріали полімер–ВНТ зберігають переваги хімічно інертної полімерної матриці та додатково набувають ознак міцнішого та електропровідного вуглецевого наповнювача. У таких композитах можна одночасно радикально змінювати декілька із вищезгаданих властивостей матеріалів. Тому дослідження природи та механізмів поглинальної здатності зазначених композитних матеріалів, а також їх зв'язку зі структурними особливостями є важливою і актуальною задачею. В рамках даної роботи створено та успішно випробувано на поглинання в ІЧ діапазоні нові композитні матеріали на основі стохастичних провідних мереж з ВНТ для потреб енергетики та оборонної сфери.

ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ І РОСТУ КРИСТАЛІВ ОКСИДУ НА ПОВЕРХНІ ВОЛЬФРАМОВИХ ЗРАЗКІВ, ЩО НАГРІВАЮТЬСЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

Орловська С.Г

*Одеський національний університет імені І.І.Мечникова,
Одеса, вул.Дворянська 2, Україна
Тел.: +38 096 9212316 E-mail: svetor25@gmail.com*

Оксиди вольфраму володіють унікальними властивостями, завдяки яким їх активно використовують в якості каталізаторів, для виготовлення рентгенівських люмінофорних екранів, газових сенсорів, в сучасних технологіях виробництва електрохромних вікон. Найбільш економічним та екологічно чистим методом отримання оксидів металів є контрольоване високотемпературне окиснення металевого дроту, що нагрівається електричним струмом у газовому середовищі [1]. Було встановлено, що в такий спосіб можна отримувати розгалужені оксидні структури, значно збільшуючи їх питому поверхню, і за допомогою температурного режиму регулювати властивості цих структур [2].

Мета роботи полягає в дослідженні фізико-хімічних механізмів та температурних режимів виникнення оксидних кристалічних структур на поверхні вольфрамових дротиків, що нагріваються електричним струмом, закономірностей розвитку дендритних структур, впливу форми вольфрамових дротиків на щільність і геометричні розміри оксидних утворень.

В роботі проведено експериментальні і теоретичні (фізико-математичне моделювання) дослідження температурних режимів утворення і зростання кристалів триоксиду вольфраму на поверхні окислених вольфрамових дротиків різних діаметрів, результати яких добре узгоджуються між собою.

Визначено середні температури зразків і локальні температури їх поверхні, за яких утворюються і зростають кристали триоксиду вольфраму. Доказано, що на початковій стадії кристали мають ниткоподібну та пластинчасту форми, які згодом, зі зростанням температури та часу окислення, починають розростатись в розгалужені дендритні структури. Деталізовано механізми розвитку дендритних структур. З'ясовано вплив температури на товщину оксидних плівок, розмір і форму кристалів, їх фрактальну розмірність, швидкості росту. Вивчено закономірності впливу форми вольфрамових дротиків (прямих, вигнутих) на особливості зростання кристалічних структур (питому щільність, розміри).

1. S.G. Orlovskaya, M.S. Shkoropado, F.F. Karimova, *Ukr. J. Phys.*, **56**, No. 12. 1312 (2011).
2. S. G. Orlovskaya, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 9: 1231 (2020) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.42.09.1231.

АДГЕЗІЯ ПЛІВОК AlN ДО ПОВЕРХНІ КЕРАМІКИ ZERODUR

Руденко Е.М., Короташ І.В., Полоцький Д.Ю., Новицька А.Є.

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 3603142 Київ, Україна.
Тел.: +38 097 778 7323, E-mail: polotskiy@ukr.net*

Унікальний комплекс фізичних і хімічних властивості нітриду алюмінію (AlN) робить цей матеріал привабливим для використання в цілому ряді напрямків електроніки. AlN відноситься до діелектричних матеріалів. Розрахункова ширина забороненої зони для AlN становить 6,2–6,28 еВ, а рухливість носіїв струму не перевищує значень 1–10 см²/(В·с), що підтверджує високі ізоляційні властивості цього матеріалу. Теплопровідність AlN — 170–190 Вт/(м·К). Відносна діелектрична проникність (на частоті 1 МГц) — 8,7–9. Фізичні властивості плівки AlN суттєво залежать від параметрів і способів росту даних плівок.

Важливою характеристикою для застосування плівок AlN є їх адгезія до підкладки. Останнім часом для важливих електронних приладів в якості конструкційних матеріалів застосовується кераміка Zerodur, що має дуже низький коефіцієнт термічного розширення $0.05 \pm 0.10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20°C–300°C).

Нами проведено експериментальне дослідження адгезії плівок AlN до підкладок з кераміки Zerodur. Плівки AlN були синтезовані методом геліконно-дугового іонно-плазмового осадження [1]. Перед нанесення плівок поверхня кераміки Zerodur оброблялась в плазмі геліконного розряду 10–15 хвилин. Для напилення Al використовувався плазмово-дуговий прискорювач. В реакційній камері було застосовано або чистий азот N, або суміш аргону Ar та азоту N. Напруга розряду складала 40 В і 70 В. Синтез плівок AlN в обох випадках тривав 30 хвилин.

Для виміру адгезії було застосовано механічний адгезіметр відривного типу NOVOTEST АЦ-1. Для розширення діапазону вимірів було виготовлено спеціальні грибки. Отримані значення адгезії склали для зразків в плазмі чистого азоту 16 МПа, а для плазми суміші газів Ar і N адгезія була вище границі виміру адгезіметра (більше 20 МПа).

Таким чином, проведені дослідження показали, що використання гібридних геліконно-дугових іонно-плазмових технологій відкриває можливість отримати плівкові покриття із високоякісними характеристиками адгезії, що дозволяє створювати вироби високоточного приладобудування із покращеними характеристиками термостабільності і надійності.

1. Е. М. Rudenko et al., Prog. Phys. Met., **20**, No. 3: 485 (2019) DOI:10.15407/ufm.20.03.485

КІНЕТИКА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСНЕННЯ ЕВТЕКТИЧНИХ ЛИТИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ З КАРБІДОМ НІОБІЮ

Г.П. Дмитрієва¹, Т.С.Черепова¹, Т.В. Прядко¹, Ю.С. Семенова²

¹*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна*

²*Leibniz Institute for Solid State and Materials Research Dresden*

*Тел.: +38 097 479 3616 E-mail: pryadko@imp.kiev.ua

Для створення нового евтектичного литого сплаву для захисту від зношування робочих лопаток газотурбінних двигунів нового покоління проведені експериментальні дослідження високотемпературного окиснення литих евтектичних з карбідом ніобію легованих сплавів на основі нікелю та нікелю з кобальтом нарівно $\text{Ni}/(\text{Ni}+\text{Co}) - \text{NbC}$. Легуючими елементами слугували хром, вольфрам, алюміній та залізо. З метою можливості використання таких сплавів в енергетичному машинобудуванні для порівняння властивостей досліджено інтенсивність окиснення жаростійкого зносостійкого промислового лопаткового сплаву ВЖЛ2 в тих же експериментальних умовах.

Визначено, що в умовах 50-годинного циклічного відпалу на повітрі в режимі нагріву до температури 1100 °С, витримки впродовж 10 годин та охолодження з піччю, найбільша швидкість окиснення для усіх досліджених сплавів спостерігається впродовж перших 7–10 годин, що обумовлено початковим окисненням до утворення захисного оксидного шару, та викликаним ним уповільненням швидкості окиснення за параболічним законом.

Відхилення від параболічного закону окиснення для сплавів $\text{Ni}-\text{NbC}$ та ВЖЛ2, основою яких є тільки нікель, вказує на те, що втратою маси, обумовленою випаровуванням хрому, при описанні кінетики процесу не можна знехтувати, а необхідно враховувати не тільки константу швидкості параболічного окиснення K_p , а й константу летючості хрому K_v .

Стійкість до високотемпературного окиснення сплаву $(\text{Ni}+\text{Co})-\text{NbC}$ в умовах експерименту дещо нижча за таку для сплаву з виключно нікелевою основою. Швидкість окиснення підпорядковується параболічному закону, присутність ніобію у складі сплаву покращує адгезію оксидного шару при 1100°С і є сприятливим для кращої стійкості зовнішніх оксидів проти розколювання при охолодженні.

Аналіз дифузійно-окиснювальних процесів при температурі 1100°С на повітрі свідчить про те, що підвищення жаростійкості відбувається в результаті інтенсифікації спікання окалини та формування дифузійного бар'єрного шару з оксидів хрому, алюмінію та ніобію на поверхні сплавів.

Результати дослідження кінетики високотемпературного окиснення довели, що складне термооброблення і значний вміст легуючих елементів не надає суттєвої переваги сплаву ВЖЛ2, евтектичний легований композит $\text{Ni}(\text{Ni}+\text{Co}) - \text{NbC}$ не поступається за рівнем жаростійкості, що і визначає його перспективність для використання у енергетичному машинобудуванні.

ФРАКТАЛЬНА ПРИРОДА ДОМЕННОЇ СТІНКИ З БЛОХОВОЮ ТОЧКОЮ В ЦИЛІНДРИЧНОМУ ФЕРОМАГНІТНОМУ НАНОДРОТІ

Шевченко А.Б., Мельник О.Б., Олійник О.В.

*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Акад. Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна
¹E-mail: neutrino@ukr.net*

Вивчення фізичних властивостей феромагнітних нанодротів (ФН) являє одну із актуальних задач сучасного матеріалознавства. Серед вказаних об'єктів особливу увагу привертають циліндричні ФН, магнітна структура яких характеризується доменною стінкою (ДС) з Блоховою точкою. Дані наносистеми, завдяки своїм унікальним якостям, є перспективними матеріалами для застосування в різноманітних нанотехнологіях (див. огляд у [1]).

Важливою проблемою, яка виникає при вивченні ДС з Блоховою точкою, є вибір адекватного підходу до опису її магнітної структури. В цьому контексті слід відмітити роботу [2], в якій вивчається розподіл вектору намагніченості $\vec{M}$ в центральній площині ДС. Саме в цій області ДС відбувається найбільш характерні трансформації вектору $\vec{M}$, які впливають на властивості ФН. Подальші дослідження показали, що вказаний вище підхід відповідає фрактальній геометрії, алгоритм розбудови якої пов'язаний з магнітною вихровою коміркою, яка утворюється навколо ядра Блохової точки [3]. При цьому має враховуватись характерний радіус δ обмінної взаємодії векторів $\vec{M}$. Вплив поля розмагнічування циліндру призводить до відповідного розподілу кіл, що містять $\vec{M}$, у вигляді царини концентрованих ланцюжків у центральній площині ДС.

Виходячи із даного формалізму було визначено, що розмірність D фракталу, який утворюється, в сенсі Гаусдорфа–Безиковича [4], залежить від радіусу нанодроту a та при $a \gg \delta$ складає: $D = \ln[2\pi m]/\ln m$, де $m = a/2\delta$. Зважаючи на цей вираз та критерій утворення ДС із Блоховою точкою в циліндричних ФН [2], можна отримати оцінку зверху розмірності фракталу: $D \leq 1.75$.

Зазначимо, що фрактальна природа будови ДС з Блоховою точкою обґрунтовує інваріантність застосування чисельного підходу “micromagnetic simulation” до вивчення статичних та динамічних властивостей цієї наноструктури в циліндричних ФН різного хімічного складу (див. у [3]).

1. А.Б. Шевченко, М.Ю. Барабаш, А.В. Мініцький, О.І. Ховавко, *Квантові термодинамічні та структурні явища в протяжних феромагнітних наносистемах на основі перехідних металів Fe, Ni, які містять магнітні солітони* (Київ: 2022).
2. A.B. Shevchenko, M.Yu Barabash, *Appl. Nanosci.* **12**, No. 5: 1747 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s13204-022-02397-7>
3. A. Shevchenko, M. Barabash, *Phys. B: Cond. Matt.*(2023).
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415117>
4. С.В. Терехов, *Фракталы и физика подобия* (Донецк: Цифровая типография: 2011).

ФУНКЦІОНАЛЬНІ НАНОСТРУКТУРОВАНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ПОТРІЙНИХ ТА ЧЕТВЕРНИХ СПОЛУК МІДІ

Тітенко А.М.¹, Демченко Л.Д.², Трощенко Ю.М.¹,
Тітенко О.А.^{2(ст.)}, Муравйов В.М.³

¹ Інститут магнетизму, НАН та МОН України,
бульв. Вернадського, 36-б, Київ 03142, Україна

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний ін-
ститут»,
проспект Перемоги, 37 Київ 03056, Україна

³ Державний університет інфраструктури та технологій,
вул. Кирилівська 9, 04071 Київ, Україна

*Тел.: +38 044 424 1020 E-mail: titenko@imag.kiev.ua

Сплави з термopужним мартенситним перетворенням (ТМП) мають широкий спектр використання в якості пристроїв різноманітного функціонального призначення [1]. ТМП використовуються при конструюванні силових та керуючих пристроїв для створення механізмів та окремих вузлів, тощо. В теперішній час спостерігається розширення сфери їх застосування в різних галузях машинобудування, робототехніки, автоматиці, в біології та медицині. Серед сплавів з пам'яттю форми (СПФ) важливе місце займають β -сплави на основі міді: CuAl(Mn,Ni), CuZnAl, CuZnSn. Круг матеріалів, в яких спостерігається ТМП, безперервно розширюється.

Об'єктами досліджень були вибрані багатокомпонентні сполуки на основі Cu–Al–Mn, Cu–Al–Mn–Fe з різним вмістом легуючих компонентів при дещо відмінних режимах отримання та термомеханічної обробки. До досліджуємих сполук застосовувалися наступні широковживані методи досліджень – структурні дослідження: XRD, DSC, SEM; магнітні методики — низькопольової магнітної сприйнятливості, статичної намагніченості (вібраційний магнітометр).

В представленій роботі проведено порівняльний аналіз структурної та магнітної поведінки сплавів Cu–Al–Mn, Cu–Al–Mn(Fe) під впливом термічної і термомагнітної обробки. Відмічені кінетичні особливості при індукуванні ТМП в сплавах, що пов'язано з допущанням різного вмісту заліза. Також проведено порівняльний аналіз характеристик механічної і магнітної поведінки досліджуємих потрійних та четверних сполук Cu–Al–Mn, Cu–Al–Mn–Fe.

Використовуючи високі механічні показники Cu–Al–Mn–Fe сполук в комбінації з високими суперпарамагнітними показниками Cu–Al–Mn сплавів цілком вірогідно застосування таких наноструктурованих композицій в "смарт" пристроях, робота яких базуватиметься одночасно на сукупності можливостей актюатора та сенсора. В цьому контексті нами запропонований новий підхід до використання функціональних сплавів ТПМ (СПФ) зазначених систем в якості адаптивних пристроїв із змінною жорсткістю [2], а також в елементах переміщень.

1. К.Отцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки, Ю. Секигути, Ц. Тадаки, Е. Хомма, С. Миядзаки, *Сплави с эффектом памяти формы* (під редакцією А.М. Глезера), Металлургия, Москва, 1990.

2. Тітенко А. М., Демченко Л. Д., Трощенко Ю. М., Сульженко В. К., Бабанли М.Б Спосіб змінення жорсткості адаптивних конструкцій з використанням матеріалів з пам'яттю форми патенту на корисну модель # 131506 від 25.01.2019, бюл. № 2/2019 (u201802345)

ВПЛИВ НАДШВИДКОГО ГАРТУВАННЯ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ФАЗОВИЙ СКЛАД, СТРУКТУРНИЙ СТАН ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕВТЕКТИЧНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Al–Mg–Si

Д.В. Царюк, Т.В. Прядко, В.М. Шиванюк, Т.П. Владімірова, В.П. Бевз, І.В. Загорулько

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, Україна

*Тел.: +380 93 0275214 E-mail: d826244@gmail.com

На даний час існує велика потреба в литих сплавах алюмінію з високими параметрами міцності, оскільки лиття є економічно ефективним способом виробництва матеріалів, який дозволяє суттєво знизити витрати при отриманні виробів різного призначення. У зв'язку з постійним зростанням вимог до матеріалів технічного призначення (навантаження, температура, окислювальне середовище, зменшення питомої ваги та ін.) актуальною є розробка нових високоміцних ливарних сплавів алюмінію, які призначені для роботи в різних температурних інтервалах і за виготовленням розраховані на традиційну технологію. Традиційні ливарні алюмінієві сплави – це евтектичні сплави (доля евтектики в яких є не меншою за 30 об.%), структура і фазовий склад яких утворюються безпосередньо в процесі кристалізації. Домогтися істотного поліпшення характеристик міцності промислових сплавів алюмінію за рахунок лише невеликих модифікацій складу та режимів термічної обробки вже не вдається. Наступний крок розробки нових матеріалів полягає в ускладненні базових сплавів за рахунок їх легування і забезпечення високого рівня фізико-механічних властивостей сплавів за рахунок поєднання різних механізмів зміцнення (твердо-розчинного і дисперсійного), а також використання надшвидкого гартування таких легованих сплавів для забезпечення ультрадисперсної вихідної структури з підвищеною розчинністю компонентів в алюмінії.

Дане дослідження присвячене розробці нових високоміцних ливарних сплавів, кристалізація яких відбувається на основі евтектичного перетворення $L \rightleftharpoons \alpha\text{-Al} + \text{Mg}_2\text{Si}$ потрійної системи Al–Mg–Si при постійній температурі з формуванням відповідної двофазної структури. Ці сплави поєднують високі механічні властивості з ливарними властивостями сплавів системи Al–Si.

Використані методи ДСК, рентгенівської дифракції та растрової електронної мікроскопії показали, що швидкозагартовані методом PFC стрічки слаболегованого сплаву $\text{Al}_{85,74}\text{Mg}_{9,6}\text{Si}_{2,85}\text{Zn}_{1,6}\text{Mn}_{0,21}$ (AMS-1) при товщині 25–30 мкм характеризуються одностадійним (характерним для евтектики) доволі вузьким інтервалом плавлення (рис.1); як і вихідний сплав мають двофазний склад ($\alpha\text{-Al} + \text{Mg}_2\text{Si}$) та наддрібну (<1 мкм) зеренну структуру евтектичних колоній. Механічні випробування на розтяг стрічок у вихідному стані продемонстрували (рис.2) їх високі механічні властивості ($\sigma_{0,2} = 348$ МПа).

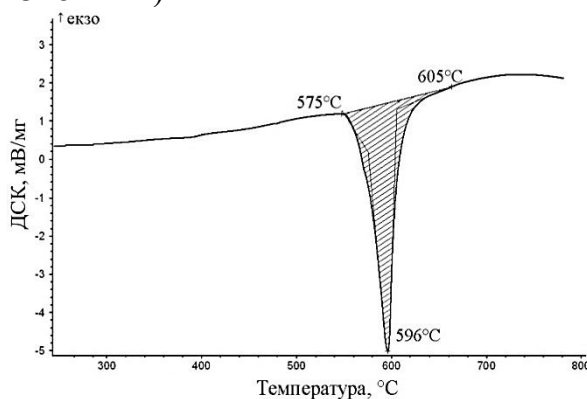


Рис.1.

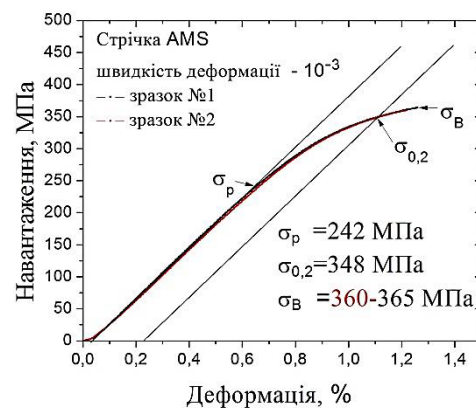


Рис.2.

ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ УДАРНОЇ ОБРОБКИ (УЗУО) НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.

**Турчак Т.В.^{1(*)}, Мордюк Б.М.¹, Гаценко О.С.¹,
Баскова О.І.¹, Кушнарєва О.С.²**

¹*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України*

²*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України*

Тел.: +38 099 750 55 31 E-mail: turchakkyiv@gmail.com

Численні дослідження впливу інтенсивної пластичної деформації на втому алюмінієвих сплавів свідчать про те, що існують кардинально різні фізичні механізми дисипації енергії при реалізації динамічних незрівноважених процесів за рахунок ударно-коливного навантаження. Нами було розглянуто варіант самоорганізації деформованого кристала, та показана можливість гідродинамічної формозміни кристалічного матеріалу без участі дислокацій та інших дефектів кристалічної будови за умов, коли система знаходиться далеко від термодинамічної рівноваги [1].

Самоорганізація приводить до формування структури, яка сприяє деформаційному процесу, тому був проведений пошук експериментально доступних методів деформаційного впливу з метою збільшення втомної довговічності [2]. Виявилося, що для гетерогенних сплавів 2024-T351 і D16CzAT імпульсне підвантаження (ударно-коливне навантаження — УКН) в процесі статичної деформації сприяє збільшенню подальшої втомної довговічності за певної величини деформації в процесі дії імпульсу.

Порівняльний аналіз втомної довговічності, та аналіз ТЕМ-зображень сплавів авіаційного сплаву 2024-T3, що оброблявся УЗУО за двома режимами з різною інтенсивністю обробки та проведені нами раніше дослідження втомної довговічності авіаційних сплавів Д16 і 2024-T3 після попереднього деформаційного оброблення статичною деформацією з імпульсним підвантаженням та УЗУО показали, що для сплаву 2024-T3 втомна довговічність демонструє обернено пропорційну залежність від тривалості УЗУО. Це може результатом того, що вплив УЗУО на поверхню металу викликає пластичну деформацію поверхневого шару та зменшення розміру зерна, а шкідливі залишкові напруження розтягу ефективно усуваються, при цьому в приповерхневому шарі відбувається формування стискаючих напружень, які сприяють підвищенню мікротвердості та втомної міцності.

Також, було з'ясовано, що застосування складної комбінованої обробки, що включала ультразвукове ударне оброблення (УЗУО) після УКН не приводить до суттєвої зміни втомної довговічності сплаву 2024-T351 в той час як одна УЗУО збільшує втомну довговічність стопу. З чого можна зробити висновок, що одночасне застосування комплексних деформаційних впливів сприяє пришвидшенню релаксаційних процесів, які зменшують втомну довговічність.

1. E. Zasimchuk, N. Chausov, T. Turchak, *Results in Materials*, **6**, (2020), 100090 <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100090>

2. O. E. Zasimchuk, M. G. Chausov, B. M. Mordyuk, O. I. Baskova, V. I. Zasimchuk, T. V. Turchak, and O. S. Gatsenko, *Progress in Physics of Metals*, **22**, 4, 619–642 (2021) <http://dx.doi.org/10.15407/ufm.22.04.619>

ПОЛІУРЕТАНОВИЙ SiO_2 -ВМІСНИЙ НАНОКОМПОЗИТ ЯК ПРОЗОРИЙ ДЕМПФЕРНИЙ МАТЕРІАЛ З ЕФЕКТИВНИМ ЗАХИСТОМ ВІД УФ–В-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Воронцова Л.О., Бабкіна Н.В., Антоненко О.І, Косянчук Л.Ф., Бровко О.О.

*Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України,
48, Харківське шосе, Київ, 02161, Україна
Тел.: +38 067 967 2417 E-mail: la.voronzova@gmail.com*

При розробці сучасного складного та різноманітного обладнання виникає потреба в створенні нових полімерних матеріалів, що поєднують в собі декілька різних функціональних властивостей. Такими сучасними матеріалами можуть бути наноккомпозити на основі поліуретанових (ПУ) матриць [1]. Як наповнювач привертає увагу нанорозмірний SiO_2 завдяки нетоксичності, біосумісності, термічній стійкості, високій твердості та економічній доцільності.

Для визначення оптимального поєднання в композиційному матеріалі таких функціональних характеристик, як прозорість, діапазон ефективного УФ-екранування, демпфування та термостабільності, досліджено ПУ матрицю на основі поліетеру та ароматичного діізоціанату за її наповнення 1, 3, 5, 7 мас. ч. нано- SiO_2 , використовуючи спосіб формування ПУ наноккомпозита *in situ*.

Метод спектрофотометрії показав, що ПУ наноккомпозити, як і ПУ матриця, демонструють досить високий (~90 %) коефіцієнт пропускання в діапазоні видимих довжин хвиль. Разом з тим, ПУ матриця характеризується ефективним блокуванням УФ випромінювання до ~290 нм, а для наповнених ПУ спостерігається батохромний зсув (до ~320 нм) спектрів пропускання, тобто блокування УФ–В-випромінювання. Методом динамічного механічного аналізу (ДМА) виявлено, що всі ПУ зразки мають високі значення механічних втрат ($\tan\delta$) в області склування, що підтверджує їхню ефективність як демпферних матеріалів. Поліуретанові SiO_2 -вмісні наноккомпозити мають ефективну демпферну здатність в діапазоні температур від –6 до 48 °С. Показано, що модуль пружності (E') композита за вмісту 7 мас.ч. нано- SiO_2 зростає майже в 1,5 рази порівняно з вихідною ПУ матрицею, що може вказувати на утворення додаткової просторової сітки наночастинками SiO_2 . Методом термогравіметричного аналізу (ТГА) встановлено, що введення нанорозмірного SiO_2 в ПУ матрицю підвищує термостабільність композита, а за його вмісту 5–7 мас. ч. область температур експлуатації такого матеріалу зростає майже на 30 °С.

За результатами досліджень виявлено, що оптимальне поєднання зазначених функціональних характеристик має ПУ композит за вмісту 7 мас. ч. нано- SiO_2 , що вказує, зокрема, на можливість його застосування як міжшарової плівки для багатошарового скла в обладнанні з вібраційним навантаженням.

1. P. Sikdar, T. M. Dip, A. K. Dhar, M. Bhattacharjee, M. S. Hoque, and S. B. Ali, *J. Appl. Polym. Sci.*, **139**, No. 38: e52832 (2022). <https://doi.org/10.1002/app.52832>

НАПОВНЮВАЧІ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ ТА ПОЛІМЕРНИХ НЕСУЧИХ МАТРИЦЬ

**Золотаренко Ол.Д.^{1,2(*)}, Золотаренко Ан.Д.^{1,2}, Щур Д.В.^{1,3}, Габдуллін М.Т.⁴,
Аханова Н.Е.^{4,5}, Уалханова М.⁵, Рудакова О.П.¹, Золотаренко О.Д.¹,
Чимбай М.В.¹, Загорулько І.В.⁶**

¹ Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна

² Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижановського 3, Київ 03142, Україна

³ Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми 4000, Україна

⁴ Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁵ Національна нанотехнологічна лабораторія, КазНУ ім. Аль-Фарабі
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁶ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського 36, Київ 03142, Україна

*Тел.: +38 974452983 E-mail: o.d.zolotarenko@gmail.com

Описано основні досягнення 20 століття в галузі створення нанокомпозитів, де метали та полімери є несучою матрицею для нанонаповнювачів. Властивості та застосування матеріалів із сучасними мікро- та нанонаповнювачами мають широкий спектр застосування, який частково описано в запропонованій роботі. Такі нанокомпозити стимулюватимуть подальші дослідження в галузі нанотехнологій, а саме розробку синтезу нових наноматеріалів та створення на їх основі нових нанокомпозитів.

У дослідницькій роботі отримано наступні результати: 1. Визначено основні види нанонаповнювачів; 2. Наведено основні переваги створення сучасних композитів; 3. Наведено характеристики залежності параметрів нанокомпозитів; 4. Встановлено, що наповнювачі дозволяють контролювати структурний стан розплаву та сприяють формуванню додаткових центрів кристалізації; 5. Встановлено, що характеристики поверхні наповнювача суттєво впливають на механічні властивості нанокомпозитів; 6. Встановлено, що вуглецеві наповнювачі можуть бути найсильнішим графітізатором, що важливо для чорної металургії; 7. Встановлено, що механічні та фізичні властивості нанокомпозитів залежать від типу нанонаповнювача, ступеня дисперсності та його кількісного вмісту; 8. Встановлено, що наноструктурні наповнювачі є перспективними для використання в композитах.

З огляду на це можна зробити висновок, що для покращення механічних властивостей композитів необхідно: • вибрати оптимальне співвідношення фаз; • підібрати дисперсність для нано- (1–100нм) та мікронаповнювача (100–500нм); • рівномірний розподіл наповнювача в матриці; • виключити або мінімізувати агломерацію наповнювача при створенні композиту; та інш.

ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

**Золотаренко Ол.Д.^{1,2(*)}, Золотаренко Ан.Д.^{1,2}, Щур Д.В.^{1,3}, Габдуллін М.Т.⁴,
Аханова Н.Е.^{4,5}, Уалханова М.⁵, Рудакова О.П.¹, Золотаренко О.Д.¹,
Чимбай М.В.¹, Загорулько І.В.⁶**

¹ Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна

² Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижановського 3, Київ 03142, Україна

³ Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми 4000, Україна

⁴ Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁵ Національна нанотехнологічна лабораторія, КазНУ ім. Аль-Фарабі
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁶ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського 36, Київ 03142, Україна

*Тел.: +38 974452983 E-mail: o.d.zolotarenko@gmail.com

В роботі запропоноване пояснення фізико-хімічних процесів, що відбуваються при електродуговому плазмохімічному синтезі вуглецевих наноматеріалів (ВНМ). Наведена та розглянута схема дії сил на заряджені частинки та схема дії сил на рух іонів у електричній дузі при наявності магнітного поля плазмохімічного синтезу вуглецевих наноматеріалів.

Висновки науково-дослідної роботи: • На основі літературних даних та власних експериментальних досліджень пароутворення графітової дуги запропоновано модель процесів формування вуглецевих продуктів синтезу.

- Модель базується на особливостях поведінки частинок в електромагнітному полі при надзвичайно високих градієнтах тиску та температури.

- Одним із головних висновків можна вважати той факт, що мікро- та макрокількості вуглецевих наноматеріалів утворюються на стадії виникнення зародків, тобто наноструктурний продукт складається з ядер різної структури.

- Обґрунтовано послідовність перетворень, яких зазнають вихідні вуглецевмісні реагенти при формуванні вуглецевих наноструктурних модифікацій.

- Розроблено класифікацію вуглецевих структур і процесів їх утворення.

- Запропоновано послідовність рівнів організації матеріалу, яка відображає механізм утворення сферичних молекул вуглецю C₆₀ з парів вуглецю при зміні температури від 12000 К до кімнатної.

- Вуглецеві наноматеріали, в тому числі фуллереноподібні, утворюються в паровій фазі в результаті взаємодії між атомами вуглецю.

Запропонована схема структурних перетворень вуглецю на різних рівнях організації матерії, типів процесів, що відбуваються на різних вимірних рівнях.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА МІЦНІСТЬ КАРБІН-ГРАФЕНОВИХ НАНОЕЛЕМЕНТІВ ЗА УМОВИ ПОСТІЙНОЇ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ

Котречко С.О.^{1,2,3}, Овсянніков О.В.^{1(*)}, Коливошко Є.В.¹

¹Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
03142, Київ, бульвар ак. Вернадського 36, Україна.

²Київський Національний Університет ім. Тараса Шевченка,
01601, Київ, вул. Володимирська 60, Україна.

³Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
03056, Київ, пр. Перемоги, 37, Україна

*Тел.: +380 63 247 0595 E-mail: ovsjann@imp.kiev.ua

Забезпечення надійного функціонування елементів стрейнтроники потребує встановлення закономірностей зміни міцності цих елементів в широкому інтервалі температур та розробку фізичних уявлень щодо механізмів, які контролюють процес розриву атомних зв'язків в умовах термо-силового навантаження.

На сьогодні карбін-графенові наноеlementи (КГН) мають широкі перспективи використання в якості елементів стрейнтроники, оскільки їх деформація дозволяє суттєво змінювати ширину забороненої зони. Це, зокрема, створює перспективи для їх використання нанолазерах та інших пристроях оптоелектроніки із регульованою довжиною хвилі.

В доповіді наведені результати молекулярно-динамічного моделювання деформації розтягом і руйнування карбін-графенового елемента, який складається із двох графенових листів, з'єднаних десятиатомним ланцюжком із атомів вуглецю. Моделювання проводили для інтервалу температур 0К–2100К.

За результатами МД-моделювання встановлено немонотонний характер зміни температурної чутливості КГН. Зміна “поведінки” температурної залежності спостерігається при $T \sim 1300\text{--}1400\text{ K}$. Аналіз гістограм розподілу критичної величини сили F_c за якої відбувається руйнування, показав, що починаючи з $T=1350\text{ K}$ на гістограмі в області малих значень зусиль з'являється другий максимум, висота якого зростає із зростанням температури. У відповідності до розробленої раніше моделі термофлуктуаційного руйнування, це обумовлено зміною мікромеханізму розриву контактного зв'язку, а саме переходом від низькоенергетичного до високоенергетичного мікромеханізму. Цей перехід супроводжується різким зростанням величини критичної флуктуації довжини контактного зв'язку необхідної для його розриву.

Одержані результати дозволили в рамках єдиного підходу описати атомістику руйнування КГН в широкому інтервалі температур, як в умовах постійного навантаження, так і при постійній швидкості деформації [1, 2].

1. S. Kotrechko, A. Timoshevskii, E. Kolyvoshko E, Yu. Matviychuk, N. Stetsenko, *Nanoscale Res Lett* 12:327 (2017). <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2099-4>

2. S. Kotrechko, E. Kolyvoshko, N. Stetsenko, A. Timoshevskii, *Journal Applied Nanoscience*, Published online 11 August (2023). <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02925-z>.

ВПЛИВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА РОБОТУ ВИХОДУ ВОЛЬФРАМОВОГО КАТОДУ ТЕРМОЕМІСІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕНЕРГІЇ

**Смольнік С.В.^{1*}, Макеєва І.М.¹, Колесник В.М.¹,
Васильєв М.О.¹, Шевченко М.Я.¹, Лень Є.Г.^{1,2}**

¹*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна*

²*Київський Академічний Університет НАН та МОН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна*

^{*}*Тел.: +38 093 763 2535 E-mail: sviatsmol@gmail.com*

На сьогодні єдиним практично доцільним способом прямого перетворення на електроенергію тепла високотемпературного циклу згорання ядерного (у майбутньому і термоядерного) або органічного палива є вбудовування безпосередньо в оболонки печей та гарячих зон реакторів термоемісійних перетворювачів (ТЕП). Перспективним матеріалом для катодів високотемпературних ТЕП є монокристали вольфраму завдяки їх малій швидкості сублімації у поєднанні з високими емісійними властивостями.

У багатьох випадках, зокрема у випадках компактних і мобільних ядерних джерел енергії або генеруючих електрику захисних оболонок майбутніх термоядерних реакторів, електроди ТЕП мають бути не плоскими, а доволі складної геометрії, коли емітер і колектор є, наприклад, коаксіальними циліндрами або торами з невеликим міжелектродним проміжком. Відомо, що адсорбційну здатність і високотемпературну міцність циліндричних електродів можна істотно підвищити, якщо замість циліндрів, що виточуються з монокристалічного прутка, використовувати циліндри, які отримані пластичним вигином певним чином кристалографічно орієнтованих пластин і подальшим електронно-променевим зварюванням стику при їх накручуванні на поверхню заданої геометрії.

У зв'язку з вищесказаним було проведено порівняльне дослідження методом плазмонної спектроскопії [1] зміни електронних характеристик, в тому числі роботи виходу, деформованого за рахунок пластичного вигину і недеформованого монокристалів W(110), що виготовлені з одного і того ж монокристалічного прутка та піддавались за однакових умов термічній, термохімічній та йонній обробкам. Встановлено, що макроскопічний вигин монокристалу W(110) призводить до зменшення роботи виходу з його опуклої поверхні, яка зазнає деформації розтягування. Максимальна різниця в роботах виходу недеформованого і деформованого монокристалів спостерігається після всіх послідовно реалізованих термічних, термохімічних та йонної обробок і складає 0,2 еВ, що важливо приймати до уваги при створенні термоемісійних перетворювачів енергії з непласкими електродами.

ЗАХИСНІ ТА ПОГЛИНАЮЧІ ПОКРИТТЯ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНИХ БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИТІВ

В.Н.Коржик¹, П.Д.Стухляк², О.М. Берднікова³, О.В.Тотосько²,
Д.П.Стухляк², К.М.Лепіліна¹

¹Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Є.О. Патона в провінції Чжецзян,

вул. Фенар, 233, район Сяошань, м Ханчжоу, провінція Чжецзян, 311225, КНР

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
вул. Руська, 56, Тернопіль, 24600, Україна

³Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150, Україна

*Тел.: +38 0673347890 E-mail: *stukhlyakpetro@gmail.com

Розроблені багатошарові покриття для захисту від електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на основі епоксидних композитів, що містять різні функціональні шари. Як правило використання матеріалів для вузького діапазону частот не ефективне. Актуальним є розширення діапазону для захисту від електромагнітних хвиль за рахунок внутрішньому розсіювання та поглинання їх магнітної та електричної складових при мінімальному відбитті шляхом створення епоксидного покриття з різними за складом та мареріалів по шарах. При створенні композитів використано принцип зростання провідності шарів по мірі наближення до тильної сторони захисного покриття при різних магнітних та діелектричних властивостях матеріалів шарів, фазово-структурних відмінностей на межі поділу фаз як в самому матеріалі, так і на межі поділу фаз шарів. В дослідженнях використано епоксидну діанову смолу марки ЕД-20. Матеріали різних шарів містять компоненти та наповнювачі нанорозмірів та близьких до нанорозмірів часток високої очистки для дослідження взаємодії з ЕМВ. Чергуванням шарів, що поглинають, розсіюють, або відбивають ЕМВ досягали розширення діапазону частот шляхом використання багатошарового покриття. Виконання першого шару з діелектричного матеріалу близьким за хвильовим опором до значення хвильового опору зовнішнього середовища суттєво зменшить відбивання ЕМВ покриттям в цілому. Відбивання, поглинання та розсіювання електромагнітної енергії реалізується на межі поділу шарів з різним коефіцієнтом відбивання. Це значно розширює діапазон частот при екрануванні ЕМВ. Взаємодія електромагнітної енергії відбувається також і на межі з дисперсними частками наповнювачів, що мають різну електромагнітну природу та електричну провідність. Розроблене покриття зменшує ЕМВ у 4–12 раз в діапазоні частот 50 Гц...15 МГц при його товщині до 1 мм. При збільшенні частоти ЕМВ слід очікувати підвищення екрануючої здатності матеріалу покриттів.

КОЛЕКТИВНІ ЗБУДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОГО КОНДЕНСАТУ У НАДПРОВІДНОМУ СТАНІ НАНОКОМПОЗИТУ $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$

Болясова О.О., Дмитренко В.Ю., Таренков В.Ю. ^(*), Криворучко В.М.

*Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України,
пр. Науки, 46, Київ, Україна*

**E-mail: tarenko304@gmail.com*

У багатозонному надпровіднику існують колективні збудження фази надпровідних конденсатів, так звані моди Леггетта [1]. У нано-гетеро-структурах надпровідник–феромагнітний метал в наслідок ефекту близькості формується багатокомпонентний надпровідний стан — суперпозиція спін-синглетного і спін-триплетного надпровідних конденсатів. Реєстрація спін-залежних мод Леггетта є прямим доказом існування багатокомпонентного надпровідного стану у таких гетероструктурах [2].

У роботі представлено результати експериментальних досліджень надпровідного стану наноконкомпозиту надпровідник MgB_2 та половинний феромагнітний метал $(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$. Об'ємна концентрація манганіту в наноконкомпозиті складала 25%. Досліджено транспортні характеристики контактів з андріївським характером проходження струму утворених наноконкомпозитом (i) з немагнітним металом Ag та (ii) з половинним феромагнітним металом $(\text{La,Ca})\text{MnO}_3$. Диференціальні характеристики провідності контактів $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ з Ag та з $(\text{La,Ca})\text{MnO}_3$ демонстрували *різні* періодичні особливості в області щільних енергій надпровідного стану композиту. Ці особливості провідності ми пов'язуємо з непружним багаторазовим андріївським відбиттям з випромінюванням/поглинанням спін-залежних мод Леггетта. Спостереження спін-залежних збуджень Леггетта надає додаткові уявлення щодо особливостей багатозонного надпровідного стану наноконкомпозиту $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ зі сумішшю спін-синглетного та спін-триплетного надпровідного конденсатів.

Робота частково підтримана Європейською федерацією академій наук і гуманітарних наук у рамках «Європейського фонду для переміщених вчених» (Grant No. EFDS-FL2-05).

1. A. J. Leggett, *Progr. Theor. Phys.* **36**, No 5: 901 (1966). DOI: <https://doi.org/10.1143/PTP.36.901>.

2. F. S. Bergeret, A. F. Volkov, and K. B. Efetov, *Rev. Mod. Phys.* **77**, No 4: 1321 (2005). DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.1321>.

СТВОРЕННЯ КЕРАМІЧНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК (ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ СJP)

**Золотаренко Ол.Д.^{1,2(*)}, Золотаренко Ан.Д.^{1,2}, Щур Д.В.^{1,3}, Габдуллін М.Т.⁴,
Аханова Н.Е.^{4,5}, Уалханова М.⁵, Рудакова О.П.¹, Золотаренко О.Д.¹,
Чимбай М.В.¹, Загорулько І.В.⁶**

¹ Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17, Київ 03164, Україна

² Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України,
вул. Кржижановського 3, Київ 03142, Україна

³ Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми 4000, Україна

⁴ Казахсько-британський технічний університет (КБТУ)
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁵ Національна нанотехнологічна лабораторія, КазНУ ім. Аль-Фарабі
пр. аль-Фарабі, 71, Алмати 050040, Казахстан

⁶ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського 36, Київ 03142, Україна

*Тел.: +38 974452983 E-mail: o.d.zolotarenko@gmail.com

У даній роботі описано експеримент, в рамках якого методом піролізу вуглеводнів були отримані спіралеподібні багатогранні вуглецеві нанотрубки (СБВНТ) діаметром 30–60 нм. Також було розглянуто синтез прямих багатогранних вуглецевих нанотрубок (ПБВНТ), після чого СБВНТ та ПБВНТ використовувалися для 3D-друку за технологією СJP.

Основні результати в галузі 3D-друку: • Створено схему технологічних етапів виготовлення 3D-композитного виробу (ВНС – кераміка); • Розроблено технологію синтезу багатостінних вуглецевих нанотрубок (БВНТ) різної конфігурації (прямої та спіралеподібної) для 3D-друку технології СJP; • Встановлено умови для друку механічною сумішшю БВНТ–Al₂O₃ для 3D-принтера за технологією СJP; • Розглянуто процес створення механічних сумішей (БВНТ–оксид металу) для 3D-принтерів технології СJP; • Встановлено, що основним правилом створення високоякісного 3D-виробу в технології СJP з композиту, армованого БВНТ, є створення високоякісної однорідної механічної суміші, виготовленої шляхом ретельного змішування подрібнених конгломератів БВНТ і обробленого оксиду металу — несуча керамічна матриця, де БВНТ рівномірно розподілені в суміші. У механічній суміші розмір оксиду алюмінію становить ≥ 100 нм ($\geq 0,1$ мкм), а БВНТ мають діаметр ≤ 60 нм і довжину ≥ 925 нм; • Встановлено прямо пропорційну залежність збільшення міцності на вигин від вмісту БВНТ у 3D-композитному виробі (БВНТ – оксид металу) після його 3D-друку та спікання; • Проведено порівняльний аналіз міцності 3D-виробів із композитів на основі прямих багатостінних вуглецевих нанотрубок (ПБВНТ) та спіральних багатостінних вуглецевих нанотрубок (СБВНТ); • Встановлено, що композити на основі прямих БВНТ мають більшу міцність, ніж композити на основі СБВНТ.

**PROXIMITY-COUPLED SPIN SINGLET-TRIPLET FREQUENCY
EVEN-ODD SUPERCONDUCTING CONDENSATES
IN $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ NANOCOMPOSITE**

Krivoruchko V.N.^(*), Tarenkov V.Yu.

*O.O. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, NAS of Ukraine,
Av. Nauki 46 Kyiv, Ukraine*

**E-mail: krivoruc@gmail.com*

We present the results of experimental investigations by the point contact (PC) transport measurements the proximity induced multiband superconducting state of nanocomposite $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$: two-band superconductor (SC) MgB_2 and half-metallic ferromagnet (hmF) $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$. Superconducting state in the nanocomposite is associated with the superposition of singlet/triplet spin even/odd frequency superconducting condensates. Suggesting that the interband coupling should be connectable with the spin conservation law, two types of the PCs have been used: the nanocomposite-hmF ($\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ and $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$) PCs and the nanocomposite-nonmagnetic metal (Ag) PCs. Spin-dependent subharmonic structures have been observed in the PCs' differential conductance spectra. The oscillation period of the conductance peaks for the nonmagnetic metal PC was the same as earlier observed in MgB_2 by the Raman spectroscopy and by the PC transport measurements and have been attributed its origin to the Leggett-like excitations. The oscillation period we detected for the nanocomposite-hmF PCs was two times smaller. As a most probable origin, we attribute this type of the conductance oscillations to inelastic emission/absorption of the relative phase excitations between *triplet* condensates with $|S_z| = 1$ spin component. Thus, the binding energy between proximity induced triplet condensates is weaker than the coupling between σ - and π -‘parental’ condensates in MgB_2 .

Theory predicts, in the case of a disordered SC/hmF junction, spin-flip scattering at the SC-hmF interface induces a superconducting state that is characterized by a mixed-symmetry (i) even-frequency even-momentum odd-spin (singlet), (ii) even-frequency odd-momentum even-spin (triplet), and (iii) odd-frequency, $\Delta_{\text{od}}(\omega_n) = -\Delta_{\text{od}}(-\omega_n)$, even-momentum even-spin (triplet) pairing. The data obtained on the nanocomposite-hmF PCs indicate the dynamical coupling signature of even-frequency and gapless odd-frequency triplet pair condensates. The hmF PCs transport characteristics confirm high order coupling between the *even* and *odd* frequency Cooper pairs in MgB_2/hmF nanocomposite, and give convincing arguments of *odd frequency* pairing states in the $\text{MgB}_2/(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ nanocomposites.

This work is partly supported by the European Federation of Academies of Sciences and Humanities within the framework of the “European Fund for Displaced Scientists” (ALLEA project EFDS-FL2-05).

ЗГАСАЮЧІ ДИПОЛЬНО-ОБМІННІ СПІНОВІ ХВИЛІ У НАНОТРУБЦІ З ЛЕГКОПЛОЩИННОГО ФЕРОМАГНЕТИКУ

Куліш В.В.^{1(*)}

¹ *Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
03056, м. Київ-56, Берестейський проспект 37, Україна
Тел.: +38 044 204 8248 E-mail: kulish_volv@ukr.net

Наносистеми з магнітовпорядкованих матеріалів є перспективними функціональними матеріалами для спин-хвильової електроніки. Спінові хвилі у таких матеріалах є перспективними для застосувань, зокрема, у нових приладах передачі та обробки інформації [1,2]. При дослідженні спінових хвиль в наносистемах зазвичай розглядаються ізотропні легкоосьові феромагнетики. Одноосьові легкоплощинні феромагнетики мають ряд унікальних магнітних властивостей; проте, спінові хвилі в наносистемах з таких феромагнетиків залишаються малодослідженими.

В презентації досліджуються дипольно-обмінні спінові хвилі у коловій нанотрубці з легкоплощинного феромагнетику. Запропонована модель враховує магнітну диполь-дипольну взаємодію, обмінну взаємодію, ефекти анізотропії, ефекти згасання та загальні граничні умови. З рівняння Ландау–Ліфшиця та одного з рівнянь Максвелла отримано рівняння для магнітного потенціалу зазначених хвиль; рівняння розв'язано та отримано закон дисперсії для випадку поздовжньо-радіальних хвиль. Після накладання граничних умов зазначений закон дисперсії доповнено співвідношенням між компонентами хвильового вектору. Показано, що для тонкої нанотрубки це співвідношення вироджується в квазіодновимірний спектр значень поперечних хвильових чисел.

Для отриманих спектральних характеристик представлено графічне відображення та зроблено числові оцінки. Результуюча частота спінової хвилі для типових значень параметрів нанотрубок відповідає типовим значенням, які спостерігаються в експериментах, що підтверджує отримані результати. Проведено порівняльний аналіз дисперсійного співвідношення, отриманого в презентації, з аналогічним дисперсійним співвідношенням для нанотрубки з легкоосьового феромагнетику. Показано, що гілки залежностей (які відповідають різним поперечним модам) як дійсної, так і уявної частин частоти спінової хвилі від поздовжньої компоненти хвильового вектора близькі до параболічних і суттєво віддалені одна від одної. Отримані результати можуть бути застосовані, зокрема, для створення новітніх хвилеводів для спінових хвиль.

1. B. Flebus, S. M. Rezende, D. Grundler and A. Barman, *J. Appl. Phys.*, **133**: 160401(2023).
<https://doi.org/10.1063/5.0153424>

2. A. V. Chumak, P. Kabos, M. Wu, C. Abert, C. Adelmann et al., *IEEE T. Magn.* **58**: 0800172 (2022).
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3149664>

ГУМА ДЛЯ МАСИВНИХ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ЗА ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Булат А.Ф.¹, Лисиця М.І.¹, Калганков Є.В.², Агальцов Г.М.¹

¹ Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, 49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2а, Україна

² Дніпровський державний аграрно-економічний університет, 49600, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25, Україна

Видобуток уранових руд в Україні здійснюється підземним способом. Випуск та доставка руди з блоків – за допомогою важких гірничих вібраційних живильників, пружна підвіска яких складається з масивних гумометалевих елементів, які працюють в екстремальних умовах. До екстремальних умов відносяться значні тривалі стаціонарні циклічні навантаження та вплив γ -випромінювання.

Відомо [1], що вплив іонізуючого випромінювання призводить до зміни фізико-механічних характеристик гуми. Дослідження впливу іонізуючого випромінювання на механічну поведінку гумових матеріалів наведено у [2]. Механічна поведінка гуми описується теорією в'язкопружності і інтегральними операторами Вольтера. Експериментально встановлено, що іонізуюче випромінювання суттєво впливає на динамічний модуль зсуву, коефіцієнт дисипації, довговічність і механізм руйнування гумових елементів при сумісній дії радіації та циклічного навантаження. Тому актуальним є створення радіаційно-стійких гум, що мають підвищену стабільність фізико-механічних параметрів у процесі експлуатації вібраційних машин.

У Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України розроблена та випробувана нова гума для роботи пружних ланок вібраційних машин, які працюють в екстремальних умовах експлуатації (сумісній дії радіаційного впливу та циклічного навантаження) [3].

Довготривалі випробування довели, що зміна амплітуди коливань віброконвеєра після 25000 годин роботи складає 10–12 % (див. рисунок) при амплітуді коливань 10,5–12,5 мм (відносний зсув до 0,4) та частоті коливань 10–12 Гц.

Прикладная механика упругонаследственных сред / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – Т. 1, Механика деформирования и разрушения эластомеров. – Киев: Наукова думка, 2011. – 568 с.

A.F. Bulat, V.I. Dirda, V.G. Karnaukhov, G.M. Agal'tsov, Effect of Ionizing Radiation on the Mechanical Behavior of Rubber Materials, *Int. Appl. Mech.*, **57**, 379–385 (2021). DOI: 10.1007/s10778-021-01089-z

Патент 144510 України. Гумова суміш для виготовлення радіаційно-стійких гум, що працюють в екстремальних умовах / А.Ф. Булат, В.І. Дирда, Є.В. Калганков, М.І. Лисиця, Г.М. Агальцов (Україна), Заявл. 02.03.2020; Пріоритет 13.10.2020.

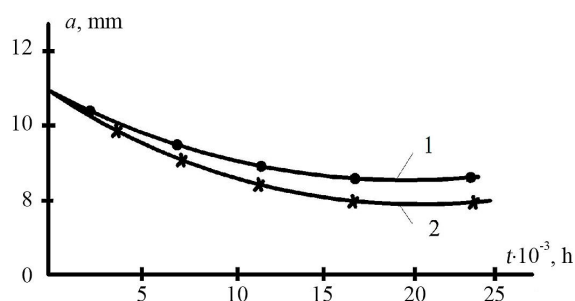


Рис. Залежність амплітуди коливань віброконвеєра від часу експлуатації (1 — без опромінення; 2 — доза жорсткого γ -випромінювання 20 Мрад)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДПАЛУ НА ДЕФЕКТНУ СТРУКТУРУ ЧИСТОГО ЗАЛІЗА, ЯКЕ ОПРОМІНЕНО НЕЙТРОНАМИ

О.Р.Гохман, Н.Г.Канівець, Т.С.Совкова

*Південноукраїнський національний педагогічний університет
імені К.Д.Ушинського*

65020 Одеса, Україна, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 26.

Тел.: +38 0955833753 E-mail: natasha.kanivets0902@gmail.com

Можливість продовження проектного терміну експлуатації атомних реакторів водо-водяного типу (ВВЕР) пов'язана з вирішенням задач обґрунтування надійності експлуатація корпусів реакторів при дозах опромінення, що перевищують проектні, та, у разі необхідності, відновлення їх властивостей. Відомі результати багаторічних досліджень багатьох авторів щодо способу відновлення механічних властивостей корпусів реакторів ВВЕР-440 під тиском шляхом випалу їх при температурі 450 ... 460°C. Однак, для реакторів ВВЕР-1000, які становлять основу атомної енергетики України, можливість відновлення опроміненої корпусної сталі на сьогоднішній день не вивчена у повному обсязі, зокрема, не розроблені температурно-часові режими відпалу. Так, отримано низку експериментальних даних з досліджень зразків-свідків. Проте, бракує комп'ютерного моделювання відпалу опромінених сталей щодо визначення оптимального поєднання температури і тривалості процедури відпалу. Методом кластерної динаміки вивчається вплив відпалу на еволюцію дефектних кластерів, що утворились у комерційно чистому залізі ($C < 30 \text{ ppm}$), яке було опромінено у бельгійському реакторі BR2 при температурі 300°C нейтронами зі флаксом $1,39 \times 10^{-7} \text{ дпа/с}$ ($9 \times 10^{17} \text{ н/м}^2/\text{с}$, $E > 1 \text{ MeV}$) до дози 0,10 дпа ($6,5 \times 10^{19} \text{ н/м}^2$, $E > 1 \text{ MeV}$). Майстер-рівняння кластерної динаміки для відпалу записується як система звичайних диференціальних рівнянь відносно чисельної щільності ізолюованих вакансій (V) та міжатомних вузлів (SIA) та їх кластерів (VC) та (SIAC), у наближенні, що мобільними є лише V та SIA.

Істотний вплив відпалу на загальну чисельну щільність як SIAC, N_{SIAC} , так і VC, N_{VC} , спостерігався при температурах вище 400°C і часах більше 2 годин. Виявлено немонотонну залежність зменшення N_{SIAC} від тривалості відпалу. Для максимальної температури відпалу 500°C було виявлено, що найбільше зниження N_{SIAC} спостерігається при часі відпалу 18 годин.

Відпал мало впливає на середню кількість SIA і VC у кластерах, n_{SIA} і n_{VC} , для температур нижче 400°C. При підвищенні температури відпалу вище 450°C n_{SIA} і n_{VC} різко зростають. Одночасне зменшення загальної щільності та збільшення середньої кількості мономерів у кластерах свідчить про те, що внаслідок відпалу при температурах вище 450°C та часі відпалу більше 2 годин SIAC і VC досягають стадії Оствальда. Метод відпалу виявився найефективнішим для зменшення індукованого опроміненням збільшення межі текучості при температурі відпалу 500°C і часі відпалу протягом не 24, як очікувалося, а 18 годин.

НОВІТНІ ПОРОШКОВІ МАГНІТОДІЕЛЕКТРИКИ НА ОСНОВІ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ СПЛАВІВ ІЗ ЦЕМЕНТНОЮ ЗВ'ЯЗКОЮ

**Байталюк Б.С.^{1(*)}, Носенко А.В.², Євлаш І.К.²,
Кирильчук В.В.², Семирга О.М.²**

¹ *Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ,
вул. Омеляна Пріцака (Кржижановського), 3, Україна*

**E-mail: baytalyuk@ukr.net*

² *Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ,
м. Київ, бульв. Вернадського, 36, Україна*

Методами порошкової металургії (без операції пресування) були отримані тороїдальні осердя на основі порошків металевого нанокристалічного сплаву ММ-11Н складу $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{16}\text{B}_7\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ із зв'язкою на основі портланд цементу М-500. Такі осердя володіють достатньою міцністю, температуростійкістю до 300°C , а також відмінними магнітними властивостями. Ці композити можуть замінити осердя для силової електроніки на основі порошків карбонільного заліза, альсиферу чи електротехнічної висококремністої сталі, оскільки мають нижчі втрати та стабільніші частотні характеристики. Також такі композити можуть знаходити застосування в приладах із підвищеними температурами експлуатації, наприклад в концентраторах магнітного потоку індукційних нагрівачів. А оскільки такі ММК (магнітом'які композити) не потребують операції пресування, то це значно спрощує процес їх виробництва а також розширює асортимент форм та розмірів таких композитів.

СЕКЦІЯ 6. НОВІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ Й АТЕСТАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИКИ

ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ПРИДАТНОСТІ ДО ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСАДНИХ МАТЕРІАЛІВ З НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ У АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ 3D-НАПЛАВЛЕННЯ

Яровицин О.В.^{(*)1}, Черв'яков М.О.¹, Волосатов І.Р.¹, Хрущов Г.Д.¹,
Пестов В.А.¹, Наконечний О.О.¹, Черв'якова Л.В.¹, Воронін С.О.¹,
Чигилейчик С.Л.², Кондратюк С.Є.³, Желізняк Н.П.³, Каменєва С.А.⁴,
Зубкова В.Т.⁴

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, вул. К. Малевича 11, Україна

²АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, просп. Моторобудівників 15, Україна

³ФТІМС НАН України, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського 34/1, Україна

⁴ДП «УкрНДІспецсталь», м. Запоріжжя, вул. Патріотична 74-а, Україна

*Тел.: +38 0442052156. E-mail: yarovytsyn@ukr.net

Проблема прогнозування технологічної міцності, механічних характеристик та формування критеріїв придатності сплавів на нікелевій основі для адитивних технологій 3D-наплавлення на сьогоднішній день залишається недостатньо вивченою. Зокрема тому, що механічні характеристики у наплавленому металі можуть суттєво відрізнятися від довідкових даних відповідних нікелевих сплавів, отриманих за традиційними технологіями. Запропоновано новий підхід, який дозволяє на базі аналізу результатів механічних випробувань багатошарового наплавленого металу на статичний та ударний загин при 20°C, статичний розтяг при 20, 1000 та 1100°C, зразки для яких вирізані електроерозійною різкою зі зварної заготовки «вертикальна стінка» висотою 30–35 мм, довжиною 65–85 мм та товщиною 4–7 мм і випробувані у структурному стані «as built», оцінювати придатність сплавів на нікелевій основі до застосування у технологіях 3D-наплавлення, та уточнювати вплив домішок кисню та азоту на ударну вязкість та високотемпературну пластичність такого наплавленого металу.

Запропоновану методику верифіковано на 14 видах присадного матеріалу у вигляді дроту та порошку із різним вмістом кисню та азоту. Заготовки багатошарового наплавленого металу отримувались способами мікроплазмового порошкового та аргонодугового (TIG) наплавлення. За критеріями максимального кута загину до утворення тріщини β , показника ударної в'язкості KCU, величини критичної руйнівної деформації ϵ наплавлений метал поділено на 3 групи. Перша група – жаростійкі (Hastelloy C22, Inconel 625, ЭП648) та деформовані (Inconel 718) нікелеві сплави, які за умови обмеження вмісту кисню та азоту ($C_{\text{NM[O]}}$, $C_{\text{CB[N]}} \leq 0,020$ – $0,025$ ваг. %) мають високі показники деформаційної здатності при 1000–1100°C ($\epsilon = 6,8$ – $60,8\%$). Друга група – жароміцні сплави Inconel 738LC, ЖС6К, ЖС6У, ЖС32, наплавлений метал яких має суттєво вищі ($\sigma_{\text{В } 1000^\circ\text{C}} = 345$ – $386,5$ МПа, $\sigma_{\text{В } 1100^\circ\text{C}} = 183,5$ – 256 МПа) показники міцності при високих температурах, проте характеризується значно меншою деформаційною здатністю ($\epsilon \leq 0,7$ % при 1000–1100°C). До третьої групи віднесено жароміцні сплави Inconel 939 та Rene 80 через їх дещо вищу у порівнянні із другою групою деформаційну здатність ($\epsilon \leq 1,2$ – 2 % при 1000–1100°C).

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE REGIMES OF ULTRASONIC IMPACT TREATMENT ON ELASTIC, TEXTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu–37Zn BRASS ALLOY PLATES

O.I. Zaporozhets¹, B.M. Mordyuk¹, V.A. Mykhailovskyi¹, A.A. Halkina^{1*},
M.O. Dordienko¹, A.P. Burmak², E. Langi³, L.G. Zhao³.

¹*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky blvd., UA-03142, Kyiv, Ukraine;*

²*Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Peremohy ave., 03056, Kyiv, Ukraine*

³*Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering,
Loughborough University, Epinal Way, Loughborough, LE11 3TU, UK*

*Тел.: +380663695399; E-mail: galka994@ukr.net

As a continuation of a previous study [1] in the present one the changes in elastic and mechanical properties, texture evolution of Cu–37Zn thin plates after room (air-UIT) and cryogenic (cryo-UIT) temperature ultrasonic impact treatment (UIT) were examined. The investigation of plates aims to balance the contributions of both the static and dynamic UIT components to the resulting deformation of the entire material volume. The quantitative data of Debay temperature (T_D), elastic (E), shear (G), and bulk (B) moduli, Poisson ratio (η), hardness HV , Milman's plasticity parameter δ_H , yield/ultimate strength ($\sigma_{0.2}/\sigma_s$) of the processed samples were obtained using precise bulk US velocities (v_{ij}) measurements conducted with pulse-echo method on an automated apparatus, along with the mass densities (ρ) of the samples. XRD, EBSD, TEM, SAED analyses were used to characterize crystallographic texture and microstructure evolutions. It is shown that 20s of air-UIT result in the increase in T_D , E , G , HV , $\sigma_{0.2}$, σ_s and a decrease in η , B , δ_H , the longer duration causes higher effects. The 20s of cryo-UIT lead to less changes remaining similar trend. Slightly lower hardening after cryo-UIT is accompanied by higher residual plasticity than after air-UIT possibly attributed to the temperature dependent stacking fault energy and contributions from twinning-induced and twinning-related plasticity to the cryo-deformation of Cu–Zn. It is established that cryo-UIT for 20s forms the copper-type texture while after 20s air-UIT the brass-type one is formed. The latter usually forms at higher levels of deformation, so air-UIT leads to higher deformation degrees than cryo-UIT. The lower intensity of diffraction peaks $\Delta I_{[111]}$ after cryo-UIT brought about higher texture dispersion owing to the strain-induced formation of higher quantity of crystallites of much lower size which is confirmed by XRD peaks broadening analysis, and EBSD/TEM observations.

1. Запорожець О.І., Мордюк Б.Н., Михайловський В.А., Галкіна А.А., Дордієнко М.О. Еволюція текстури та зміни пружних параметрів сплаву Cu–37%Zn після ультразвукової та імпульсної швидкісної ударних обробок, Матеріали конференції «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем» (25–27 травня 2021 р.). – Київ, Україна, 2021. – С. 33.

УНІФІКОВАНИЙ АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ВПОРЯДКОВАНИХ ТА РОЗУПОРЯДКОВАНИХ ТВЕРДИХ ТІЛ

Горбатенко Ю.В., Кривчіков О.І., Романцова О.О., Королюк О.О.

*Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України,
пр-т Науки, 47, Харків 61103, Україна
Тел.: +38 057 343 1400 E-mail: horbatenko@ilt.kharkov.ua*

Теплопровідність матеріалів часто залежить від структури та типу впорядкування атомів в матеріалі. За характером температурних залежностей теплопровідності, їх умовно поділяють на кристалоподібні та склоподібні. Для кристалоподібної поведінки $\kappa(T)$ характерною ознакою є наявність дзвоноподібного максимуму теплопровідності в низькотемпературній області, після якого відразу ж спостерігається експоненціальне зменшення теплопровідності зі збільшенням температури, що плавно переходить в обернено пропорційне зменшення теплопровідності. Зліва від максимуму теплопровідності температурні залежності $\kappa(T)$ є пропорційними відповідно до різноманітних механізмів розсіяння на дефектах кристалічної ґратки матеріалу. Для неупорядкованих систем (аморфні, орієнтаційно неупорядковані кристали, скло тощо) теплопровідність демонструє склоподібну поведінку: її значення, як правило, низьке — коли температура підвищується від найнижчих температур, спочатку крива $\kappa(T)$ показує квадратичну залежність від температури (від найнижчих температур і до ≈ 2 К), потім в діапазоні температур $\approx 5\div 10$ К виникає плато теплопровідності, після якого спостерігається зростання $\kappa(T)$.

На прикладі речовин з клатратною структурою — газових гідратів, термоелектричних клатратів та скутерудитів [1] — проведено аналіз температурних залежностей теплопровідності з кристало- та склоподібною поведінкою $\kappa(T)$. Показано, що обидва випадки можуть бути описані в рамках узагальненої теорії теплопровідності [2], зокрема, що в будь-якому твердому тілі теплотранспорт здійснюється двома шляхами — квазічастинковий теплоперенос та хвильове тунелювання коливальних збуджень.

1. A. I. Krivchikov, Y. V. Horbatenko, O. A. Korolyuk, O. O. Romantsova, O. O. Kryvchikov, D. Szewczyk, A. Jezowski, *направлена до друку в Acta Materialia*.
2. M. Simoncelli, N. Marzari, F. Mauri. *Nature Physics* **15**, No. 8: 809–813 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0520-x>.

Дану роботу виконано за підтримки НФДУ в рамках проєкту “Квантове тунелювання коливальних збуджень в теплопровідності кристалічних та аморфних матеріалів і композитів” (реєстр. № 2020.02/0094).

МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ НА ПОВЗУЧІСТЬ ОРІЄНТОВАНОГО ПОЛІМЕРНОГО ІНКАПСУЛЯНТУ СОНЯЧНИХ МОДУЛІВ

Кислюк В.В.^{*}, Шиванюк В.М., Котречко С.О.

¹*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова,
Національна академія наук України,
бульвар академіка Вернадського, 03142 Київ, Україна
^{*}E-mail: viktor.kislyuk@gmail.com*

Випробування на повзучість, які передбачають побудову експериментальних залежностей часу життя від прикладеного механічного навантаження, є ефективним засобом тестування стану хімічних зв'язків, що відповідають за міцність матеріалу. Однак існує ціла низка факторів, які перешкоджають безпосередньо застосувати такий метод до полімерних матеріалів таких як співполімер етилен вініл ацетат (ЕВА), що є об'єктом цього дослідження, через його специфічну в'язко-пружну природу [1]. Наявність значної в'язкої компоненти ускладнює процес аналізу експериментальних результатів, особливо якщо йдеться про знаходження кількісних енергетичних параметрів, за якими можна оцінювати термін служби матеріалу. Тому важливим завданням є відшукування методу виокремлення в'язкої та пружної компонент. З цією метою зразок для випробування (гантелеподібної форми) попередньо деформується і витримується при сталому значенні цієї деформації до повної релаксації механічного навантаження. Це дає змогу виключити вплив в'язкої компоненти.

Було знайдено, що витягнутий таким чином зразок проявляє особливості порівняно з характеристиками зразка, який випробовувався одразу після вулканізації. Зокрема, спостерігали зростання модуля пружності до 0.5 ГПа порівняно з 1 МПа для вихідного зразка без попереднього витягування. Залежність логарифму часу життя повзучості від зовнішнього механічного навантаження для попередньо деформованого зразка є суттєво нелінійною з двома характерними ділянками, кожену з яких можна апроксимувати з допомогою двох типів лінійних залежностей, що базуються на наступних феноменологічних підходах: 1. Модель Журкова; 2. Модель Каузмана–Ейринга. Обидві ці апроксимації дають близькі значення енергій активації, які знаходяться в діапазоні $0.92 \div 1.65$ еВ, що в декілька разів нижче, ніж значення енергії дисоціації ковалентного зв'язку —C—C— основного полімерного ланцюга. На основі апроксимаційних параметрів знайдено величину поверхневої енергії розповсюдження тріщини, яка становить 0.01 Дж/м², що відповідає значенню, обчисленому із застосуванням критерію Гріфітса для розповсюдження тріщини. Крім того, випробування на повзучість за умов одночасного ультрафіолетового (УФ) випромінювання виявили анізотропію механічної міцності, тоді як повзучість за відсутності УФ не залежала від орієнтації зразка, що пояснюється наявністю ацетатних груп, які проявляють хромофорні властивості через наявність в них кратного зв'язку C=O , роль якого проявляється по-різному залежно від умов освітлення та орієнтації зразка.

ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МАГНІТОМЕТРИЧНИМИ МЕТОДАМИ

**Грузевич А.В.^{1,2}, Скирта Ю.Б.^{2,3}, Герасимчук І.В.²,
Кривець С.В.^{2(*)}, Дереча Д.О.^{2,4}**

¹*Трипільська ТЕС. 08720, м. Українка, Україна*

²*Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142 Київ, бульв.
Акад. Вернадського 36-б, Україна*

³*Національний технічний університет України «Київський політехнічний ін-
ститут ім. І. Сікорського». 03056, Київ, пр. Перемоги, 57, Україна.*

⁴*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України.
03142, Київ-142, бул. Акад. Вернадського, 34/1, Україна.*

**Тел.: +38 0501710238 E-mail: resega@ukr.net*

На практиці використовується ряд сучасних неруйнівних методів для визначення технічного стану енергетичного обладнання, а для оцінки мікроструктури й механічних властивостей — руйнівні методи контролю. Актуальним є завдання розробки обґрунтованих магнітних методів оцінки технічного стану, реалізованих з використанням існуючого магнітометричного устаткування. Ці методи можуть бути додатковим інструментом для зменшення витрат на роботи з діагностування та сприяти вирішенню завдання визначення напружено-деформованого стану та зміни мікроструктури в процесі експлуатації без одержання вирізок на контрольних ділянках.

На основі ефекту Баркгаузена розроблена оригінальна модель приладу, для опосередкованого визначення змін мікроструктури та механічних напружень, що виникають у трубах котлів під час експлуатації. Основна частина системи — датчик, який складається з електромагніту, який забезпечує потрібне намагнічування і приймальної котушки, на якій наводиться сигнал шумів Баркгаузена. На електромагніт подається пилоподібна напруга частотою декілька герц, що забезпечує лінійну зміну магнітного поля у заданому діапазоні. Ця напруга також подається на один з каналів АЦП для оцифровування. Сигнал з приймальної котушки подається на підсилювач, з виходу якого він поступає на інший канал АЦП. Оцифровані дані з обох каналів АЦП передаються на персональний комп'ютер. Сигнал від генератора пропорційний індукції магнітного поля. Сигнал з приймальної котушки складається з індукованого сигналу генератора та шумів Баркгаузена, які мають більш високі частоти. Для їх розділу використовується фільтр нижчих частот — усереднення у рухомому вікні. Ширина вікна підбирається дослідним шляхом. Отриманий усереднений сигнал, віднімається від початкового сигналу, різниця відповідає сигналу від шумів Баркгаузена. Для цих шумів також у рухомому вікні знаходиться дисперсія, яка може слугувати мірою їх інтенсивності. Розподіл інтенсивності шумів Баркгаузена вздовж кривої намагнічування змінюється при термічній або механічній обробці феромагнітного зразка і може слугувати для якісної оцінки зміни його механічних властивостей у процесі експлуатації. Прилад апробовано на підприємствах ПАТ «Центренерго».

СЕКЦІЯ 7. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ФІЗИЧНОГО ТА ХІМІЧНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

ПЕРЕНЕСЕННЯ МІЖВУЗЛОВИХ АТОМІВ ПРИ УДАРНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

Карасевський А.І., Наумук А.Ю.

*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
03142, Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36, Україна
Тел.: +38 097 696 3621 E-mail: artem.naumuk@gmail.com

У серії робіт було виявлено значне збільшення швидкості масопереносу міжвузлових атомів в металі при ударному навантаженні на його поверхню. При цьому ударна взаємодія може мати різну природу — механічні удари, імпульси лазерного випромінювання, іскрові розряди і т.п. Для теоретичного опису аномального масопереносу пропонувався ряд моделей, найбільш розробленою серед яких є дислокаційна модель. В рамках цієї моделі передбачається, що міжвузловий атом захоплюється дислокацією і транспортується нею на макроскопічні відстані вглиб кристала.

У даній роботі аномальне перенесення міжвузлових атомів пов'язується з утворенням в кристалі деформаційної хвилі поздовжніх атомних зсувів. Показано, що поверхневий удар призводить до формування в середовищі хвилі неоднорідних атомних зсувів, яка поширюється від поверхні в глибину кристала. При цьому, внаслідок зміни міжатомної відстані на фронті деформаційної хвилі кристала змінюється рельєф потенційної енергії для міжвузлових атомів. Зростає внесок в енергію міжвузлових атомів короткодіючої (позитивної) складової потенціалу взаємодії атомів матриці та міжвузлових атомів. Крім того, міжвузлові атоми на фронті деформаційної хвилі отримують додатковий імпульс, що сприяє подоланню атомами міжвузлових потенційних бар'єрів і просуванню їх вглиб кристалу.

СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА НЕРІВНОСТЕЙ ПОВЕРХНІ АЛЮМІНІЮ

Бондар Є.А.

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна

**Тел.: +38 067 445 7552 E-mail: evg.bondar@ukr.net*

Поверхня матеріалів відіграє визначальну роль в формуванні контакту двох поверхонь через який відбувається теплова, електрична, механічна взаємодія. Значення шорсткості поверхні матеріалів впливає на довговічність роботи вузлів, агрегатів машин, що труться при механічному контакті, втрати енергії на електричний опір при електричному контакті, на відвід і передачу тепла при тепловому контакті. Згідно [1], дві поверхні завжди контактують на окремих малих площах – фактичній площі контакту, яка складає приблизно 0,1–10% (частіше 0,5–2,5%) від номінальної поверхні контакту, при чому, внаслідок хвилястості поверхонь, ці площини контактів розташовані на окремих ділянках.

В даній роботі вивчався вплив на шорсткість поверхні алюмінію (А5) при поліруванні на фінішному етапі різними типами абразивних паст – 1) електрокорундовим (М10-М5) і 2) алмазним (АСМ 1/0) абразивами. За допомогою оптичного профілометра отримано висотний профіль нерівностей поверхні алюмінію. Для порівняння статистичних характеристик полірування поверхні брались з рівними середніми арифметичними значеннями шорсткості (0,05 мкм). По емпіричним даним побудовані Гаусові функції щільності ймовірності нерівностей профілю. Розподіл профілю поверхні алюмінію, отриманий від полірування алмазним абразивом є симетричним, а розподіл, отриманий від полірування електрокорундовим абразивом є асиметричним з переважанням виступів і є комбінацією декількох Гаусових функцій. Розподіли різняться середніми значеннями профілю і середньоквадратичними відхиленнями. Щоб досягнути бажаного ефекту від полірування поверхні матеріалів потрібно підбирати не тільки зернистість, але й тип полірувальних паст.

Робота актуальна для вивчення особливостей електрофізичних, теплових і механічних характеристик між двома поверхнями матеріалів, що контактують.

1. H.O. Sirenko and L.M. Soltys, *Physics and chemistry of solid state*, **11**, No.2: 423 (2010) (in Ukrainian).

ДЕПІНІНГ ВИХОРІВ АБРИКОСОВА У НАДПРОВІДНИКАХ ДРУГОГО РОДУ ЗІ СТОВПЧАСТИМИ ДЕФЕКТАМИ В ПОПЕРЕЧНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Гречиха О.С.^{1(*)}, Касаткін О.Л.²

¹*Державна наукова установа «Київський академічний університет»,
бульвар Академіка Вернадського, 36; 03142 Київ, Україна*

²*Інститут металофізики імені Г.В. Курдюмова НАН України, бульвар Академі-
ка Вернадського, 36; 03142 Київ, Україна*

**Тел.: +38 066 670 3747 E-mail: alexeee6@gmail.com*

Сучасним трендом у виробництві надпровідних матеріалів з високою здатністю переносити струм є застосування нанотехнологічних підходів, що дозволяє створювати всередині надпровідника штучну дефектну наноструктуру, яка здатна забезпечити сильний пінінг абрикосовських вихорів і, відповідно, бездисипативне протікання надплинного струму [1,2].

В даній роботі чисельними методами у пакеті Wolfram Mathematica розглянуто стійкість запінінгованого стану вихору Абрикосова у надпровіднику другого роду зі стовпчастими дефектами в поперечному до осі дефекту магнітному полі. Шляхом мінімізації функціоналу енергії вихору, отримано рівноважну форму пружної вихрової нитки. Обраховано і візуалізовано форму вихрової нитки та залежність положення кінців вихору на поверхні зразку від густини мейсснерівського струму. Показано, що при певному критичному значенні густини струму зміна форми вихрової нитки відбувається стрибком, а також перехід нитки у вільний (незапінінтований) стан.

В роботі знайдено залежності величин зміщення кінців вихорів та енергії вихору від густини струму, а також критичної густини струму від товщини надпровідної пластини. Показано, що при зростанні товщини зразку критична густина струму спадає. Розв'язано нестационарне рівняння динаміки вихрової нитки. З вигляду розв'язків цього рівняння зроблено висновок про існування характерного часу, за який відбувається депінінг вихору з лінійного дефекту у поперечному магнітному полі. Отримані результати якісно узгоджуються із відповідними даними експериментів [3].

1. Kwok W.-K., Welp U., Glatz A. [et. al.], Rep. Prog. Phys. 79, 116501 (2016).

2. Maierov B., Baily S. A., Zhou H. [et. al.], Nat. Mater. 8, 398 (2009).

3. Smith A.W., Jaeger H. M., Rosenbaum T. F., Kwok W. K. [et. al.], Phys. Rev. B 63, 064514 (2001).

ТЕРМОДИFUЗІЙНИЙ МЕХАНІЗМ ФОРМУВАННЯ АМОРФНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ

Карасевський А.І., Наумук А.Ю.

*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
03142, Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36, Україна
Тел.: +38 097 531 2039 E-mail: akarasevskii@gmail.com

Найбільш поширеним способом одержання аморфних металів є гартування розплаву. Необхідною умовою утворення аморфної фази при гартуванні металевого розплаву є висока швидкість охолодження розплаву, яка досягається шляхом нанесення тонкого шару розплаву на холодну металеву поверхню. Швидке охолодження розплаву вимагає створення значного градієнта температури в розплаві, який і впливає на стан розплаву. Для опису розплаву використовується діркова модель рідини, запропонована Я.І. Френкелем, в якій вважається, що рідина є конденсоване середовище з розчиненими в ній «дірками», тобто порожнинами, в які можуть переходити сусідні атоми рідини. Така спрощена модель рідини дозволяє, принаймні якісно, описати весь комплекс її транспортних і термодинамічних властивостей — великий коефіцієнт самодифузії атомів, низьку в'язкість рідини, збільшення об'єму при незмінній міжатомній відстані при плавленні кристала, самодифузію атомів в однокомпонентній рідині, особливості стисливості рідини при високому тиску та інше.

Встановлено, що в полі градієнта температури в розплаві виникає потік дірок, спрямований до поверхні розплаву, що призводить до виходу дірок з розплавленого шару і значного зменшення кількості вільних місць для дифузійного руху атомів розплаву, що призводить до зменшення коефіцієнта дифузії, зростання в'язкості та зменшення питомого об'єму середовища, тобто, в результаті термодифузійного процесу відбувається суттєве перетворення мікроструктури середовища, властивості якого безперервно наближаються до властивостей твердої аморфної фази. Вплив товщини шару розплаву на розподіл температури в розплаві приведе до розмірних ефектів аморфізації (критичної товщини шару розплаву, критичної швидкості охолодження розплаву, утворення неоднорідної макроструктури при збільшенні товщини розплавленого шару).

ВПЛИВ РОЗПОДІЛУ АТОМІВ Mg I Ti ЗА ОКТАЕДРИЧНИМИ ПОЗИЦІЯМИ НА ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ Mg₂TiO₄

Каширіна Н.І.^{1(*)}, Венгер Е.Ф.¹ Муратов О.С.², Роїк О.С.²

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
Прспект Науки, 45, м. Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Хімічний факультет,

01601, вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, Україна

*Тел.: +38 044 525 63 40 E-mail: kashirina1506@gmail.com

Кераміка на основі Mg₂TiO₄ (МТО) знаходить широке застосування у при виготовленні вогнетривких матеріалів та сонцезахисних покриттів [1], енергозберігаючих елементів, електродів в іонно-магнієвих батареях, використовується у високоточних приладах квантової електроніки для виготовлення резонаторів, сенсорів, фільтрів та антен, що працюють на мікрохвильових частотах.

Кубічний МТО (ортотитанат магнію) має структуру зворотної шпинелі, в якій атоми титану займають октаедричні позиції, а атоми магнію – як тетраедричні, так і октаедричні позиції. Розподіл атомів магнію та атомів титану за октаедричними позиціями відбувається статистичним шляхом: з рівною імовірністю 8 атомів магнію і 8 атомів титану можуть займати будь-яку з 16 октаедричних позицій МТО, елементарна комірка якого складається з 56 атомів. Підгратка, яка відповідає подібним октаедричним позиціям, порушує просторову симетрію кристала, приводячи, фактично, до появи неупорядкованого стану всередині кристалічної ґратки, яка відповідає тетраедричним позиціям магнію та підґратці атомів кисню.

Мета роботи полягає у вивченні впливу розподілу атомів Mg та Ti за октаедричними позиціями на властивості кристалічних ґратки, параметри зонної структури та фізичні характеристики МТО. Для моделювання кристалічної ґратки використовувалися програмні комплекси QE (Quantum ESPRESSO) [2] та ліцензійний комплекс програмного забезпечення VASP [3].

Показано, що ширина забороненої зони МТО залежить від розподілу атомів по октаедричними позиціям і зростає зі зниженням вільної енергії елементарної комірки. Найбільш низькому стану енергії кристалічних ґратки відповідає кристал МТО з тетрагональною симетрією. Зі зростанням температури кристали МТО з тетрагональною симетрією переходять до кубічних МТО внаслідок статистичного розупорядкування атомів Ti та Mg за октаедричними позиціями. Задовільне узгодження з експериментальним значенням оптичної ширини забороненої зони кубічного МТО отримано розрахунками, виконаними з гібридним потенціалом GAUPBE.

1. H. Sun, Y. Tao, and J. Zhang, *Journal of Alloys and Compounds*, **84**: 156527 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156527>

2. P. Giannozzi et al, *J. Phys.: Cond. Matter*, **29**: 465901 (2017). doi:10.1088/1361-648X/aa8f79

3. G. Kresse and J. Furthmüller, *Phys. Rev. B*, **54**: 11169 (1996). doi:10.1103/PhysRevB.54.11169

МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВАХ NiTiCoCuZrHf

Мельник О.Б., Шевченко А.Б., Олійник О.В.

*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,
бульв. Акад. Вернадського, 36; 03142, Київ, Україна*

¹*E-mail: mel@imp.kiev.ua*

Сплави на основі Ni–Ti з ефектом пам'яті форми, широко використовуються, як еластокалоричні матеріали для охолоджуючих систем, оскільки вони володіють великим тепловим ефектом (>20 кДж/кГ) і малою механічною роботою для його активації. Бінарні Ni–Ti мають високі еластокалоричні властивості, які можуть покращуватися шляхом розробки багатокомпонентних систем на їх основі. Одним з чинників пошуку таких матеріалів може бути більший стрибок ентропії, який характерний для високоентропійних сплавів (ВЕС). У ВЕС NiTiCoCuZrHf було експериментально виявлено мартенситні перетворення з еластокалоричним ефектом, які супроводжуються пам'яттю форми [1]. Для цих матеріалів важливим напрямком поліпшення властивостей є оптимізація складу, який впливає на фазову однорідність та стабільність системи.

У якості ВЕС як правило розглядаються багатокомпонентні системи (≥ 5), які можуть перебувати у формі твердих розчинів, інтерметалідів або стеків із близьким до еквіатомного складом. Багатокомпонентний ВЕС буде перебувати у стані однофазного твердого розчину (ТР) з енергією нижчою за відповідні багатофазні гетерогенні системи за рахунок зростання ентропії, що викликає зменшення вільної енергії Гіббса, яка характеризує термодинамічну стабільність системи. ТР перебуватиме в стані стабільної рівноваги, якщо він має найменшу вільну енергію Гіббса.

Композиції для високоентропійних сплавів (ВЕС), що містять Ni, Ti, Co, Cu, Zr, Hf елементи розглядались з використанням термодинамічного підходу в рамках напівемпіричної теорії Мієдеми [2]. Розраховано склади сплавів з мінімальною вільною енергією Гіббса, які будуть перебувати у формі однофазних стійких твердих розчинів. Встановлено, що стехіометрія однофазних стійких твердих розчинів буде суттєво відрізняються еквімолярної, а еквіатомні ВЕС будуть багатофазними. Оцінено параметри мартенситних перетворень та отримано їх кореляцію з експериментальними даними. Отримані результати використані для інтерпретації еластокалоричного ефекту в системах, що досліджувались

1 G.S. Firstov, T.A. Kosorukova, Yu.N. Koval, V.V. Odnosum, *Mater. Today Proc* 2S S499 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.335>.

2 A. B. Melnick, V. K. Soolshenko, K. H. Levchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **42**, No. 10: 1397 (2020). DOI <https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.13970673>.

LATTICE SITE OCCUPATION EFFECT ON THE ELECTRONIC STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF QUATERNARY CoMnCrAl HEUSLER ALLOY

**V.N. Uvarov¹, Y.V. Kudryavtsev¹, E.M. Rudenko¹, N.V. Uvarov¹,
A.E. Perekos¹, M.P. Melnik¹, V.Y. Tarenkov²**

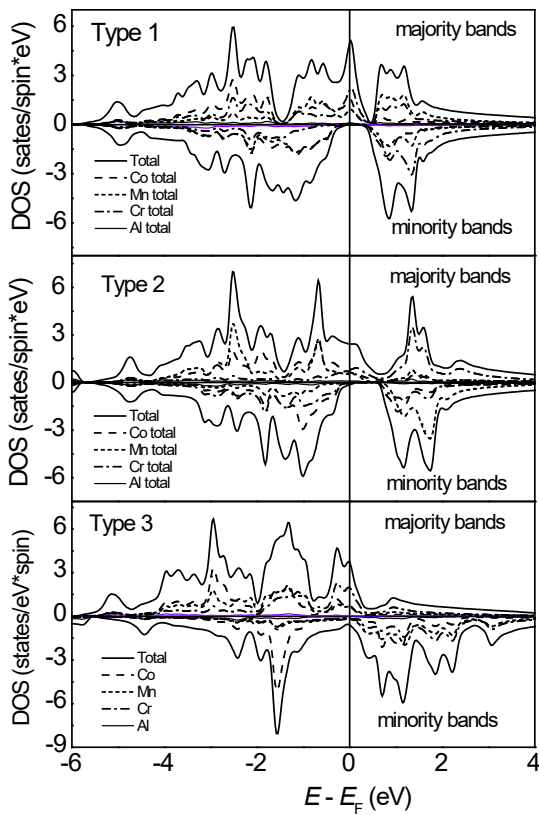
¹*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Boulevard, UA-03142 Kyiv, Ukraine*

²*Donetsk Physical and Technical Institute of the N.A.S. of Ukraine, Nauki 46, 03028, Kyiv, Ukraine*

*Тел.: +38 044 424 0516 E-mail: uvarov@imp.kiev.ua

Theoretical and experimental approaches have been employed for studying the lattice site occupation effect on the electronic structure and some physical properties of CoMnCrAl Heusler alloy (HA). Among possible variants of the ordered stoichiometric CoMnCrAl HA lattice site occupation by Co, Mn, Cr, and Al atoms the first-principle calculations have been performed for 3 nonequivalent ones (marked by us as Type 1, Type 2, and Type 3, respectively). CoMnCrAl HA with atomic order of the 1st type is half-metallic ferromagnet (FM) with resulting magnetic moment of

$m_{\text{tot1}}=0.9999 \mu_B/\text{f.u.}$ and spin-polarization degree of Fermi electrons $P_1=100 \%$, for atomic orders of 2nd and 3rd types the m_{tot} and P are equal to $m_{\text{tot2}}=1.0186 \mu_B/\text{f.u.}$, $P_2=89 \%$ and $m_{\text{tot3}}=6.8673 \mu_B/\text{f.u.}$, $P_3=77 \%$, respectively. Changes in the order type on the way $T1 \rightarrow T2 \rightarrow T3$ lead to changes in $D(E)$ (see Fig. 1), cause a decrease in the spatial electron density, weakening of the covalent chemical interatomic bonds, lead to a decrease in the cohesion energy E_{coh} and hence to loss of the thermodynamic stability of CoMnCrAl alloy. Despite various high-temperature heat treatments only $B2$ - and $A2$ -types of atomic order have been obtained in bulk and film CoMnCrAl alloy samples. Experimentally it was found that bulk $B2$ -type ordered CoMnCrAl alloy demonstrates significantly lower magnetization [$M(300\text{K})=0.442 \mu_B/\text{f.u.}$] and spin-polarization degree of Fermi electrons [$P \approx$



30%] than theoretically predicted. More disordered crystalline CoMnCrAl films with $A2$ -type of atomic order practically are non-FM at $T=300 \text{ K}$ with $P=0$.

ФІЗИЧНО ОБҐРУНТОВАНИЙ КРИТЕРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ РЕАКТОРНИХ СТАЛЕЙ І ЇХ ЗВАРНИХ ШВІВ

С.О. Котречко¹, В.М. Ревка², К.Ф. Сорока^{1(*)}

¹Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна

²Інститут ядерних досліджень,
просп. Науки, 47, 03028 Київ, Україна

*Тел.: +380 98 515 6092, E-mail: katerina.oleschenko@gmail.com

В ядерній енергетиці для оцінки радіаційного окрихчення металу корпусу реактора використовується зсув критичної температури крихкості, тобто різниця між значеннями критичних температур для опроміненого (T_{KF}) та неопроміненого (T_{KI}) металу, які визначаються при ударних випробуваннях. Величина T_{KF} (T_{KI}) визначається на температурній залежності ударної в'язкості KCV як точка перетину її з критеріальним рівнем KCV_{th} . В якості такого рівня використовуються різні значення енергії руйнування: 41Дж [1], 28Дж [2], 56Дж [3]. В Україні з цією метою використовується ПНАЕ Г-7-002-86 [4], в якому критеріальний рівень KCV_{th} зростає при збільшенні границі текучості $\sigma_{0,2}$. З фізичної точки зору це можна пояснити тим, що величина $\sigma_{0,2}$ дає вклад у величину роботи руйнування, тому при однакових рівнях *крихкості* металу, збільшення його міцності обумовлює зростання роботи руйнування [5], тому пороговий рівень KCV_{th} повинен визначатися таким чином, щоб однозначно характеризувати рівень крихкості металу. В якості міри крихкості металу доцільно використати величину залишкової деформації. В роботі запропонований фізично-обґрунтований критерій визначення T_{KF} (T_{KI}) при випробуваннях на ударну в'язкість. Показано, що в першому наближенні критерій сталості величини локальної пластичної деформації в околі концентратора напружень може використовуватися при коригуванні порогового рівня KCV_{th} в залежності від величини границі текучості $\sigma_{0,2}$ металу. Отримана наближена аналітична залежність рівня KCV_{th} від величини $\sigma_{0,2}$ корпусного металу для реакторів ВВЕР-1000, яка дозволяє прогнозувати рівень KCV_{th} з урахуванням міцності металу $\sigma_{0,2}$. Теоретично обґрунтовано, що додатковим чинником, який впливає на рівень KCV_{th} ударної в'язкості є величина крихкої міцності металу R_{MC} .

1. Standard Practice for Design of Surveillance Programs for Light-Water Moderated Nuclear Power Reactor Vessels, ASTM E185-16 (2016).

2. K. Wallin. A simple theoretical Charpy-V – KIc correlation for irradiation embrittlement // Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis, PVP. – (1989)

3. B. Tanguy, J. Besson, R. Piques, A. Pineau, *Engng Fract. Mech.*, **72**: 49 (2005). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.03.010>.

4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, ПНАЭ Г-7-002-86.

5. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков. *Проблемы прочности*, №4: 352 (2001).

***Ab initio*-МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ І РОЗРИВУ НЕСКІНЧЕННИХ КАРБІНОВИХ ЛАНЦЮЖКІВ**

Timoshevskii Andrei^{1(*)}, Kotrechko Sergiy^{1,2}, Nedozdhii Oleksii²

¹*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
36, Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37, Peremohy Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine*

**E-mail: atimoshevskii@gmail.com*

Отримання карбінових ланцюжків, що містять більш ніж 6000 атомів, стало «проривною» подією у розвитку технології цього унікального одновимірного нанооб'єкта. По суті це перетворило карбін з об'єкта теоретичного аналізу на нанооб'єкт, що має великі перспективи практичного застосування.

Існування в діаграмах розтягувань карбінів області, в якій не існують рівноважні стани (зони нестабільності), і залежність розміру цієї області від числа атомів у ланцюжку є однією з багатьох унікальних властивостей карбіну [1], яке, зокрема, має ключове значення для стейтроніки. У зв'язку з цим визначення міцності карбіну та отримання його деформаційних характеристик у широкому інтервалі значень деформацій має першорядне значення як для розуміння властивостей цього нанооб'єкта, так і для прогнозування можливостей його практичного використання.

У роботах [1,2] були експериментально та теоретично визначені основні механічні характеристики коротких (що містять кілька десятків атомів) карбінових ланцюжків. У доповіді викладено результати DFT – розрахунків нескінченних ланцюжків із «кумулен» та «поліін» структурами. Показано, що класичний підхід до розв'язання цієї проблеми, який полягає у використанні періодичних умов для одноатомної комірки (кумулен) та двоатомної комірки (поліін) дозволяє визначити лише модуль пружності та оцінити величину максимального опору деформації. При цьому, в принципі, неможливо побудувати спадаючу гілку деформаційної кривої і визначити параметри зони нестабільності ланцюжка, яка має визначальний вплив на закономірності розриву ланцюжка та його довговічність в умовах термосилового навантаження.

1. *Timoshevskii A., Kotrechko S., Matviychuk Yu.* Atomic structure and mechanical properties of carbyne. // Phys. Rev. B **91**: 45434- 10, (2015).

2. *Mikhailovskij I., Sadanov E., Kotrechko S., Ksenofontov V., Mazilova T.* Measurement of the inherent strength of carbon atomic chains. Physical review B **87**, 045410 (2013).

RESONANT INELASTIC X-RAY SCATTERING FROM BAND STRUCTURE CALCULATIONS: APPLICATION TO MgB₂

D.A. Kukusta^{1(*)}, V.N. Antonov¹, A.N. Yaresko²

¹*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine,
Akademician Vernadsky Blvd, 36; Kyiv, 03142, Ukraine*

²*Max Planck Institute for Solid State Research,
Heisenbergstraße 1 70569 Stuttgart, Germany*

**E-mail: kukustik@imp.kiev.ua*

The Resonant Inelastic X-ray Scattering (RIXS) technique has become a popular and powerful tool for studying elemental excitations in solids. It allows to investigate crystallographic, magnetic, charge and orbital structures and excitations with synchrotron light, which complements more traditional and widespread methods such as non-resonant x-ray scattering and neutron scattering. RIXS spectra are convolution of initial and final states, they depend on a lot of parameters, and their interpretation requires theoretical investigation [1–3].

We report on the implementation of RIXS spectra calculations in PY-LMTO code. Our implementation is based on fully relativistic Dirac self-consistent band structure calculations and uses one-electron Bloch wave function obtained using PY-LMTO code. Our RIXS code works with noncollinear magnetic structure and allows to calculate contributions from interband transitions between valence states with different symmetry (e. g. t_{2g} and e_g). It also allows to get both RIXS and optical joint DOS spectra and analyze how photoelectric matrix elements affect them as well as to study the angular and polarization dependence of the x-ray scattering cross section.

Due to use of one-electron Bloch wave functions currently it is not possible to describe collective excitations (excitons, magnons, etc.). To overcome this limitation, one should use the matrix elements obtained by use of any many-particle calculations using, e. g., GW approximation or Bethe–Salpeter approach and so on. The electric dipolar approximation used could be invalid for heavy elements at K absorption edge.

MgB₂ behaves as a conventional metal, so the RIXS spectra calculated at B K absorption edge are in agreement with experimental data obtained in [4].

1. M. Altarelli, *Resonant X-ray Scattering: A Theoretical Introduction*. In: E. Beaupaire, H. Bulou, F. Scheurer, J. P. Kappler, *Magnetism: A Synchrotron Radiation Approach. Lecture Notes in Physics*, **697**. Springer, Berlin, Heidelberg (2006). https://doi.org/10.1007/3-540-33242-1_8
2. L. J. P. Ament, M. van Veenendaal, T. P. Devereaux, J. P. Hill and J. van den Brink, *Rev. Mod. Phys.* **83**: 705–767 (2011). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.705>.
3. M. van Veenendaal, *Theory of Inelastic Scattering and Absorption of X-rays*, Cambridge University Press (2015). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139520010>
4. Andrei Sokolov, Ernst Z. Kurmaev, S Leitch, Alexander Moewes, Jens Kortus, Larisa D. Finkelstein, N. A. Skorikov, Chijin Xiao and Akira Hirose, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **15**, 2081–2089 (2003), <https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/12/325>

ELECTRONIC STRUCTURE OF ORDERED COPPER AND GOLD NANOSTRUCTURES

**Karbivskyy V.L., Romansky A.O.^(*), Karbivska L.I.,
Svachko N.K., Zaika V.V., Sukhenko I.V., Soroka A.P.**

*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine,
03142, Kyiv, Ukraine*

* Tel.: +38 068 943 1724 E-mail: anromansky@gmail.com

Nanostructures of copper and gold are very promising for use in nanoelectronics and plasmonics. Previously, we obtained ordered nanostructures of gold and copper on various surfaces [1]. The patterns of growth of hexagonal structures and their symmetry indicate the electronic structure's leading role in their formation process. Another quite intriguing result was obtaining of highly defective monolayer gold flakes with free-hanging edges. Such structures were observed only for gold, which can be explained by the unique property of gold clusters to maintain two-dimensionality at sizes up to 14 atoms [2]. At the same time, the experimental obtaining of larger flakes can be explained by the deposition mechanism: part of the primary flow particles does not immediately stick on the substrate but is reflected, forming a secondary flow. Particles of the primary and secondary flows can stick together, thus forming highly defective flakes. Of course, this form will not be the most energetically advantageous, but it may be the closest possible under specific obtaining conditions, similar to how it happens with amorphous metal alloys.

The features of the atomic and electronic structure of ideal and defective thin films, as well as 2D clusters of copper and gold, were investigated within the framework of the density functional theory. It was found that the introduction of point defects into the gold monolayer affects the DOS curve in the same way as the increase in the number of monolayers in the slab. Thus, defects can have a kind of "bulking" effect on the DOS curve. The curve shapes of the perfect monolayer and samples with defects are mainly determined by the components associated with the axis perpendicular to a slab surface [3]. It is shown that the location of topological neighbors in the sample, the variability of atomic positions, and the corresponding sets of bonds are the determining factors in the formation of the Cu and Au slabs DOS curves. The presence of a long-range effect of the atoms of the third coordination sphere on the electronic structure of (110) plane gold monolayers is shown. It was found that the zigzag and lacy shapes of the gold single-layer ribbon edges are more energetically beneficial than the straight edge.

1. L. Karbivska, V. Karbivskii, A. Romansky, O. Kuznetsova, P. Teselko, V. Artemyuk, "2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology" (ELNANO), p. 214–219 (2019). <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783939>
2. H. Häkkinen, *Chem. Soc. Rev.*, **37**: 1847–1859 (2008). <https://doi.org/10.1039/B717686B>
3. V. Karbivskii, A. Romansky, L. Karbivska, S. Shulyma, *Applied Nanoscience.*, **12**: 781–794 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01733-7>

СЕКЦІЯ 8. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ ЗАВДЯКИ ВИ- КОРИСТАННЮ ПРЯМИХ ТЕРМОЕМІСІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Лень Є.Г.^{1,2,*}, Васильєв М.О.¹, Макеева І.М.¹,
Колесник В.М.¹, Шевченко М.Я.¹, Смольнік С.В.¹**

¹*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна*

²*Київський Академічний Університет НАН та МОН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36, 03142, Київ, Україна*

^{*}*E-mail: len@imp.kiev.ua*

Сучасні теплові машини характеризуються значними втратами через неможливість використання тепла високотемпературного циклу згорання палива, наслідком чого є також значне теплове забруднення навколишнього середовища. Практично єдиним способом збільшення ККД ядерних (у майбутньому термоядерних) і теплових електростанцій та зниження рівня їх шкідливих викидів є використання прямих термоемісійних перетворювачів (ТЕП) теплової енергії на електричну шляхом їх вбудовування безпосередньо в оболонки печей та гарячі зони реакторів. На жаль, ресурс ТЕП з електродами на основі тугоплавких металів обмежується процесами випаровування та розпухання матеріалів. Частково вирішити ці проблеми дозволяє використання для катоду і аноду ТЕП монокристалів з однієї і тієї ж речовини, але з різними кристалографічними площинами, що виходять на робочі поверхні різних електродів. У зв'язку з цим методом плазмонної спектроскопії було досліджено електронні властивості, у т.ч. роботу виходу, граней (100) і (110) монокристалу вольфраму в залежності від різних типів їх термохімічної та йонної обробок.

Одержані результати свідчать, що завдяки підбору режиму термохімічної та йонної обробки поверхні монокристалів W(100) і W(110) можна варіювати різницю у їх роботах виходу в широкому діапазоні значень (0,39 еВ). Також проведено дослідження зміни електронних характеристик недеформованого та пластично деформованого монокристалів W(110), що піддавались однаковим обробкам. Встановлено, що макроскопічний вигин призводить до зменшення роботи виходу з опуклої поверхні зразка, яка зазнає деформації розтягування. Максимальна різниця в роботах виходу недеформованого і деформованого монокристалів спостерігається після всіх послідовно реалізованих термохімічних та йонної обробок. Ці результати вказують на можливість практичної реалізації описаної вище конструкції ТЕП з електродами з одного матеріалу.

ENTHALPY HYSTERESIS IN HEATING–COOLING CYCLE OF THE PHASE CHANGE MATERIALS PARAFFIN WAX/FULLERENE C₆₀

Ivchenko D.^{(*)1}, Hlek Ya.¹, Kvasnytskyi B.¹, Zhelezny V.¹

¹*Odesa National University of Technology,*

112, Kanatna Str., Odesa, Ukraine

**Tel.: +380 96 719 17 18*

E-mail: dmitriy.ivchenko@gmail.com

Industrial paraffin wax (PW) is considered a cheap, corrosion-stable phase change material (PCM) for thermal energy storage. Admixtures of nanoparticles in the PW contribute to the enhancement of PCM thermal conductivity but often affect negatively its caloric properties, however, sometimes there is an opposite effect.

According to the data previously obtained by authors, the fullerene C₆₀ admixtures in hydrocarbons contribute to a modification of the base liquid internal structure and a change in its caloric properties. Consequently, the effect of C₆₀ on the PW (53°C melting point) phase transitions enthalpy difference was studied experimentally to confirm the hypothesis about the C₆₀ effect on the caloric properties. For this purpose, aggregative stable PW/C₆₀ composite PCM was prepared as a saturated molecular solution (C₆₀ content 0.000746 g/g). Several PCM samples with various C₆₀ content (obtained by diluting the saturated solution) were explored in terms of the effective heat capacity and enthalpy of diffuse phase transitions over the 27–65°C temperature range. The study of caloric properties was performed by a method of monotonic heating in a specially designed calorimeter. The main advantage of the proposed set-up is the possibility to examine the effect of a small content of C₆₀ in PW on the dynamics of the phase transformations in the large-mass samples 70–80 g.

It was obtained, that the presence of C₆₀ in PW contributed to a decrease in the phase transitions enthalpy difference in the range 40–60°C during heating by 7.8 % at 0.000124 g/g of C₆₀ and by 21.8 % at 0.000746 g/g of C₆₀ vs. this value for pure PW. This effect is due to the transformation of the PW/C₆₀ crystalline phases to an amorphous one and then to liquid requires more energy than the same transformation in pure PW due to the numerous rotator phase transitions in alkanes. In contrast, when PW/C₆₀ samples are cooled, the C₆₀ admixtures contribute to the formation of a crystalline structure from supercooled liquid, thereby increasing the phase transition enthalpy difference vs. pure PW. The increase in this value by 16.3% and 26.4% was recorded at the C₆₀ content in PW of 0.000124 g/g and 0.000746 g/g, respectively.

The results obtained indicate the defining influence of C₆₀ on the PW structure in the liquid and solid states. The C₆₀ presence in PW reduces the enthalpy hysteresis in the heating–cooling cycle—a key parameter that affects the efficiency of PCM for thermal energy storage. At C₆₀ content of 0.000746 g/g, the difference between melting and solidification enthalpy in the range of 30–60°C was minimal (256.3 and 252.2 J/g, respectively). Whereas, at 0.000247 g/g of C₆₀, it was 268.8 and 243.8 J/g, and for pure PW it was 285.1 and 202.8 J/g. This positive effect may be due to various structural transformations in pure PW and PW/C₆₀ during the melting–solidification cycles. Such a result is of great importance for thermal energy storage unit efficiency.

МАТЕРІАЛИ З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ НА ОСНОВІ ПРОПІЛЕНГЛІКОЛЮ ДЛЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

Константинов О.І.^(*)¹, Хлісв Н.О.²

¹*Одеський Національний Університет ім. І.І. Мечнікова, Одеса, Україна*

²*Національний Університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна*

**Тел.: +380 98 877 33 13 E-mail: konstantinov1301@gmail.com*

Зберігання теплової енергії у вигляді прихованої теплоти плавлення/затвердіння матеріалів є перспективним, оскільки може забезпечити високу щільність її накопичення. Важливою перевагою такого способу є прийом/видача теплоти при постійній (або близькій до постійної) температурі. Перспективним є використання матеріалів з фазовим переходом (МФП) з температурою фазового переходу від -20°C до $+10^{\circ}\text{C}$ для зберігання холоду при транспортуванні продуктів, особливо морем. Такі МФП можна інтегрувати в теплоізоляцію огорожуючих конструкцій шаф та контейнерів, у яких продукт зберігається/транспортується для підвищення теплової буферної здатності ізоляції.

Як МФП у різних дослідженнях застосовувалися вода (температура плавлення $t_{\text{пл}} = -0,5 \dots 0,5^{\circ}\text{C}$), розчини солей ($t_{\text{пл}} = -33 \dots -2^{\circ}\text{C}$), парафіни ($t_{\text{пл}} = -12 \dots -11^{\circ}\text{C}$). На ринку представлені комерційні МФП для низькотемпературного зберігання, наприклад Rubitherm GmbH (склад яких прихований від покупця).

Однак, у сучасних публікаціях мало розглядається використання водного розчину пропіленгліколю (вода/ПГ). Пропіленгліколь не токсичний, не корозійно активний, дозволений для використання з харчовими продуктами (наприклад, як холодоносії). Температуру його замерзання -60°C , за різних концентрацій у воді можна підібрати необхідну температуру фазового переходу. Вода/ПГ по термоакумулюючій здатності (теплоємність та теплота фазового переходу) є хорошим МФП. Проте, він має низку недоліків, для пом'якшення чи усунення яких плануються подальші дослідження авторів. По-перше, досить велика в'язкість при температурах, близьких до замерзання, погіршує теплоперенос в рідкій фазі. Теплопровідність пропіленгліколю не висока ($0,218 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при 20°C). По-друге, для вода/ПГ характерно сильне переохолодження перед затвердінням. Зазначені ефекти негативно позначаються на кінетиці процесу прийому та віддачі теплоти МФП вода/ПГ.

Авторами висувається гіпотеза про те, що добавки наночастинок оксидів металів (наприклад, Al_2O_3) до вода/ПГ сприятимуть підвищенню теплопровідності й будуть виконувати роль центрів кристалізації при фазовому переході рідина–тверде тіло. Однак, додаткова складність може виникнути з колоїдною стабільністю такого МФП, що і планується вивчити експериментально. Друга гіпотеза полягає у тому, що присутність металічного волокна (мідь або алюміній) у вода/ПГ буде сприяти підвищенню теплопровідності. Однак вплив металевих волокон на температуру кристалізації та хімічну сумісність матеріалів вимагає подальшого експериментального вивчення.

PHASE CHANGE MATERIAL PARAFFIN WAX/EXPANDED GRAPHITE:
SEARCH OF RATIONAL COMPOSITION

Hlek Ya.^{(*)1}, Sestopalov K.², Khliyeva O.², Zhelezny V.¹

¹*Odesa National University of Technology,
112, Kanatna str., Odesa, Ukraine*

²*National University “Odessa Maritime Academy”,
8, Didrikhson Str., Odesa, Ukraine*

**Тел.: +380 97 744 97 22 E-mail: yanaglek90@gmail.com*

The use of expanded graphite (EG) as filler for industrial paraffin wax (PW) is a promising approach to the creation of the phase change materials (PCMs) of new generation for thermal energy storage. The choice of a rational concentration of EG in PW is not a trivial task. This concentration depends on the preparation technique and should be optimal between thermal conductivity enhancement and caloric properties deterioration. The effect of the EG matrix on the density and thermal conductivity of PW is studied experimentally. Composite PCMs PW/EG (EG content up to 6.5 wt. %) were prepared within the original technique and inherent in high pores fill factor. This technique includes component deaeration before impregnation of the EG matrix of the molten PW

Density measurements for the samples as pellets were performed by the gravimetric method. The real EG density (without pores) in composite PCM was assumed 2.20 g sm⁻³ and used for pores filling factor calculation. Thermal conductivity measurements for the solid samples were performed using a precision devise Hot Disk TPS 2500 S with sensor All Kapton (*d*=2 mm).

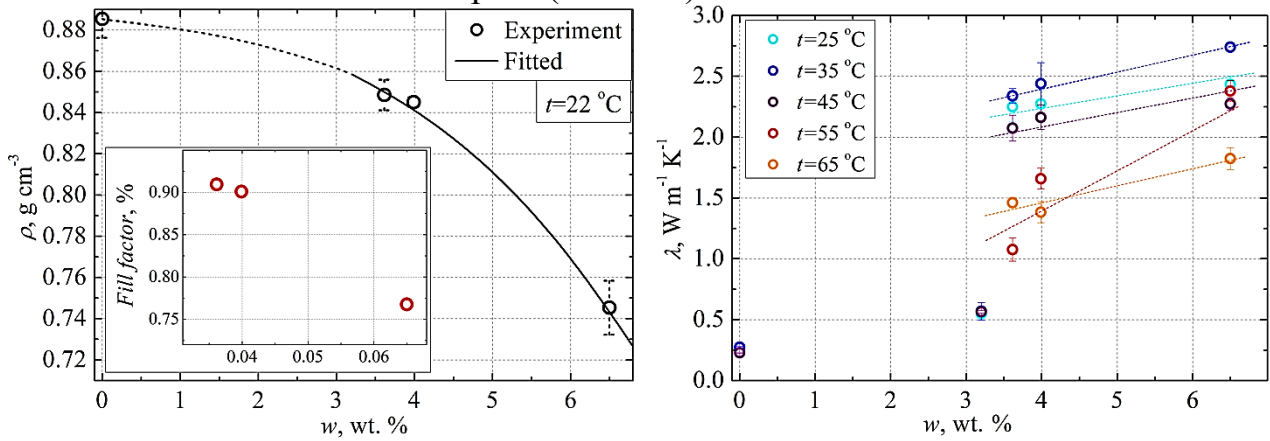


Fig. 1. Concentration dependence of the density (left) and thermal conductivity (right) for PW/EG; inset: concentration dependence of pores filling factor

It was concluded (Fig. 1) that 4 wt. % is a rational content of EG in PCM, which was prepared by the proposed technique. A higher content of EG will provide a lower pores filling factor, as a result, a lower PW portion will be involved in the phase transition and overall thermal storage capacity can deteriorate. A lower content of EG inherent a low thermal conductivity and stability of the composite PCM. The last technological characteristic is important for practical application, as it prevents the PW leakage from thermal energy storage units and shrinkage during solidification.

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України
Україна, 03142, Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36
Телефон:
дирекція: + (380) 44 4241005
учений секретар: + (380) 44 4243110
Факс: + (380) 44 4242561
Email: metall@imp.kiev.ua

Голова організаційного комітету — к.ф.-м.н. Віталій Бевз

Дизайн: Анастас Романський, Яна Павлюк
Підготовка збірника: Галина Михайлова

Технічна підтримка Міжнародної конференції ФМІЕ-2023:
Микола Якимчук, Олег Бошко, Дмитро Пакула, Ірина Загорулько,
Віктор Бурлаков, Олександр Стасюк, Сергій Кедровський,
Олександра Баскова, Оксана Солдатенко, Денис Оришич.

Сайт конференції: <https://www.imp.kiev.ua/fmie/>