*Дерев'янка С.В., Васильченко А.В., Єкімов О.Л. ТОВ “Науково-технічний центр БіоКвант”
Олійник Р.М., Єрмоленко О.В. Державний науково-дослідний інститут випробувань і
сертифікації озброєння та військової техніки*

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПОГЛИНАННЯ ХВИЛЬ РІЗНОЇ ДОВЖИНИ НАНОЧАСТИНКАМИ МЕТАЛІВ ТА НЕМЕТАЛІВ

Метою роботи є розгляд перспектив застосування нанотехнологій в оборонній галузі для розробки стелс-технологій. Застосовано методи: інформаційно-аналітичний, синтез, узагальнення та порівняння. Наведено можливість використання наночастинок металів заліза, кобальту, нікелю, цинку, марганцю та інших металів та композитних наноматеріалів для поглинання, заломлення та розсіювання хвиль різної довжини, що може бути використане при розробці покриттів для військової техніки з метою зниження помітності та протидії системам наведення на ціль. Висвітлено можливість використання наночастинок неметалів для поглинання інфрачервоного випромінювання, що має важливе значення для маскування техніки, військових об'єктів та особового складу. Зважаючи на значний науковий потенціал вітчизняних вчених, володіння технологіями синтезу наночастинок металів та неметалів різних форм та розмірів, спираючись на результати попередніх досліджень щодо здатності наночастинок поглинати хвилі різної довжини, вбачаються високі перспективи розробки стелс-технологій для потреб Збройних Сил України.

Ключові слова: *наночастинки, нанотехнології, хвилі різної довжини, поглинання хвиль, розсіювання хвиль, стелс-технології.*

Постановка проблеми. Матеріально-технічне забезпечення Збройних Сил України є основною передумовою їх високої бойової здатності. Високотехнологічна зброя, технічні засоби виявлення та наведення постійно модернізуються та удосконалюються. Однією із найважливіших умов тактичної переваги над противником є маскування та протидія цим системам. Одним із напрямків підвищення протидії системам виявлення та наведення є розробка стелс-технологій на основі наночастинок (НЧ) металів та неметалів.

Стелс-технології (від англійського “stealth” – “нишком, крадькома”) це технології, які перш за все, ставлять перед собою мету знайти такі матеріали для покриття, які б забезпечили максимальне поглинання хвиль різної довжини, які випромінюють радіолокаційні станції, поглинати лазерне проміння систем наведення та поглинали інфрачервоне випромінювання, яке виявляють тепловізори та прилади нічного бачення. У перспективі, нанотехнології та стелс-покриття мають забезпечити невидимість об'єктів у широкому діапазоні частот електромагнітних хвиль, яка може сягати від двох до трьох порядків величини. Це амбітні завдання, проте, вони є реальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення цих питань активно проводять дослідження вчені різних провідних країн світу: Сполучених Штатів Америки, Європейського Союзу, Китайської Народної Республіки, Російської Федерації. Зокрема, у країнах НАТО ведеться робота з удосконалення існуючих стелс-технологій та розробки методів протидії ним. Так, Організація НАТО з науки і технологій (англ. NATO Science and Technology Organisation (STO)) проводить дослідження з розробки новітніх матеріалів методами нанотехнології та синтетичної біології з метою їх використання у “стелс” – та інших технологіях, досліджує властивості графену та інших новітніх двовимірних та топологічних матеріалів. Ведеться робота з розробки роботизованих автономних підводних апаратів зі стелс-покриттям, яке захищає їх від інфрачервоного випромінювання та акустичних хвиль. Розробляються покриття, які захищають техніку від радарів та інфрачервоних сонарів [1]. У Російській Федерації ведеться робота з розробки покриттів для літаків, що екранують радіохвилі [2].

Об'єктивно, що всі матеріали досліджень за цими напрямками ми не можемо проаналізувати через обмеження доступу, тому зупинимось лише на аналізі тих літературних

джерел, які є у вільному доступі [3-12]. В цих роботах проаналізовано застосування НЧ заліза, кобальту, нікелю та оксиду заліза різних розмірів (від 7 до 75 нм) для поліпшення електромагнітного (ЕМ) екранування і особливо поглинання полімерами, армованим вуглеволоком, матричними композитами, що застосовуються у авіації за дії високих частот. Встановлено, що НЧ заліза розміром 25 нм виявляють найвищу здатність до поглинання ЕМ полів, у той же час, вони найкраще відбивають електромагнітні поля. Додавання НЧ заліза розміром 50 нм до нанокompозиту вуглецеве волокно/полімер покращує його показники екранувальної ефективності (ЕЕ) електромагнітних полів у широкому діапазоні частот (8,2–12,4) ГГц з високим піком 15 дБ на частоті 10,1 ГГц.

У той же час екрануюча поведінка є переважно постійною і частково збільшує ЕМ поглинання. Ці НЧ забезпечують майже однаковий рівень поглинання при меншому відбиванні електромагнітної енергії [3].

Виклад основного матеріалу. Для підвищення ЕЕ електромагнітних хвиль легкої вуглецевої піни (ВП) в цей композитний матеріал були вбудовані НЧ нікелю (НЧ Ni). ВП була розроблена на основі суміші кам'яновугільної смоли та НЧ Ni за термообробки до 1000 °С. Помічено, що НЧ Ni, вбудовані у вуглець, грають важливу роль для покращення структури та підвищення електропровідності, при цьому демонструє відмінне екранування ЕМ полів у діапазоні частот (8,2–12,4) ГГц з високою ЕЕ, яка забезпечується, в основному, втратами за рахунок поглинання. Загальна ЕЕ становить -25 дБ і -61 дБ для ВП і ВП з НЧ Ni відповідно.

Висока ЕЕ ВП з НЧ Ni зумовлена високими втратами за рахунок поглинання: -48,5 дБ. Таке високе збільшення втрат за рахунок поглинання зумовлене зростанням діелектричних та магнітних втрат ферромагнітних НЧ Ni з високою площею поверхні. Вбудовування НЧ Ni до ВП збільшує показники ЕЕ на 144 % і втрати за рахунок поглинання на 170 %. Таким чином, додавання невеликої кількості магнітних НЧ Ni до ВП зумовлює поглинання електромагнітного випромінювання або радіохвиль радару. Автори публікації стверджують про можливість використання НЧ Ni для стелс-технологій у цивільному та військовому застосуванні [4].

Доведена висока здатність композитних НЧ $\text{Zn}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$, синтезованих гідротермальним методом і диспергованих в середовищі SiO_2 , поглинати ЕМ хвилі у мікрохвильовому діапазоні. Здатність зразків з різною концентрацією ((0,5, 1, 1,5, 1,75) % композитної фарби) поглинати мікрохвилі вимірювали в діапазоні частот (8–12) ГГц (Х-діапазон). Встановлено, що чим вищий вміст $\text{Zn}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$, тим більше поглинання в діапазоні частот Х. Результати показали, що зразок з 1,5 мас.% $\text{Zn}_{0,8}\text{Ni}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (однодоменна структура) демонструє поглинання на рівні -20,74 дБ (зменшення потужності на 99,2%) за частоти 10 ГГц; у той час як зразок з феррі-магнітною багатодоменною структурою і з тією ж композицією продемонстрував поглинання на рівні -5,94 дБ за частоти 10 ГГц (зменшення потужності на 74,5%) [5].

Гідротермальним способом синтезовано композитні мікросфери $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MnO}_2$. Встановлено, що мікросфери $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MnO}_2$ за навантаження 10 % вагової фракції мають найвищий пік відбиття, що складає -42,6 дБ за частоти 5,7 ГГц та відповідної товщини 4,0 мм, у той час як мікросфери $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{MnO}_2$ за навантаження 20 % вагової фракції мають ширший діапазон поглинання (10,2–15,0) ГГц і (15,5–17,3) ГГц за відповідної товщини 1,5 мм. Автори вважають, що мікросфери є перспективними для поглинання мікрохвиль [6].

За допомогою методу мікрохвильового зварювання створено композитний матеріал на основі вуглецевих нанотрубок та металевого нікелю, у якому молекули вуглецю та нікелю зв'язані хімічним С–Ni зв'язком. Встановлено, що цей матеріал володіє високою здатністю поглинати ЕМ хвилі не тільки у діапазоні (2–10) ГГц, що характерно для вуглецевих нанотрубок та металічного нікелю, а й у діапазоні (10–18) ГГц, що забезпечується формуванням зв'язку С–Ni. Автори підкреслюють, що цей матеріал володіє видатними поглинальними властивостями щодо мікрохвиль у надзвичайно широкому діапазоні (2–18) ГГц, що відповідає загальнонавживаним частотами радарів [7].

Вітчизняними вченими Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України досліджено 3 типи наномagnetиків: наноплівки, нанодропи і наночастинки. У цих об'єктах, варіюючи фізичні параметри (розміри і температуру) та хімічний склад (різне співвідношення Fe, Co, Ni), можна впливати на зміну їх магнітних властивостей і, як наслідок, змінювати спектр поглинання електромагнітних хвиль у сантиметровому і міліметровому діапазонах (діапазон довжини мікрохвиль) [8].

Таким чином, закордонними та вітчизняними вченими доведено можливість використання наночастинок металів та композитних матеріалів для розробки покриттів зі здатністю поглинати ЕМ хвилі в широкому діапазоні, що може бути використано при розробці покриттів для протидії радіолокаційним станціям та іншим системам виявлення.

Крім того, існують дані щодо здатності НЧ поглинати лазерне випромінювання, що може бути використано при створенні покриттів для протидії системам наведення. Так, співробітниками Інституту хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України здійснено розрахунок енергії поглинання лазерного випромінювання металевими НЧ еліпсоїдальної форми, розміри яких значно менші довжини хвилі лазерного випромінювання, в області частот поверхневого плазмонного резонансу для випадку, коли наночастинка знаходиться у вакуумі. Отримані математичні вирази дають можливість знайти залежність енергії, що поглинається наночастинкою, від її форми та орієнтації відносно напрямку падаючого випромінювання. Знайдено, що ширини ліній поглинання зовнішнього випромінювання на частотах поверхневого плазмонного резонансу, окрім форми НЧ, визначаються також діагональними компонентами тензора провідності НЧ [9].

Існують дані щодо використання наноматеріалів селену, телуру та деяких рідкоземельних металів для поглинання хвиль в інфрачервоному спектрі. Так, китайськими вченими синтезовано панель нанопластинок рідкоземельних металів та селену, які показали дуже високе поглинання електромагнітних хвиль у видимому діапазоні. На думку авторів, широкомасштабний синтез сполук селену з рідкоземельними металами може закласти основу розвитку нових видів транзисторів, термоелектричних приладів та матеріалів, що поглинають хвилі [10]. Нанодропи та наноплівки селену можуть використовуватись для фотодетекції у видимому спектрі та у широких межах інфрачервоного спектру (від 405 нм до 1555 нм) [11]. Гетеро-сполучення нанотрубок телуру та селену мають високі поглинальні властивості в інфрачервоному діапазоні [12].

Нами синтезовано НЧ селену, які, за даними наукових співробітників Інституту хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, здатні поглинати хвилі в інфрачервоному спектрі. Крім того, є технології синтезу НЧ металів, неметалів та їх композицій різної форми та розмірів, які потребують вивчення їх поглинальних властивостей у широкому діапазоні хвиль.

Усі розглянуті вище новітні наноматеріали після відпрацювання відповідної технології їх нанесення та проведення випробувань на натурних зразках (макетах), у разі підтвердження їх ефективності можуть бути застосовані для захисту (маскування) різноманітних зразків озброєння та військової техніки: літаків, броньованої техніки, кораблів та інше.

Висновки. Підсумовуючи зазначене вище, зважаючи на значний науковий потенціал вітчизняних вчених, володіння технологіями синтезу НЧ металів та неметалів різних форм та розмірів, спираючись на результати попередніх досліджень щодо здатності НЧ поглинати хвилі з різною довжиною та частотою, можна стверджувати, що вбачаються високі перспективи розробки “стелс”-технологій для потреб Збройних сил України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. NATO S. T. O. Science & Technology Trends: 2020–2040. – 2021.
2. Лагарьков А.Н. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий / А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян // Вестник РАН. – 2003. – Т. 73. – Вып. № 9. – С. 848.

3. Electromagnetic shielding of polymer-matrix composites with metallic nanoparticles. M. Jalali, S. Dauterstedt, A. Michaud, R. Wuthrich. Composites: Part B 42 (2011). P. 1420–1426. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.05.018.
4. Nickel nanoparticles embedded in carbon foam for improving electromagnetic shielding effectiveness / Rajeev Kumar, Saroj Kumari, Sanjay R. – Dhakate: Appl Nanosci, 2014. – DOI: 10.1007/s13204-014-0349-7.
5. Anh T. Q. Luong and Dan V. Nguyen. Microwave-absorbing ability of super-paramagnetic Zn_{0.8}Ni_{0.2}Fe₂O₄ nanoparticles for the X-band frequency range. Mater. Express. – Vol. 9. – No. 4, 2019. – P. 344–350.
6. Mingtao Qiao, Xingfeng Lei, Yong Ma, Lidong Tian, Wenbin Wang, Kehe Su, Qiuyu Zhang. Facile synthesis and enhanced electromagnetic microwave absorption performance for porous core-shell Fe₃O₄@MnO₂ composite microspheres with lightweight feature. Journal of Alloys and Compounds. Vol. 693 (2017) 432–439. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.09.181.
7. Linna Sha, Peng Gao, Tingting Wu, and Yujin Chen. Chemical Ni-C Bonding in Ni-Carbon Nanotube Composite by a Microwave Welding Method and Its Induced High-Frequency Radar Frequency Electromagnetic Wave Absorption. ACS Appl. Mater. Interfaces 2017, 9, P. 40412–40419. – DOI: 10.1021/acsami.7b07136.
8. Вакула А.С. Електромагнітні властивості наномagnetиків у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук. – Харків, 2017. – 134 с.
9. Семчук О.Ю. Поглинання енергії лазерного випромінювання металевими наночастинками в умовах поверхневого плазмонного резонансу / О.Ю. Семчук, О.О. Гаврилюк, А.А. Білюк // Поверхность. – 2019. – Вип. № 11(26). – С. 496–507.
10. Liquid-Phase Syntheses and Material Properties of Two-Dimensional Nanocrystals of Rare Earth-Selenium Compound Containing Planar Se Layers: RESe₂ Nanosheets and RE₄O₄Se₃ Nanoplates. Jun Gu, Ze-Qiong Zhao, Yi Ding, Hong-Liang Chen, Ya-Wen Zhang* and Chun-Hua Yan*. – J. Am. Chem. Soc. 2013, 135, 22, 8363–8371. – DOI: 10.1021/ja4028583.
11. Chen Y. Z. et al. Environmentally and mechanically stable selenium 1D/2D hybrid structures for broad-range photoresponse from ultraviolet to infrared wavelengths // ACS applied materials & interfaces. – 2018. – T. 10. – №. 41. – С. 35477–35486.
12. Guo J. et al. Tellurium@ Selenium core-shell hetero-junction: Facile synthesis, nonlinear optics, and ultrafast photonics applications towards mid-infrared regime // Applied Materials Today. – 2020. – T. 20. – С. 100657.

Дерев'янюк Станіслав Васильович

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, директор з наукової діяльності Товариства з обмеженою відповідальністю “Науково-технічний центр БіоКвант”, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9409-2473>
e-mail: biopreparat@i.ua

Васильченко Анатолій Володимирович

директор з науково-виробничої діяльності Товариства з обмеженою відповідальністю “Науково-технічний центр БіоКвант”, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2263-8702>
e-mail: top.leader.number.1@gmail.com

Sanislav Derevianko

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Chief for research of Bioquant Science and Technology Centre Limited Liability Company, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9409-2473>
e-mail: biopreparat@i.ua

Anatolii Vasylchenko

Chief for research and production of Bioquant Science and Technology Centre Limited Liability Company, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2263-8702>
e-mail: top.leader.number.1@gmail.com

Єкімов Олег Леонідович

Генеральний директор Товариства з обмеженою відповідальністю “Науково-технічний центр БіоКвант”, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3355-1090>
e-mail: o.ekimov@metek.com.ua

Олійник Руслан Михайлович

начальник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3969-544X>
e-mail: o.ruslan77@gmail.com

Єрмоленко Олександр Володимирович

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3168-1131>
e-mail: morpex1972@ukr.net

Oleh Yekimov

General director Chief of Bioquant Science and Technology Centre Limited Liability Company, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3355-1090>
e-mail: o.ekimov@metek.com.ua

Ruslan Oliynik

Chief of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3969-544X>
e-mail: o.ruslan77@gmail.com

Oleksandr Yermolenko

Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3168-1131>
e-mail: morpex1972@ukr.net

**ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES WITH VARIOUS WAVELENGTH
BY NANOPARTICLES**

S Derevianko, A Vasylchenko, O Yekimov, R Oliynik and O Yermolenko

An aim of the article is to review the potential of nanotechnology in military for the development of stealth technologies. Methods. Analysis of information, synthesis, generalization and comparison. Results. An overview of nanoparticles use in the development of stealth technologies has been made. Foreign and Ukrainian publications were analyzed. The possibility of using nanoparticles of metals like iron, cobalt, nickel, zinc, manganese and other metals and composite nanomaterials for absorption, refraction and scattering of waves of different lengths and frequencies, which can be used in the development of coatings for military equipment to reduce visibility and counter targeting systems has been shown.

The possibility of using nanoparticles of nonmetals to absorb infrared radiation, which is important for masking equipment, military facilities and personnel, has been highlighted.

High-tech weapons, technical means of detection and guidance are constantly being modernized and improved. One of the most important conditions for tactical superiority over the enemy is camouflage and counteraction to these systems. One of the ways to increase the resistance to detection and guidance systems is the development of stealth technologies based on nanoparticles of metals and non-metals.

In the long run, nanotechnology and stealth coating should ensure the invisibility of objects in a wide frequency band of electromagnetic waves, which can reach two to three orders of magnitude. These are ambitious tasks, however, they are real.

Foreign and domestic scientists have proven the possibility of using nanoparticles of metals and composite materials to develop coatings with the ability to absorb electromagnetic waves in a wide range, which can be used in the development of coatings to counter radar stations and other detection systems.

Given the significant scientific potential of Ukrainian scientists, presence of technologies needed for the synthesis of nanoparticles of metals and nonmetals of various shapes and sizes, based on previous research on the ability of nanoparticles to absorb waves of different lengths and frequencies, we see high prospects for stealth technologies for the Military Forces of Ukraine.

Keywords: nanoparticles, nanotechnologies, waves of various length, waves absorption, waves scattering, stealth technologies.