

В. А. Глива¹, Г. Ю. Краснянський¹, М. О. Довгановський¹, Т. М. Краснянський²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

²Український католицький університет, Львів, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БЛОКУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

Анотація. Розроблено матеріали для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. Застосування нітриду бору, оксиду хрому, магнетиту, які у великих кількостях виробляються промисловістю, дозволило отримати матеріали, придатні для широкого застосування. Основою матеріалу є серійний синтетичний текстильний матеріал. Носієм наповнювача є синтетичний лак. Встановлено, що за мінімального вмісту нітриду бору (25 % за масою у одному шарі), оксиду хрому (4,5 %), магнетиту (30 %) зниження рівнів інфрачервоного випромінювання за колірними температурами складають 25–28 %. За максимальної кількості оксиду хрому (7,5 %) цей показник складає 40–45 %. Для зразків із вмістом магнетиту 40 % і мінімальним вмістом нітриду бору і оксиду хрому зниження рівнів інфрачервоних випромінювань складало 75–80 %. За максимального вмісту нітриду бору цей показник зростає до 85–90 %, що є прийнятним. Показано, що колірні температури, визначені за допомогою теплової камери відрізняються від фактичних температур зразка, що є особливостями конструкцій камер. Врахувати цей факт можливо розрахунковим методом. У відповідні функції закладено робочі діапазони інфрачервоних камер, коефіцієнт випромінювання об'єкта, потужність випромінювання об'єкта тощо. Це спрощує процес проектування захисних матеріалів. Розроблені матеріали, придатні для використання у якості теплового камуфляжу та вирішення задач теплоізоляції. Застосування у дослідних зразках магнетиту у вигляді окремого шару дозволило отримати коефіцієнт екранування електромагнітного випромінювання ультрависокої частоти порядку 6,0–6,5, що є прийнятним для вирішення задач електромагнітної сумісності електронного обладнання. Додавання до магнетиту графіту у кількостях 1,5–3,0 % підвищує коефіцієнти екранування до 8,2–8,5.

Ключові слова: інфрачервоне випромінювання, камуфляж, теплоізоляція, електромагнітна сумісність.

Вступ

Розроблення і впровадження матеріалів для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону зберігає актуальність упродовж багатьох років. Це обумовлено необхідністю вирішення задач енергозбереження, що постійно вимагає створення матеріалів з високими коефіцієнтами відбиття та поглинання інфрачервоного (теплового) випромінювання. На сьогодні це особливо актуально для України, що пояснюється як обмеженістю енергоресурсів, так і наявністю великої кількості будівель і споруд, частково ушкоджених внаслідок бойових дій, що вимагає їх ремонту із забезпеченням прийнятної теплоізоляції. Крім того, в умовах війни потрібні матеріали, які ускладнюють виявлення об'єктів детекторами інфрачервоного випромінювання. Останні неперервно удосконалюються, що вимагає удосконалення відповідних матеріалів для зменшення теплових сигнатур об'єктів різної температури. Як в усьому світі, так і в Україні розроблено велику кількість матеріалів для блокування (поглинання та відбиття) електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. Але більшість з них є багатокомпонентними або багат шаровими і мають досить складні технології вироблення. Це підвищує вартість кінцевих виробів і обмежує їх масове застосування.

Тому постає завдання розроблення простого у виготовленні і прийняттого за властивостями матеріали для вирішення задач термоізоляції та теплокамouflажу.

Аналіз останніх досліджень і розробок. Розвиток досліджень і розробок щодо блокування інфра-

червоних випромінювань відбувається у двох напрямках.

Перший – матеріалів для забезпечення малопомітності нагрітих об'єктів при використанні тепловізорів. Технічні характеристики більшості тепловізорів відомі (довжини хвиль, які виявляються), а також характеристики інфрачервоних підсвіток. Наявність останніх вимагає особливих характеристик захисних покриттів – балансу відбиття та поглинання, характерного для оточуючих предметів.

Другий напрям – підвищення теплоізоляційних характеристик будівель і споруд у широкому частотному діапазоні, тобто для усього інфрачервоного випромінювання.

У дослідженні [1] показані результати розробки камуфляжного матеріалу для змінних фонових температур. Він є плівкою з напильням сплаву германію, сурми та телуру. За високих функціональних можливостей цей матеріал має високу вартість. При цьому найбільшій ефективності він досягає за температур 30–60 °С, що не завжди прийнятно. Його перевагою є можливість змінювати теплову сигнатуру за різних кутів відбиття випромінювання. Матеріал, описаний у [2], прозорий у видимій області електромагнітного спектра та непрозорий у інфрачервоній. Він складається з моношару полістиролових мікрокульок, нанесеного на потрібну поверхню. Технологія отримання моношару дуже складна і включає дворазове розчинення полімеру, оброблення ультразвуком тощо. Перенесення моношару на поверхню великої площі та складної гнучкої поверхні проблематичне. У будь-якому випадку у процесі розроблення захисних покриттів слід враховувати умови їх експлу-

атації. Наприклад, при застосуванні у зоні бойових дій матеріал повинен витримувати багаторазові деформації та високі механічні навантаження. У дослідженні [3] показана можливість створення покриття на основі поліуретану. Виготовлялися композиційні волокна, де матрицею є поліуретан, а наповнювачем – сурма та оксид олова. Ефективність такого матеріалу дуже висока (до 90 %) у широкому діапазоні температур – 20 °С–80 °С. Але собівартість також дуже висока, що унеможливило його застосування принаймні у цивільних цілях.

У відкритих джерелах представлено багато результатів виготовлення матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань з використанням нанотехнологій [4–6]. Вони ефективні і мають малі масогабаритні параметри, але у сучасних умовах України розглядати такі технологічні підходи недоцільно.

Таким чином, полягає задача розроблення і дослідження захисних властивостей матеріалу, виготовленого з простих і дешевих компонентів достатньої ефективності у інфрачервоній області електромагнітного спектра.

Мета роботи – розроблення і дослідження властивостей матеріалів для блокування інфрачервоних випромінювань.

Викладення основного матеріалу

Для виготовлення матеріалів, які блокують електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону, у якості основи було обрано стандартну синтетичну тканину. У якості рідкої субстанції для нанесення на тканину екрануючих елементів використовувався стандартний лак ХС. Теоретичні міркування свідчать, що матеріалами, які поглинають інфрачервоне випромінювання можуть бути нітрид бору та оксид хрому. Ці матеріали широко використовуються у промисловості. Нітрид бору використовується для вогнетривких покриттів, а оксид хрому (тривалентний) у якості зеленого пігменту та абразиву. Додатково у зразки додавався магнетит для поглинання електромагнітних випромінювань надзвичайно високих та ультрависоких частот. У частину зразків додавався дрібнодисперсний графіт, що підвищувало питому провідність матеріалу. Ступені блокування інфрачервоного випромінювання контролювався за допомогою серійного тепловізора.

Молярні теплоємності компонентів склали:

нітрид бору – 298 Дж/моль·К,

магнетит – 230 Дж/моль·К,

оксид хрому – 119 Дж/моль·К.

Послідовність нанесення компонентів на підкладку: перший шар – нітрид бору, другий шар – магнетит, третій шар – оксид хрому. У частині зразків третім шаром був графіт. Усі компоненти розчинялися у лаку ХС. Вміст нітриду бору за масою складав 16–25 %, оксиду хрому – 4,5–7,5 %, магнетиту – 30–40 %, графіту – 1,5–3,0 %. За різних кількостей наповнювачів ступені блокування інфрачервоного випромінювання наведені на рис. 1, а, б, в. Ефективність екранування інфрачервоного випромінювання матеріалами з додаванням магнетиту та великої кількості нітриду бору наведено на рис. 1, г, д, е.

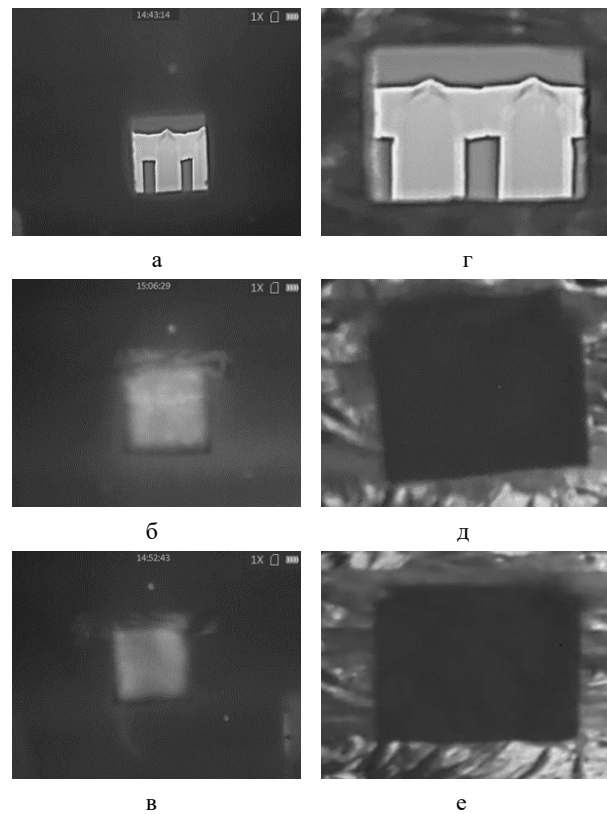


Рис. 1. Блокування інфрачервоного випромінювання:

а, г – зображення джерела випромінювання без захисного екрана;

б – мінімальні кількості наповнювачів;

в – максимальна кількість оксиду хрому.

д, е – зображення зразка з вмістом магнетиту з мінімальним (д) та максимальним (е) вмістом нітриду бору

Як видно з рис. 1 має місце зниження теплової сигнатури об'єкту, перекритого дослідними зразками.

Розглядаючи колірні температури, можна визначити, що матеріал (рис. 1, б) знижує інтенсивність інфрачервоного випромінювання на 25–28 %, на рис. 1, в – 40–45 %.

Найбільш прийнятні результати надають зразки, зображення яких наведено на рис. 1, г – е.

Зразок на рис. 1, д знижує інтенсивність інфрачервоного випромінювання на 75–80 %, а на рис. 1, е знижує інтенсивність інфрачервоного випромінювання 85–90 %. Такі результати можна вважати цілком задовільними. Але у реальних умовах експлуатації матеріалів ефективність може бути значно нижчою. Це пояснюється можливістю нагрівання самого захисного екрана внаслідок тривалого теплового впливу. Однією з можливостей уникнення такого ефекту є нанесення на основу у якості першого шару металовмісного матеріалу, наприклад, дрібнодисперсного алюмінієвого порошку. При цьому слід враховувати, що алюмінієвий порошок погано розчиняється у синтетичних лаках. Такий процес вимагає застосування швидкісного дисольвера.

Ефект різниці температури об'єкта, зафіксованої на інфрачервоному зображенні й фактичної температури об'єкта можна врахувати розрахунком:

$$T_k = CP_{об}(T) = C \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{об}(\lambda_1 T) d\lambda = C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{об}(\lambda) \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \cdot d\lambda,$$

де T_k – температура об'єкта, визначена інфрачервоною камерою, C – питома константа інфрачервоної камери, $P_{об}$ – потужність випромінювання об'єкта, $I_{об}$ – спектральна яскравість об'єкта, $\varepsilon_{об}$ – коефіцієнт випромінювання об'єкта, (коефіцієнт «сірості» об'єкта), λ_1, λ_2 – спектральний діапазон інфрачервоної камери.

За допомогою таких розрахунків можливо порівняти зображення об'єкта з температурними зображеннями природних об'єктів.

Наприклад, коефіцієнти випромінювання ґрунту, трави, кущів відомі, і складають 0,91; 0,95; 0,98 і близькі до показників абсолютно чорного тіла (1,0).

Було визначено, що розроблені покриття мають коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависокої частоти на рівні 6,0–6,5, що прийнятно для вирішення задач електромагнітної сумісності електронного обладнання.

Додавання графіту у кількостях до 3,0 % підвищує коефіцієнти екранування до 8,2–8,5.

Висновки

1. Розроблені матеріали для блокування електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону та випромінювань надзвичайно високих та ультрависоких частот базуються на компонентах масового виробництва (нітрид бору, оксид хрому, магнетит) й прийнятні для широкого застосування для вирішення задач теплового камуфляжу та теплоізоляції.

2. Зниження рівнів інфрачервоного випромінювання за колірними температурами складають для зразків з мінімальними кількостями наповнювачів 25–28 %, з максимальними кількостями оксиду хрому – 40–45 %. Для зразків із вмістом магнетиту за мінімальної кількості нітриду бору та оксиду хрому цей показник складає 75–80 %, а з максимальним вмістом нітриду бору – 85–90 %.

3. Застосування у дослідних зразках магнетиту у вигляді окремого шару дозволило отримати коефіцієнт екранування електромагнітного випромінювання ультрависокої частоти порядку 6,0–6,5, що є прийнятним для вирішення задач електромагнітної сумісності електронного обладнання. Додавання до магнетиту графіту у кількостях 1,5–3,0 % підвищує коефіцієнти екранування до 8,2–8,5.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Qu, Y., Li, Q., Cai, L. et al. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST. *Light Sci Appl* 7, 26 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0038-5>
2. Ho Kun Woo, Kai Zhou, Su-Kyung Kim, Adrian Manjarrez, Muhammad Jahidul Hoque, Tae-Yeon Seong, Lili Cai (2022). Visibly Transparent and Infrared Reflective Coatings for Personal Thermal Management and Thermal Camouflage. *Advanced Functional Materials*. V. 32, (38). <https://doi.org/10.1002/adfm.202201432>
3. Jeong, S.M., Ahn, J., Choi, Y.K. et al. Development of a wearable infrared shield based on a polyurethane–antimony tin oxide composite fiber. *NPG Asia Mater* 12, 32 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41427-020-0213-z>
4. Diao, Z., Kraus, M., Brunner, R., Dirks, J. H., & Spatz, J. P. (2016). Nanostructured Stealth Surfaces for Visible and Near-Infrared Light. *Nano letters*, 16(10), 6610–6616. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03308>
5. Luo, Hao & Li, Qiang & Du, Kaikai & Xu, Ziquan & Zhu, Huanzheng & Liu, Dongli & Cai, Lu & Ghosh, Pintu & Qiu, Min. (2019). An ultra-thin colored textile with simultaneous solar and passive heating abilities. *Nano Energy*. 65. 103998. [10.1016/j.nanoen.2019.103998](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103998).
6. Fang, Fang & Kennedy, John & Carder, Damian & Futter, John & Rubanov, S. (2014). Investigations of near infrared reflective behaviour of TiO₂ nanopowders synthesized by arc discharge. *Optical Materials*. 36. 1260-1265. [10.1016/j.optmat.2014.03.010](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.03.010).

Received (Надійшла) 22.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.07.2024

Development and research of protective properties of materials for blocking electromagnetic radiation in the infrared range

V. Glyva, G. Krasnianskyi, M. Dovhanovskiy, T. Krasnianskyi

Abstract. Materials for blocking electromagnetic radiation in the infrared range have been developed. The use of boron nitride, chromium oxide, magnetite, which are produced in large quantities by industry, has made it possible to obtain materials suitable for wide application. The basis of the material is a commercially available synthetic textile material. The filler is a synthetic varnish. It has been established that with a minimum content of boron nitride (25 % by weight in one layer), chromium oxide (4.5 %), and magnetite (30 %), the reduction in infrared radiation levels by color temperature is 25-28 %. With the maximum amount of chromium oxide (7.5 %), this figure is 40-45 %. For samples with a magnetite content of 40 % and a minimum content of boron nitride and chromium oxide, the reduction in infrared radiation levels was 75-80 %. At the maximum boron nitride content, this figure increases to 85-90 %, which is acceptable. It is shown that the color temperatures determined by the thermal chamber differ from the actual temperatures of the sample, which is a feature of the chamber design. It is possible to take this fact into account by the calculation method. The corresponding functions include the operating ranges of infrared cameras, the radiation coefficient of the object, the radiation power of the object, etc. This simplifies the process of designing protective materials. Materials have been developed that can be used as thermal camouflage and to solve thermal insulation problems. The use of magnetite as a separate layer in the prototypes made it possible to obtain a shielding coefficient of ultrahigh frequency electromagnetic radiation of the order of 6.0-6.5, which is acceptable for solving problems of electromagnetic compatibility of electronic equipment. The addition of graphite to magnetite in amounts of 1.5-3.0 % increases the shielding coefficients to 8.2-8.5.

Keywords: infrared radiation, camouflage, thermal insulation, electromagnetic compatibility.