

ORCID: 0000-0002-4680-1466

В. В. МОРОЗОВИЧ

викладач кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
vladmorozua@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8267-8365

Д. І. КОЛОМІЄЦЬ

викладач кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси,
Україна,
denyskolomiets95@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4950-394X

А. Р. ГОНДА

аспірант, ННІ ІНФОТЕХ
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
andriy.gonda@vu.cdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7015-1662

Ю. О. ЛЯШЕНКО

доктор фіз.-мат. наук, професор, ННІ ІНФОТЕХ
Черкаський національний університет
імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
lyashenko.yurij@gmail.com

DOI: 10.31651/2076-5851-2024-46-57

PACS: 44.10.+i, 81.05.Mh, 62.25.De,
72.80.Tm, 81.05.Uf

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРО- та ТЕПЛОПРОВІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ПЛОСКИМИ
ЕЛЕКТРОДАМИ**

Розроблено зразки композитних сендвічподібних електронагрівальних елементів із плоскими електродами із застосуванням модифікованих графітовим та мідним порошками синтетичних клеїв. Проведено випробування та дослідження електричних та теплових характеристик дослідних зразків, що живляться від джерел акумуляторного типу, в різних температурних режимах навколишнього середовища в діапазоні температур від -5 до 25 градусів Цельсія та в залежності від частки множинних механічних пошкоджень.

Ключові слова: електропровідність, теплопровідність, мідний порошок, графітовий порошок, композитні матеріали, електронагрівальний елемент.

1. Вступ

Електронагрівальні елементи знаходять широке застосування в різних сферах народного господарства. В основному, електронагрівачі будуються за принципами, що

підпорядковуються опису законом Джоуля-Ленца. Низькотемпературні нагрівачі тіл можуть мати різні конструктивні рішення, як, наприклад, застосування електричного провідника з певним опором в діелектричному матеріалі основи, або створення плоских полоскових елементів, що під'єднуються до електродів-шин, що знаходяться на протилежних бічних сторонах нагрівальних елементів. Основним недоліком такої конструкції є її вразливість стосовно механічних пошкоджень місць з'єднання нагрівальних елементів до струмопідвідних шин. Це або точкові контакти на кінцях провідного нагрівального елемента, або значна кількість місць під'єднання нагрівальних полосок до струмопровідних шин. В даній роботі описано методику розробки та проведено дослідження електронагрівальних композитних сендвічподібних елементів з плоскими електродами (по всій площі нагрівального елемента), що прогриваються по своїй товщині.

Об'єктом дослідження є електропровідність та тепловиділення композитних структур в залежності від матеріалу наповнювача, властивостей та характеристик електропровідних порошків, типу електродів.

Метою роботи є розроблення методики виготовлення композитних сендвічподібних електронагрівальних елементів із плоскими електродами із застосуванням модифікованих графітовим та мідним порошками синтетичних клеїв.

Основним завданням, що реалізовано в роботі є розроблення способів модифікації синтетичних клеїв за допомогою графітових та металічних порошків для виготовлення композитної структури електронагрівальних елементів з плоскими електродами

Актуальність дослідження полягає в розробці нової методики виготовлення композитних електронагрівальних елементів із використанням графітових та мідних порошків у матриці синтетичного клею, що є важливим для ряду сучасних технічних областей. Значимість цього дослідження полягає в потенціалі підвищити ефективність електронагрівальних елементів, що є особливо важливим у контексті глобальних вимог до енергозбереження та підвищення екологічної стійкості [1-3].

Однією з ключових переваг запропонованої методики виготовлення електронагрівальних елементів є її спроможність забезпечувати електропровідність та тепловиділення композитних структур, що підлягають механічним проникаючим пошкодженням. Це може мати практичне значення для широкого спектру застосувань, включаючи побутові електроприлади, промислове обладнання, системи опалення та навіть високотехнологічні медичні пристрої [2]. Крім того, використання графітових та мідних порошків в композитній структурі сприяє створенню елементів з покращеними фізичними властивостями, такими як міцність, гнучкість, довговічність та стійкість до механічних та теплових пошкоджень [3-5]. Згадані властивості є критично важливими для обладнання, що використовується у важких або екстремальних умовах. Розвиток технологій розроблення композитних електронагрівальних елементів відповідає потребам екологічної стійкості та сталого розвитку [6]. Покращення характеристик електронагрівальних елементів не тільки сприяє зниженню споживання енергії, але й зменшує вуглецевий відбиток продукції, відповідаючи міжнародним стандартам енергоефективності та екологічної безпеки [7-9].

2. Опис методики виготовлення композитних електронагрівальних елементів, функціонально стійких за проникаючих пошкоджень

Опишемо застосовану методику виготовлення композитних електронагрівальних пластин із плоскими електродами, що прогриваються по своїй товщині.

2.1. Підготовка електропровідної речовини для створення композиту

Мідний порошок і графітовий порошок рівномірно змішують, за допомогою механічної мішалки, після чого отриманий двокомпонентний порошок поступово, відповідно до пропорцій (див. Таблицю 1), додається до синтетичного клейового компоненту (в даній роботі для створення композитних нагрівальних елементів застосовується поліуретановий термостійкий клей (ПТК)). Потім проводиться процес перемішування компонентів впродовж 10 хв для забезпечення рівномірного розподілення провідного двокомпонентного порошкового наповнювача по об'єму синтетичного клею. Ця електропровідна суміш в подальшому використовується для просочування та проклеювання прошарків композитної електронагрівальної пластини.

2.2. Етапи виготовлення композитних електронагрівальних елементів на основі синтетичних клей

Створення композитних електронагрівальних пластин потребує дотримання розробленої методики для забезпечення необхідних теплових, електричних та механічних характеристик. Першим елементом сендвічподібної структури електронагрівальних пластин (див. Рис. 1) є алюмінієва фольга (вона слугує одним з електродів та хорошим провідником тепла). Далі, на алюмінієву фольгу накладаються прошарки склотканинної сітки, які рівномірно покриваються електропровідною сумішшю синтетичного клею та графітових і мідних порошоків в пропорціях згідно Таблиці 1. В розробленій конструкції між плоскими електродами укладається п'ять прошарків склосітки з відповідним просочуванням їх електропровідною сумішшю, щоб забезпечити необхідну механічну міцність та структурну стійкість нагрівальних елементів. Кожен прошарок склотканинної сітки орієнтований під різними кутами стосовно сторін комірок. Другим крайнім прошарком композитної структури є алюмінієва сітка, що додатково підвищує міцність та механічну стійкість електронагрівальних пластин, та слугує другим електродом. На завершальній стадії виготовлення електронагрівальної пластини до електродів пластин приварюються контактні дроти електроживлення, до алюмінієвої фольги кріпиться екошкіра (тепловипромінююча сторона) за допомогою синтетичного клею, а до алюмінієвої сітки приклеюється термоізолюючий матеріал.

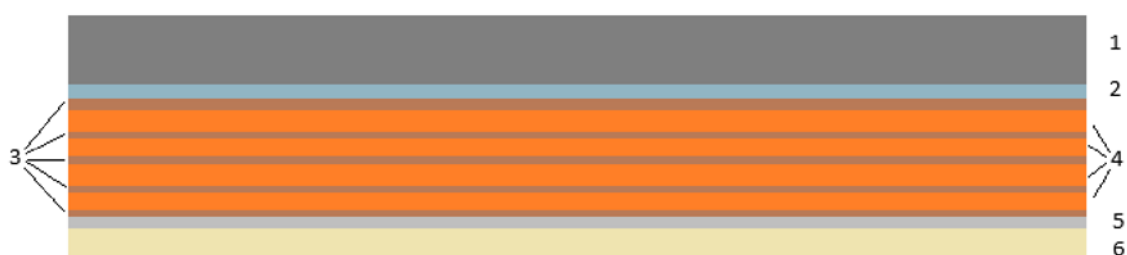


Рис. 1. Схематичне зображення пластини: (1) полотно Normaizol самоклеюче, (2) алюмінієва сітка, (3) композит (Cu/C/ПТК), (4) сітка склотканева (Baustoff), (5) фольга (Al), (6) екошкіра.

Fig. 1. Schematic representation of the plate: (1) Normaizol self-adhesive cloth, (2) aluminum mesh, (3) composite (Cu/C/PTC), (4) fiberglass mesh (Baustoff), (5) foil (Al), (6) eco-leather. Keywords: electric spark sintering, copper, tin, scanning electron microscopy, chemical deposition

Важливим аспектом є підбір технологічних параметрів, таких як розмір/товщина матеріалів, діаметр графітових та мідних порошоків, товщина прошарків композитної

структури та оптимальне співвідношення синтетичного клею (ПТК) та модифікуючих його графітового та мідного порошоків, що забезпечують необхідні характеристики електронагрівальних пластин.

Завершальним етапом виготовлення електронагрівальних пластин є полімеризація зразка, для цього зразок поміщається в витяжну шафу під прес із каналами доступу повітря для проведення повної полімеризації модифікованого порошками ПТК. Використання пресу необхідне для отримання електронагрівальних пластин рівномірної товщини. Процес полімеризації електропровідної суміші на основі ПТК відбувається за кімнатної температури та відносної вологості повітря 40-60 відсотків.

3. Результати досліджень електронагрівальних елементів

Після виготовлення зразків композитних електронагрівальних пластин проводилися вимірювання температури їх поверхні (як локально за допомогою термопар так і з застосуванням тепловізора для визначення теплового поверхневого температурного профілю) та параметрів електроспоживання.

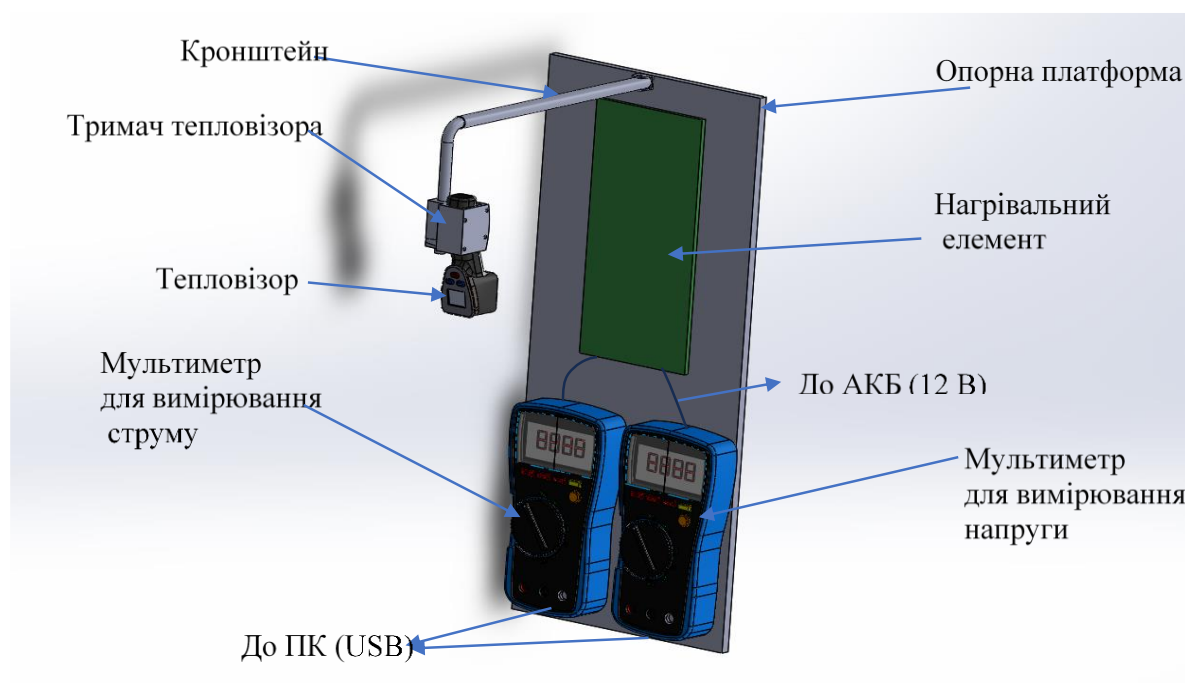


Рис. 2. Принципова схема стану для вимірювань електричних та температурних величин електронагрівальних елементів.

Fig. 2. Schematic diagram of the stand for measuring electrical and temperature values of electric heating elements.

Експериментальні дослідження характеристик розроблених електронагрівальних пластин проводилися за кімнатної температури та електроживлення від акумулятора (12,4 В) за допомогою розробленого стану для вимірювань (див. Рис 2). Результати аналізу отриманих даних (див. Таблицю 1) вказують на значий вплив концентрації та вмісту графітових та мідних порошоків на характеристики електронагрівання пластин.

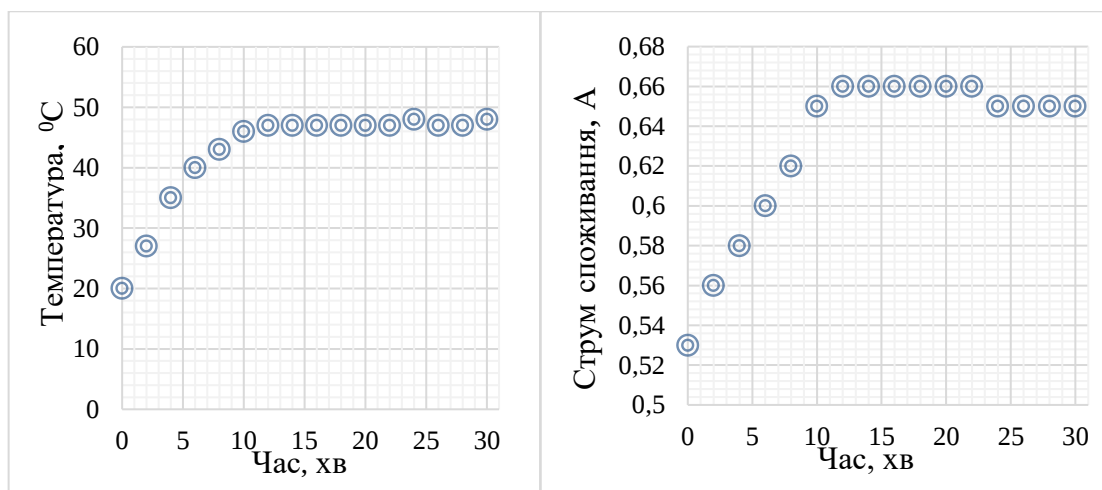
Таблиця 1. Залежність характеристик електронагрівальних пластин від співвідношення компонентів суміші порошків та ПТК
Table 1. Dependence of the characteristics of electric heating plates on the ratio of components of the mixture of powders and PTC

№ зразка	Розміри пластин, м*м	Сu (ПМС-1) г.	С (ГК-1) г.	ПТК мл.	U (V)	I (A)	T (°C)
1	0,15x0,15	10	5	70	12.74	—	20
2	0,15x0,15	7,9	7,5	70	12.74	—	20
3	0,15x0,15	5	10	70	12.74	0,14	22
4	0,15x0,15	5	15	70	12.74	5,4	>100
5	0,15x0,15	3	12	80	12.74	0,63	43.7
6	0,15x0,15	2,5	12,5	80	12.74	0,65	44
7	0,15x0,15	2	13	80	12.74	0,72	50.2

У таблиці 1 наведено параметри досліджуваних електронагрівальних пластин, включаючи їхні розміри, вміст комерційного порошку міді (ПМС-1) та комерційного порошку графіту (ГК-1), вміст поліуретанового термостійкого клею (ПТК), а також зазначено прикладену напругу U(V), струм I(A), що споживають електронагрівальні пластини, а також вказана температура T(°C), до якої розігріваються досліджувані електронагрівальні пластини протягом 15 хвилин. Зокрема, визначено, що оптимальне співвідношення мідного та графітового порошків не повинно перевищувати 1 до 4 відповідно.

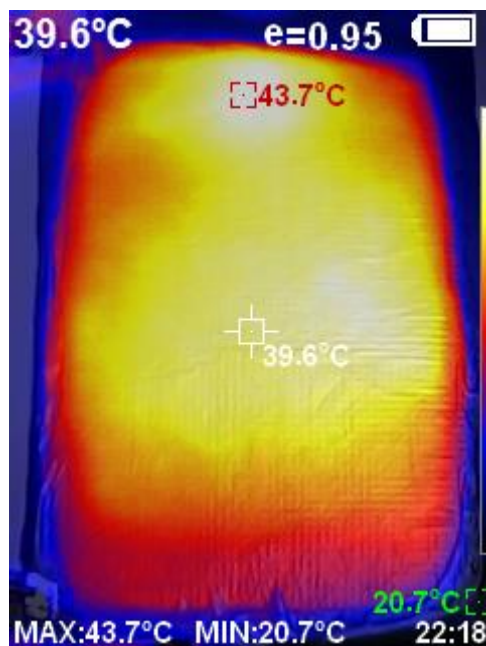
Проведення вимірів теплових та електричних характеристик проводилося за кімнатної температури протягом 30 хвилин, що необхідно для перевірки стабільності температурного режиму роботи пластин, який встановлювався за перші 15 хвилин після підключення до джерела електроживлення.

Результати встановлення стаціонарного температурного режиму зразків 5-6 (див. Таблицю 1) за кімнатної температури навколишнього середовища 20 градусів Цельсія після підключення до джерела живлення приведені на рисунках 3-5.



а

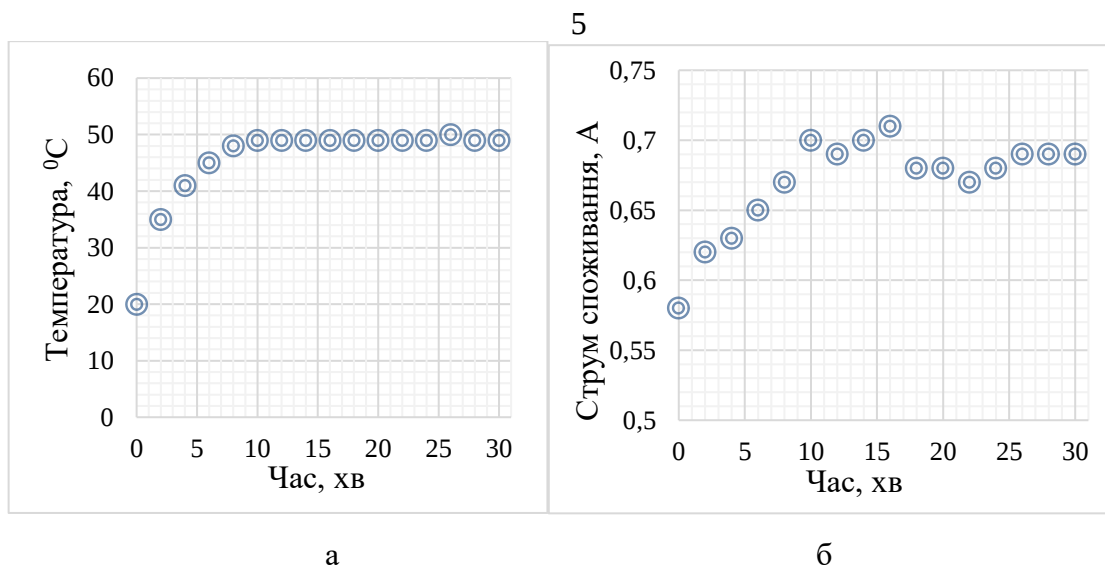
б

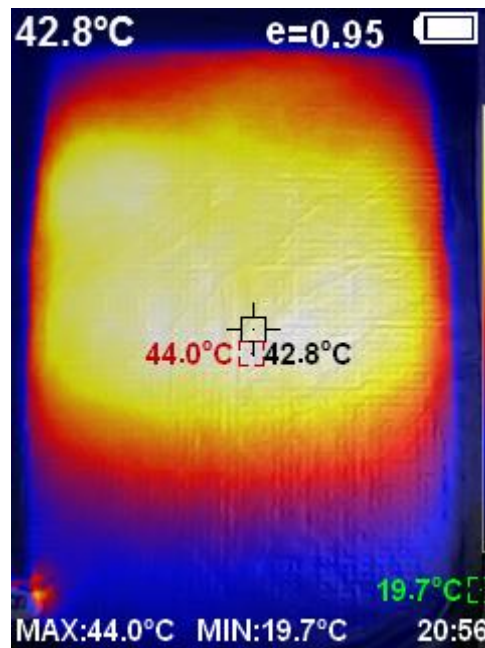


В

Рис. 3. Залежність зміни в часі параметрів зразка 5 після підключення до постійного джерела струму 12,4 В впродовж 30 хв: а) зміна температури на поверхні дослідного зразка 5 від часу; б) зміна сили струму споживання від часу; в) розподілу температурного поля на поверхні зразка 5

Fig. 3. Time dependence of the parameters of sample 5 after connection to a constant current source of 12.4 V for 30 min: a) temperature change on the surface of the test sample 5 with time; b) change in the current consumption with time; c) temperature field distribution on the surface of sample 5

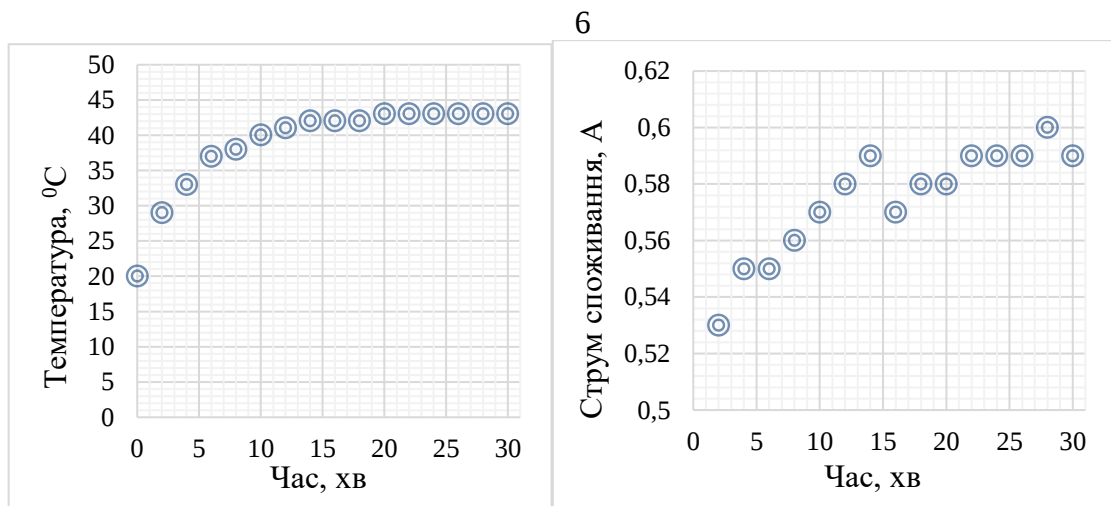




в

Рис. 4. Залежність зміни в часі параметрів зразка 6 після підключення до постійного джерела струму 12,4 В впродовж 30 хв: а) зміна температури на поверхні дослідного зразка 6 від часу; б) зміна сили струму споживання від часу; в) розподілу температурного поля на поверхні зразка 6

Fig. 4. Time dependence of the parameters of sample 6 after connection to a constant current source of 12.4 V for 30 min: a) temperature change on the surface of the test sample 6 with time; b) change in the current consumption with time; c) temperature field distribution on the surface of sample 6



а

б

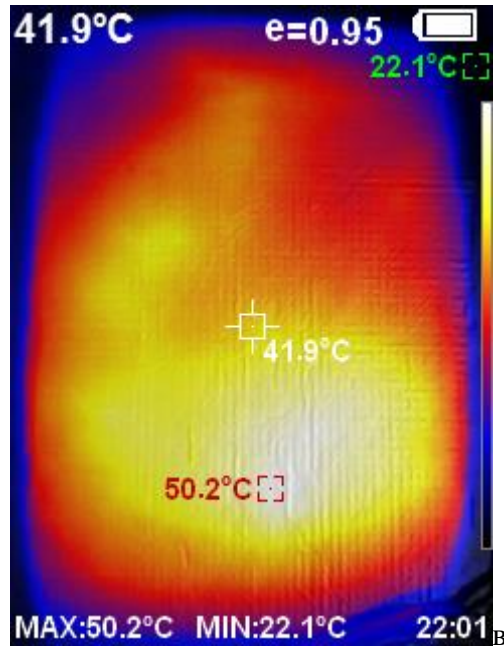


Рис. 5. Залежність зміни в часі параметрів зразка 7 після підключення до постійного джерела струму 12,4 В впродовж 30 хв: а) зміна температури на поверхні дослідного зразка 7 від часу; б) зміна сили струму споживання від часу; в) розподілу температурного поля на поверхні зразка 7

Fig. 5. Time dependence of the parameters of sample 7 after connection to a constant current source of 12.4 V for 30 min: a) temperature change on the surface of the test sample 7 with time; b) change in the current consumption with time; c) temperature field distribution on the surface of sample 7

Отже, експериментальні дослідження дослідних зразків вказують, що для досягнення оптимальних технічних характеристик композитних електронагрівальних пластин з плоскими електродами потрібно дотримуватись певних пропорцій компонентів, що відповідають зразкам 5-6 (див. Таблиця 1).

Таким чином, в роботі розроблено та досліджено характеристики композитних електронагрівальних елементів з плоскими електродами, що забезпечують нагрівання від джерела акумуляторного типу (12 В) до температури близько 40 градусів Цельсія. Розроблені композитні сендвічподібні електронагрівачі, що живляться від джерел акумуляторного типу, забезпечують технічні характеристики: номінальна напруга живлення 12 В, питома електрична потужність 300-400 Вт/м²; час нагріву до робочої температури (до 40 градусів Цельсія) не більше 15 хв (за температури навколишнього середовища 15 градусів Цельсія).

4. Висновки

Розроблено дослідну конструкцію сендвічподібних композитних електронагрівальних елементів з плоскими електродами, що необхідно для забезпечення максимальної стійкості електронагрівальних елементів стосовно множинних пошкоджень поверхні. Прогрівання таких елементів відбуватися по товщині між плоскими електродами, до яких електрична напруга підводиться в захищених від механічних пошкоджень місцях. Для забезпечення механічної міцності та стійкості до механічних пошкоджень розроблених композитних електронагрівачів здійснено підбір типу плоских електродів (матеріал, конструктивні особливості), підбір структури проміжних прошарків для забезпечення контролю товщини нагрівального

елемента, підбір складу та властивостей електропровідного композиту на основі синтетичного клею, графітових та мідних порошків. Для виготовлення дослідних зразків композитних електронагрівачів виконано підбір матеріалу порошків (мідь, графіт), розміру порошинок, їхнього співвідношення, масової частки електропровідної композиції в наповнювачах на основі синтетичного клею. Проведено експериментальні дослідження характеристик композитних електронагрівальних елементів з плоскими електродами, що дозволило встановити необхідні співвідношення компонентів електропровідної суміші для забезпечення нагрівання електропластин до 40 градусів Цельсія.

Подяки

Дослідження проведено в рамках виконання Науково-технічної розробки, що підтримана МОН України, № держреєстрації 0123U104477.

Список використаної літератури:

1. Kim T. Carbon fiber mats as resistive heating elements / T. Kim, D. D. L. Chung // *Carbon*. – 2003, Vol. 41, №12. – P. 2436-2440. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00288-4)
2. Falzon B. G. Development and evaluation of a novel integrated anti-icing/de-icing technology for carbon fibre composite aerostructures using an electro-conductive textile / B. G. Falzon, P. Robinson, S. Frenz, B. Gilbert // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2015. – № 68. – P. 323-335. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.10.023>
3. Klingeler R. Carbon nanotube based biomedical agents for heating, temperature sensing and drug delivery/ R. Klingeler, S. Hampel, B. Büchner // *International journal of hyperthermia*. – 2008. – Vol. 24, №6. – P. 496-505. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/02656730802154786>
4. Philip B. Material and process optimization screen printing carbon graphite pastes for mass production of heating elements/ B. Philip, E. Jewell, P. Greenwood, C. Weirman // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – № 22. – P. 185-191. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.001>
5. Колосов О. Технології композиційних матеріалів / О. Колосов // Київ: КІП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 258 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30176>
6. Свістільнік Р. Розробка технології електропровідних гібридних композиційних покриттів / Р. Свістільнік // *Технології та інжиніринг*. – 2022. – Том. 4, №9. – С. 60-70. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.5>
7. Mamunya Y. P. Thermal and electrical conductivity of the polymer-metal composites with 1D structure of filler formed in a magnetic field / Y. P. Mamunya, V. V. Levchenko, I. M. Parashchenko, E. V. Lebedev // *Polymer J (Ukraine)*. – 2016. – Vol.38, №1. – P. 3-17. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/polymerj.38.01.003>
8. Свістільнік Р. Ф. Вплив полімерних матриць на електричні властивості композитних покриттів / Р. Ф. Свістільнік, Т. Р. Федорів // *Technologies and Engineering*. – 2023. – №5. – P. 115-122. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.10>
9. Бутенко О. О. Застосування графітів в електропровідних полімерних композитах/ О. О. Бутенко, О. В. Черниш, Ю. О. Кубай, В. Г. Хоменко, В. З. Барсуков, Я. А. Куриптя // *Technologies and Engineering*. – 2022. – №6. – С. 72-81. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.6.7>

10. Lyashenko Y. O. New approach to effective diffusion coefficient evaluation in the nanostructured two-phase media / Y. O. Lyashenko, O. Y. Liashenko, V. V. Morozovich // *Applied Nanoscience*. – 2019. – №9. – P. 1025-1036. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0731-y>
11. Behbahani A. F. Electrical percolation behavior of carbon fiber and carbon nanotube polymer composite foams: Experimental and computational investigations / A. F. Behbahani, G. H. Motlagh, M. Ziaee, G. Nikravan // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2015. – Vol. 132, №42. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/app.42685>
12. Yat C. H. Investigation on buffon-laplace needle problem / C. H. Yat, F. P. Kiu, L. S. Him, L. K. C. Justin, T. S. Lam, C. Man // – 2021. – Режим доступу: https://hlma.hanglung.com/getattachment/f46f7ae5-2afb-4df5-996b-5eedd47996a3/17-hm_wyk.pdf
13. Arnow B. J. On Laplace's extension of the Buffon needle problem / B. J. Arnow // *The College Mathematics Journal*. – 1994. – Vol. 25, №1. – P. 40-43. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/07468342.1994.11973580>

References:

1. Kim, T., & Chung, D. D. L. (2003). Carbon fiber mats as resistive heating elements. *Carbon*, 41(12), 2436-2440. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00288-4)
2. Falzon, B. G., Robinson, P., Frenz, S., & Gilbert, B. (2015). Development and evaluation of a novel integrated anti-icing/de-icing technology for carbon fibre composite aerostructures using an electro-conductive textile. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 323-335. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.10.023>
3. Klingeler, R., Hampel, S., & Büchner, B. (2008). Carbon nanotube based biomedical agents for heating, temperature sensing and drug delivery. *International journal of hyperthermia*, 24(6), 496-505. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/02656730802154786>
4. Philip, B., Jewell, E., Greenwood, P., & Weirman, C. (2016). Material and process optimization screen printing carbon graphite pastes for mass production of heating elements. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 185-191. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.001>
5. Kolosov O. Technologies of composite materials. (2019) Kyiv: *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*, 258 c. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30176>
6. Svistsilnik, R., Fedoriv, T., Savchenko, B., & Osaulenko, S. (2022). Development of technology for conductive hybrid composite coatings. *Technologies and Engineering*, (4), 60-70. Retrieved from <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.5>
7. Mamunya, Y. P., Levchenko, V. V., Parashchenko, I. M., & Lebedev, E. V. (2016). Thermal and electrical conductivity of the polymer-metal composites with 1D structure of filler formed in a magnetic field. *Polymer J (Ukraine)*, 38(1), 3-17. Retrieved from <https://doi.org/10.15407/polymerj.38.01.003>
8. Svistsilnik, R., & Fedoriv, T. (2023). The influence of polymer matrices on the electrical properties of composite coatings. *Technologies and Engineering*, (5), 115-122. Retrieved from <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.10>
9. Butenko, O., Chernysh, O., Kubay, Y. O., Khomenko, V., Barsukov, V., & Kuryptya, Y. A. (2022). Application of graphites in conductive polymer composites. *Technologies and Engineering*, (6), 72-81. Retrieved from <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.6.7>

10. Lyashenko, Y. O., Liashenko, O. Y., & Morozovich, V. V. (2019). New approach to effective diffusion coefficient evaluation in the nanostructured two-phase media. *Applied Nanoscience*, 9, 1025-1036. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0731-y>
11. Behbahani, A. F., Motlagh, G. H., Ziaee, M., & Nikravan, G. (2015). Electrical percolation behavior of carbon fiber and carbon nanotube polymer composite foams: Experimental and computational investigations. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(42). Retrieved from <https://doi.org/10.1002/app.42685>
12. Yat, C. H., Kiu, F. P., Him, L. S., Justin, L. K. C., Lam, T. S., & Man, C. (2021). Investigation on buffon-laplace needle problem. Retrieved from https://hlma.hanglung.com/getattachment/f46f7ae5-2afb-4df5-996b-5eedd47996a3/17-hm_wyk.pdf
13. Arnow, B. J. (1994). On Laplace's extension of the Buffon needle problem. *The College Mathematics Journal*, 25(1), 40-43. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/07468342.1994.11973580>

V. V. MOROZOVYCH

Lecturer of the Department of Physics,
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
vladmorozua@gmail.com

D. I. KOLOMIETS

Lecturer of the Department of Physics,
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
denyskolomiiets95@gmail.com

A. R. HONDA

PhD-student,
Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine
andriy.gonda@vu.cdu.edu.ua

YU. O. LYASHENKO

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
Educational-Scientific Institute of Informational and Educational Technologies
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
lyashenko.yurij@gmail.com

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND THERMAL CONDUCTIVE PROPERTIES OF COMPOSITE HEATING ELEMENTS WITH FLAT ELECTRODES

DOI: 10.31651/2076-5851-2024-46-57

PACS: 44.10.+i, 81.05.Mh, 62.25.De,
72.80.Tm, 81.05.Uf

The paper describes the manufacturing method and design of sandwich-like composite electric heating elements with flat electrodes based on synthetic polyurethane adhesives. Heating of the composite elements occurs through the thickness between the flat electrodes, to

which electric voltage is supplied at locations protected from mechanical damage. This design ensures maximum durability of the heating elements against multiple penetrating damages.

To fabricate a sandwich-like composite structure resistant to mechanical damage, the following aspects were optimized: the type of flat electrodes (material and design features); the structure of intermediate layers to control the thickness of the heating element; and the composition and properties of the electrically conductive composite made from graphite and metal powders. Materials for the powders (copper and graphite), particle sizes, their ratios, and the mass fraction of the conductive composition in the polyurethane adhesive-based matrix with reinforcing synthetic layers were selected.

The main requirements for composite heating elements based on synthetic adhesives include: the ability to bond all flat components and intermediate layers; suitable electrical conductivity to ensure heating from a battery-type power source (12 V) up to about 40°C; uniform thickness of the heating elements, which determines the homogeneity of the generated thermal profile; and sufficient mechanical strength.

The developed composite sandwich heating elements powered by battery-type sources demonstrate the following technical characteristics: nominal supply voltage of 12 V, specific electrical power of 300–400 W/m², and a heating time to the working temperature (up to 40°C) of no more than 15 minutes (at an ambient temperature of 15°C).

Keywords: electrical conductivity, thermal conductivity, copper powder, graphite powder, composite materials, electric heating element.

Одержано редакцією 14.07.2024

Прийнято до друку 03.09.2024