

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.6.7>

УДК 541.136

БУТЕНКО О. О., ЧЕРНИШ О. В., КУБАЙ Ю. О.,
ХОМЕНКО В. Г., БАРСУКОВ В. З., КУРИПТЯ Я. А.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІТІВ В ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТАХ

Мета: Дослідження впливу фізичних властивостей природних графітів на електропровідність полімерних покриттів.

Методика: Геометричні параметри частинок різнодисперсних графітів вивчалися методами оптичної та електронної мікроскопії. Зміна просторової електропровідності графітових порошків під дією зовнішнього навантаження визначалася за допомогою спеціально виготовленої комірки. З урахуванням анізотропних фізичних властивостей кристалів графіту при виготовленні композитів у полімерне зв'язувальне додавався диспергований технічний вуглець. Диспергування здійснювалось за допомогою ультразвуку в спиртовому середовищі. Як зв'язувальне дисперсних компонентів використовувався 10%-ий розчин полівінілбутиралу в етанолі. Товщина композиту на твердій поверхні задавалася за допомогою аплікатора. Поверхнева електропровідність фіксувалася чотирьохелектродним методом.

Результати: Досліджена залежність поверхневої електропровідності полімерних композитів від розмірів, форми та полідисперсності частинок графіту. При отриманні полімерних покриттів на основі графіту лакофарбовим методом виникає суттєва орієнтація двохвимірних частинок мінералу, що суттєво впливає на просторову електропровідність композита. Фактором, який обмежує електропровідність полімерних покриттів на основі крупнодисперсних графітів, є мікропори і дрібні тріщини, обумовлені низьким ущільненням таких частинок і великим об'ємом етанолу в 10%-му розчині полімерного зв'язувального. Ультразвук за певних умов приводить до розширювання частинок графіту, що сприяє підвищенню електропровідності композитних покриттів.

Наукова новизна: Установлено, що зі збільшенням розмірів і зменшенням полідисперсності частинок лускатого графіту поверхнева електропровідність полімерного покриття зростає. Додавання до композиту дисперсних вуглецевих чи неорганічних добавок знижує дану електропровідність.

Практичне значення: Зростання поверхневої електропровідності полімерних композитів у екрануючих пристроях сприяє ефективності захисту людини та електроніки від негативного впливу електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: графіт; композит; електропровідність; частинка; дисперсність; полімерне зв'язувальне; технічний вуглець.

Вступ. Графіт – унікальний природний матеріал, який знаходить широке застосування у техніці та повсякденному житті людини. Завдяки високій електропровідності, хімічній стійкості та низькій густині він здатен конкурувати з металами. Здатність графіту інтеркалювати літій зробила його незамінним при виготовленні літій-іонних акумуляторів [1, 2]. Останнім часом полімерні композити на основі цього матеріалу все ширше використовують як екрани, що захищають людину та електроніку від негативного впливу електромагнітного випромінювання [3–5].

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження впливу фізичних властивостей природних графітів на електропровідність полімерних покриттів.

При практичному застосуванні графіту необхідно враховувати специфічні фізичні властивості його кристалів [6, 7]. Їх шарувата будова обумовлює близьку до металів електропровідність вздовж графенових шарів і в сотні разів меншу перпендикулярно до них. Оскільки в полімерному зв'язувальному частинки цього дисперсного мінералу орієнтовані досить хаотично, для електричного з'єднання графенових шарів частинок графіту до композиту додають дрібнодисперсний технічний вуглець з ізотропними фізичними

властивостями. При роботі з композитами на основі графітів слід мати на увазі, що на контакт між частинками може впливати температура, оскільки теплове розширення вздовж базисних площин до 427 °С негативне (графіт стискається), а в перпендикулярному напрямку позитивне (він суттєво розширюється) [8].

При виготовленні виробів на основі графіту необхідно враховувати геометричні параметри та чистоту його частинок. Так при синтезі алмазів використовують надчистий крупнодисперсний графіт, а при виготовленні електродів літій-іонних акумуляторів – чистий, але дрібнодисперсний графіт, який сприяє швидкій зарядці акумуляторів і практично не приводить до анізотропії фізичних властивостей електродів. Що стосується захисних екранів, то на їх ефективність у значній мірі впливає поверхнева електропровідність використаного для їх виготовлення матеріалу. У роботі досліджувалась поверхнева електропровідність композитів на основі різних марок графітів вітчизняного та іноземного виробництва.

Результати дослідження. За формою частинок графіти ПАТ Заваллівського комбінату (Україна) відносяться до лускатого типу (рис. 1).

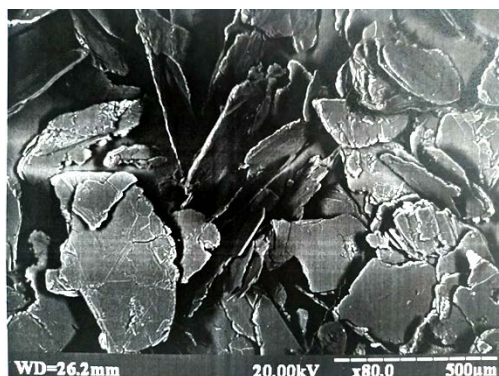


Рис. 1. Частинки крупнодисперсного заваллівського графіту

З промислових марок графітів цього комбінату для дослідження були відібрані зразки, що відрізняються між собою фізичними параметрами: ГСМ-1 – графіт спеціальний малозольний (для синтезу алмазів), ГАКи – графіти для виготовлення активних мас лужних акумуляторів, ГЛ-1 – графіт кристалічний ливарний, ЕУЗ-М – графіт для виготовлення електровуглецевих виробів, КГП С-1 – колоїдно-графітовий препарат. Дрібнодисперсні марки графітів (ЕУЗ-М, КГП) одержують шляхом механічного диспергування акумуляторних. До найчистіших відноситься графіт ГСМ-1, а максимальну зольність має графіт ГЛ-1. Призматичні грані кристалів частково окислені. Співвідношення кисневих груп –COOH, -OH, -O-O-, $-\text{C} \begin{smallmatrix} \nearrow \text{O} \\ \searrow \end{smallmatrix}$ 12:4:1:2 [3]. Графіт здатен адсорбувати водень, вуглецеві гази, метан, воду. Досліджені графіти відрізняються між собою розміром частинок та вмістом домішок (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристика заваллівських графітів

Марка графіту	ГСМ-1	ГАК-2	ГАК-1	ГАК-00	ГЛ-1	ЕУЗ-М	КГП С-1
Характеристика							
Середній розмір частинок, мкм	280	260	132	128	123	28	8,5
Насипна густина, г/см ³	0,483	0,480	0,407	0,419	0,518	0,278	0,133
Зольність, %	0,1	0,5	0,5	0,5	13	0,5	0,7

Зі зменшенням розмірів частинок насипна густина графіту знижується. Оскільки полідисперсність частинок також впливає на щільність їхньої упаковки, для графітів із близьким середнім розміром частинок побудовано диференціальні криві розподілу за розмірами (рис. 2).

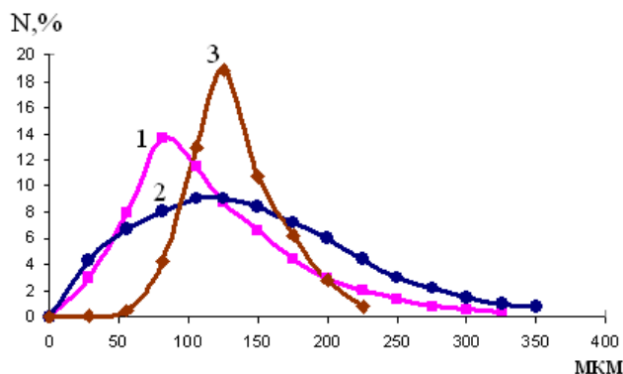


Рис. 2. Криві розподілу за розмірами частинок графітів з близькими значеннями їх середніх розмірів (1 – ГЛ-1; 2 – ГАК-00; 3 – ГАК-1)

Очевидно, що при виготовленні полімерних композитів методами пресування, екструзії або лакофарбовим методом зовнішні сили здатні ущільнювати порошки та призводити до орієнтації плоских частинок графіту. Під дією зовнішнього навантаження $0,5 \text{ кгс/см}^2$ пористість грубодисперсного графіту ГАК-1 зменшилася з $70,6\% \leftrightarrow$ до $72,5\%$, а графіту ЕУЗ-М з $85,4\%$ до $68,5\%$. При тиску $5,5 \text{ кгс/см}^2$ пористість ГАК-1 знизилася до $47,5\%$, а ЕУЗ-М лише до 68% .

За допомогою спеціальної комірки вимірювався опір графітових порошків при їхньому одновісному пресуванні. Типова залежність зміни електропровідності графіту під дією прикладеної сили наведена на рис. 3.

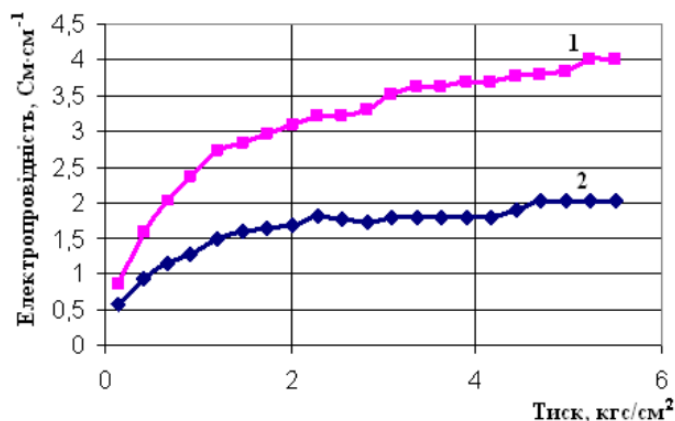


Рис. 3. Графік залежності електропровідності графіту ГАК-1 від тиску (1 – перпендикулярно дії сили; 2 – у напрямку дії сили)

Вже при мінімальному навантаженні ($0,15 \text{ кгс/см}^2$) фіксується різна електропровідність у двох взаємоперпендикулярних напрямках. З підвищенням тиску ця різниця збільшується і може досягати 1,5–2 рази. Найбільш швидко електропровідність підвищується зі збільшенням тиску до 1 кгс/см^2 . Після зняття навантаження релаксаційних процесів у зразку не зафіксовано. Ймовірно, що в цьому інтервалі тиску відбувається ущільнення зразка за рахунок переміщення та орієнтації частинок графіту. При подальшому підвищенні тиску поруч із пластичною деформацією починає проявлятися пружна, свідченням якої може бути різке підвищення

електричного опору (до $\sim 10\%$) після зняття навантаження. При тисках більше 5 кгс/см^2 електропровідність майже не змінюється. Різна електропровідність у двох взаємоперпендикулярних напрямках, очевидно, пов'язана з орієнтацією плоских частинок графіту. Електропровідність серії досліджених графітів при тиску $5,5 \text{ кгс/см}^2$ наведена у таблиці 2.

Таблиця 2

Електропровідність досліджуваних графітів при навантаженні $5,5 \text{ кгс/см}^2$

Марка графіту	ГСМ-1	ГАС-1	ГАС-00	ГЛ-1	ЕУЗ-М
Характеристика					
Електропровідність, См/см вздовж дії сили	2,273	2,036	2,188	1,945	2,216
Електропровідність, См/см перпендикулярно дії сили	4,276	4,028	3,840	3,552	3,750

Виходячи з таблиць 1 та 2 можна зробити висновок про те, що електропровідність порошків графіту в напрямку перпендикулярному дії прикладеної сили підвищується зі збільшенням розмірів частинок. Полідисперсність частинок знижує електропровідність порошків. Не дивлячись на високу зольність (13%), грубодисперсний графіт ГЛ-1 має достатньо високу електропровідність.

Безумовно, що використання діелектричного полімерного зв'язувального значно знижує електропровідність графітових порошків. Від природи зв'язувального залежить характер взаємодії макромолекул з вуглецевими частинками. Визначені пороги перколяції графітів з різним розміром частинок з використанням як зв'язувального полівінілбутиралу: КГП С-1 – 32 мас.%; ЕУЗ-М – 38 мас.%; ГАС-1 – 51 мас.%. Зі збільшенням розмірів частинок поріг перколяції суттєво зміщується в бік більших концентрацій графіту. В експериментах за базовий був вибраний склад композита, який вже знайшов практичне застосування [9]: графіт КГП С-1 – 60%; технічний вуглець РВ – 20%; 10% спиртовий розчин полівінілбутиралу – 20% (по сухому залишку).

За наведеним співвідношенням компонентів виготовлені та досліджені зразки покриттів з різними графітами (табл. 3).

Таблиця 3

Властивості покриттів на основі заваллівських графітів

Марка графіту	ГАС-2	ГАС-1	ЕУЗ-М	КГП-С1
Характеристика				
Електропровідність, См/см	2,0	1,67	0,53	0,26
Густина, г/см^3	0,516	0,541	0,680	0,714

Як і очікувалось, електропровідність покриттів на основі заваллівських графітів зростає зі збільшенням розмірів графітових частинок.

Привертає увагу той факт, що густина композитів збільшується з підвищенням дисперсності графітів, але вона значно менша густини їх компонентів. Про наявність у покриттях поверхневих тріщин та внутрішніх порожнин свідчать результати мікроскопічних досліджень (рис. 4) та деяка різниця електропровідностей на різних ділянках поверхні покриттів. Вірогідно, що на утворення таких дефектів впливає недостатня щільність упаковки частинок і надто великий об'єм спирту в полімерному розчині (90 мас.%).

Спроба ущільнення композиту за рахунок часткового заміщення графіту ГАС-1 на дрібнодисперсні марки лише трохи підвищує щільність, але істотно знижує електропровідність композиту (табл. 4).

Ймовірно, що дрібнодисперсна добавка частково заповнює пустоти між частинками графіту ГАК-1, але зменшує його вклад в електропровідність композиту і збільшує кількість прошарків полімеру між частинками.

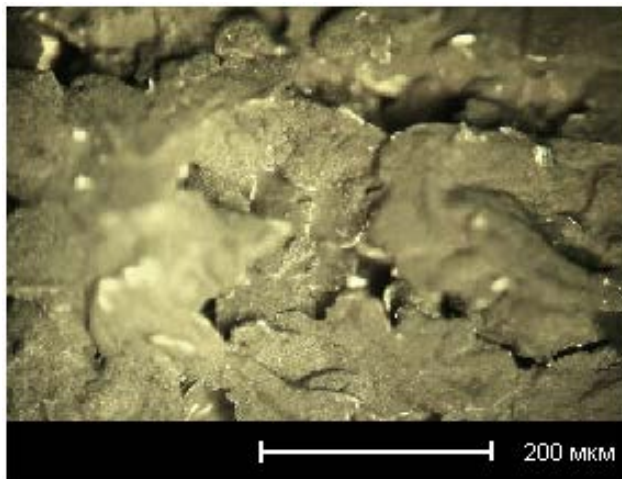


Рис. 4. Мікрофотографія поверхні композитів на основі заваллівських графітів ГАК-1

Таблиця 4

Властивості покриттів на основі сумішей графітів

Вміст графітів, % Характеристика	ГАК-1, 60	ГАК-1, 55 ЕУЗ-М, 5	ГАК-1, 55 КГП С-1, 5	ГАК-1, 55 ABG*, 5	ГАК-1, 50 ABG, 10	ГАК-1, 50 ЕУЗ-М, 5 ABG, 15
Густина, г/см ³	0,541	0,550	0,563	0,580	0,551	0,560
Електро- провідність, См·см ⁻¹	1,67	0,55	0,57	1,56	1,47	0,7

*ABG-1005 – графіт фірми Superior Graphite Co з середнім розміром частинок 9,8 мкм.

Часткова заміна графіту на теоретично високопровідні наноматеріали ще в більшій мірі негативно відобразилась на електропровідності покриттів і призвела до значного зниження їх густини (табл. 5).

Таблиця 5

Властивості покриттів з частковою заміною графіту ГАК-1 на нановуглецеві матеріали

Вміст наноматеріалу, %	Базовий склад	Вуглецеві нанотрубки Baytubes C150P, 10	Графен Sinocarbon G100-Н, 2,22	Графен G250-Н, 2,22	Графен cGnp-C-750, 10
Електропровідність, См/см	1,67	0,20	0,41	0,3	0,28
Густина, г/см ³	0,541	0,263	0,398	0,372	0,411

Безумовно, що на властивості композиту впливає зольність, ступінь окислення, розмір вуглецевих наночастинок (відомо, що навіть метали з розміром частинок менше ніж 50 нм відносяться до напівпровідників). Але отримані результати, на наш погляд, в значній мірі пов'язані з насипною густиною цих компонентів (табл. 6).

Таблиця 6

Насипна густина досліджених нановуглецевих матеріалів

Нановуглецевий матеріал	Вуглецеві нанотрубки C150P	Графен Sinocarbon G100-H	Графен G250-H	Графен cGnp-C-750
Насипна густина, г/см ³	0,087	0,00241	0,00376	0,204

Навіть незначна добавка у вихідний композит такої високодисперсної речовини суттєво збільшує його в'язкість. Для одержання робочої в'язкості у композит додають значний об'єм розчинника, що призводить до зниження густини покриття.

Спроба заповнити хоча б поверхневі пустоти та тріщини розбавленою суспензією високодисперсних вуглецевих матеріалів навіть з використанням вакууму виявилася безрезультатною. Розбавлені розчини композитів на основі дрібнодисперсних графітів (КГП С-1, АВГ-1005) утворюють на поверхні дефектного покриття суцільну плівку, яка закупорює пустоти, а суспензії технічного вуглецю і графенів після висихання розтріскуються.

Наявність гідроксильних груп в молекулах полівінілбутиралу та спирту подавало надію, що доданий в композит аеросил в деякій мірі проявить свої тиксотропні властивості, таким чином зможе сприяти утворенню об'ємної електропровідної системи з вуглецевих частинок. Проте ефект від використання аеросилу виявився незначним і лише при концентраціях 0,5–1,0% (електропровідність збільшилася на 9–7%).

Зменшенню розмірів пустот в композиті, на наш погляд, може сприяти попереднє розщеплення частинок графіту вздовж базисних площин. До того ж розщеплені частинки краще орієнтуються під дією аплікатора. Найпростіший спосіб такого розщеплення – використання фарботерки, яка у випадку графіту використовує «ефект олівця». До того ж фарботерка виключає наявність у вихідному композиті випадкових великих трьохвимірних частинок, які можуть призводити до формування дефектів на покриттях. Дійсно, пропускання графіту ГАК-1 через зазор 50 мкм сприяло підвищенню електропровідності покриття на 43%, а пропускання через зазор 25 мкм – на 56%.

Значно більш трудомістким, але перспективним є розшаровування великих частинок графіту за допомогою ультразвуку, який до того ж сприяє десорбції адсорбованих з поверхні частинок речовин. Проте, слід мати на увазі, що під дією ультразвуку може виникати і руйнування графенових шарів. На практиці застосування ультразвуку сприяє одержанню позитивних результатів. Композит з графітом ГАК-1, попередньо обробленим ультразвуком, мав електропровідність на 37% вищу в порівнянні з вихідним графітом.

Відомо, що бездефектні покриття отримують шляхом нанесення тонких шарів композиту. В експерименті зазор аплікатора був зменшений в 3 рази. Електропровідність першого шару виявилася досить низькою (0,029 См/см), що вірогідно пов'язано і з суттєвою неоднорідністю шару по товщині. Нанесення другого шару привело до згладжування поверхневого рельєфу покриття і підвищення електропровідності до 0,714 См/см. Цей показник у 3-х шарових покриттях досяг 2,778 См/см, що на 46% більше у порівнянні з покриттям, сформованим за стандартною технологією.

Виходячи з того, що вуглецеві компоненти мають різну електропровідність і їх розмір впливає на щільність упаковки в композиті, були виготовлені та досліджені зразки з різними співвідношеннями вуглецевих компонентів (табл. 7).

Зменшення технічного вуглецю у базовому зразку на 5%, ймовірно, сприяло підвищенню ефективності графіту і призвело до зменшення контактної опору між його частинками. Така зміна концентрацій практично не відбилася на адгезійних властивостях покриття, які були оцінені стандартним методом (ASTMD 3359-02).

Таблиця 7

Залежність електропровідності композиту від співвідношення графіту та технічного вуглецю

Склад, %	ГAK-1, 60 PB, 20 ПВБ, 20	ГAK-1, 50 PB, 25 ПВБ, 25	ГAK-1, 40 PB, 30 ПВБ, 30	ГAK-1, 70 PB, 15 ПВБ, 15	КГП-С1, 60 PB, 20 ПВБ, 20	КГП-С1, 70 PB, 15 ПВБ, 15
Електро- провідність, См/см	1,67	1,43	0,71	2,5	0,31	0,48

При вивченні властивостей малозольних графітів іноземних фірм виявилося, що пряма залежність поверхневої електропровідності композитів від розміру частинок не завжди зберігається. Так, композити на основі графіту АВG-1005 (середній розмір частинок 9,8 мкм) мають більш високу електропровідність (~2,5 рази) у порівнянні з композитами на основі графіту ЕУЗ-М (розмір частинок 28 мкм). Водночас графіт SLA-1025 з розміром частинок 16,8 мкм більш ніж у 3 рази поступається дрібнодисперсному графіту КГП С-1, середній розмір частинок якого 9,5 мкм. Особливістю графіту SLA-1025 є заокруглена форма частинок. Ймовірно, що в процесі надання такої форми було деформовано призматичні грані кристалів. Відомо, що деформація графенових шарів підвищує їхню активність по відношенню до кисню та адсорбції низькомолекулярних речовин, що призводить до зниження електропровідності графітового матеріалу. Графіт АВG-1005 одержують шляхом неповного диспергування терморозширеного графіту. Його частинки є комплексами з'єднаних між собою хімічними зв'язками графенових шарів. Електропровідність композиту на основі цього графіту (0,385 См/см) перевищує цей показник базового зразка (0,262 См/см). Високу електропровідність мають композити на основі вихідних терморозширених графітів, одержаних методом екструзії [10].

На жаль, використовувати в лакофарбовій технології безпосередньо вихідний терморозширений графіт, виявилося практично не можливо через його агломерацію вже при приготуванні композиту.

Висновки. Зі збільшенням розмірів частинок лускатого графіту поверхнева електропровідність полімерних композитів збільшується. Будь-яка за природою дрібнодисперсна добавка до нього знижує електропровідність покриття. Полідисперсність частинок графіту негативно впливає на електропровідність композитів. Розшарування частинок грубодисперсного графіту за допомогою фарботерки чи ультразвуку сприяє підвищенню електропровідності композиту. Електропровідність покриттів з крупнодисперсними графітами з великою зольністю (ГЛ-1 – 13%, ГТ-1 – 7%) перевершує цей параметр покриттів на основі малозольного (0,7%) дрібнодисперсного графіту КГП С-1. Поруватість покриття залежить від розмірів частинок графіту і об'єму розчинника полімерного зв'язувального у вихідній суміші компонентів. Поруватість зменшується, а електропровідність зростає при одержанні покриття методом нанесення тонких шарів композиту. Об'єм розчинника у вихідному композиті можливо зменшити за рахунок оптимізації складу його компонентів і використання полімеру з меншою молекулярною масою.

Результати проведених досліджень дають можливість припустити, що подальшому підвищенню електропровідності полімерних композитів можуть сприяти: диспергування ультразвуком до певних розмірів частинок «вспучені» термоударом графіти; попередня термічна очистка графітів у вакуумі (чи в середовищі інертного газу) вихідних вуглецевих компонентів.

Подяка. Автори вдячні МОН України (держбюджетна тема 16.04.74 ДБ) та програмі НАТО «Наука заради миру» за фінансову підтримку досліджень в рамках проєкту SpS G5477.

References

1. Nahirna N.I., Mandziuk V.I. (2014). Elektrokhimichna interkaliatsiia yoniv litiu v nanoporystyi vuhletsevyi material [Electrochemical intercalation of lithium ions in nanoporous carbon material.] Visnyk Prykarpatskoho natsionalnoho universytetu imeni Vasylia Stefanyka Serii : Khimiia = Bulletin of Vasyl Stefanyk Prykarpattia National University. Series: Chemistry, 18: 69-81 [in Ukrainian].
2. Gang Wang, Minghao Yu and Xinliang Feng. (2021). Carbon materials for ion-intercalation involved rechargeable battery technologies. Chem. Soc. Rev. 50: 2388-2443
3. Bannyi V.A., Yhnatenko V.A., Azerenok A.S., Evtukhova L.A. (2018). Sovremennye materiali i sposobi zashchiti biologicheskikh obektov ot vozdviistviya elektromagnitnykh polei i izlucheni [Modern materials and methods for protecting biological objects from the effects of electromagnetic fields and radiation] Problemi zdorovya i ekologii = Problems of health and ecology, 2: 4-10 [in Russian].
4. Sarika Singh and Neeru Kapoor. (2014). Health Implications of Electromagnetic Fields, Mechanisms of Action, and Research Needs. Hindawi Publishing Corporation Advances in Biology, 24 pages
5. Sumana Bhattacharjee. (2014). Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. Advance in Electronic and Electric Engineering. 4(4): 375-380
6. Chernish I.G., Karpov I.I., Prikhodko G.P., Shai V.M. (1990). Fiziko-khimicheskie svoistva grafita i yego soedinenii [Physical and chemical properties of graphite and its compounds] Kiev: Nauk. Dumka = Kyiv: Nauk. opinion, 200 [in Russian].
7. Martin Cermak, Nicolas Perez, Michael Collins & Majid Bahrami. (2020). Material properties and structure of natural graphite sheet. Scientific Reports, 10: 18672.
8. Bibyk V.V., Hrychanovska T.M., Odnodvoret L.V., Shumakova N.I. (2010). Fyzyka tverdoho tila [Solid state physics]: navch. posib. Sumy: Vyd-vo SumDU = education manual Sumy: Publication of Sumy State University, 200 [in Ukrainian].
9. Barsukov V.Z., Senyk I.V., Khomenko V.H. Kompozytsiia dlia formuvannia kompozytsiinoho materialu dlia zakhystu vid elektromahnitnoho vyprominiuvannia ta sposib oderzhannia kompozytsiinoho materialu na substrati: pat. [A composition for forming a composite material for protection against electromagnetic radiation and a method of obtaining a composite material on a substrate: patent] UA117949C2; Biul.№20. opubl. 25.10.2018 [in Ukrainian].

Література

1. Нагірна Н.І., Мандзюк В.І. Електрохімічна інтеркаляція йонів літію в нанопористий вуглецевий матеріал. Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія : Хімія. 2014. Вип. 18. С. 69-81.
2. Gang Wang, Minghao Yu and Xinliang Feng. Carbon materials for ion-intercalation involved rechargeable battery technologies. Chem. Soc. Rev., 2021, 50, 2388-2443
3. Банный В.А., Игнатенко В.А., Азеренок А.С., Евтухова Л.А. Современные материалы и способы защиты биологических объектов от воздействия электромагнитных полей и излучений. Проблемы здоровья и экологии, 2018, Т.2, С.4-10.
4. Sarika Singh and Neeru Kapoor. Health Implications of Electromagnetic Fields, Mechanisms of Action, and Research Needs. Hindawi Publishing Corporation Advances in Biology, Volume 2014, 24 pages
5. Sumana Bhattacharjee. Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. Advance in Electronic and Electric Engineering. V. 4, No. 4, 2014, p. 375-380
6. Черныш И.Г., Карпов И.И., Приходько Г.П., Шай В.М. Физико-химические свойства графита и его соединений. Киев: Наук. думка, 1990. 200 с.
7. Martin Cermak, Nicolas Perez, Michael Collins & Majid Bahrami. Material properties and structure of natural graphite sheet. Scientific Reports, 2020, 10, 18672.
8. Бібик В.В., Гричановська Т.М., Однодворець Л.В., Шумакова Н.І. Фізика твердого тіла: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДУ, 2010. 200 с.
9. Барсуков В.З., Сеник І.В., Хоменко В.Г. Композиція для формування композиційного матеріалу для захисту від електромагнітного випромінювання та спосіб одержання композиційного матеріалу на субстраті: пат. UA117949C2; Бюл.№20. опубл. 25.10.2018.
10. Вовченко Л.Л. Вплив структурно-морфологічного стану нановуглецевого компонента на теплові та електрофізичні властивості вуглецевих композитів. Київ, дисертація... 2015, 376 с.

10. Vovchenko L.L. (2015). Vplyv strukturno-morfolohichnoho stanu nanovuhletsevoho komponenta na teplovi ta elektrofizychni vlastyvyosti vuhletsevykh kompozytiv [The influence of the structural and morphological state of the nanocarbon component on the thermal and electrophysical properties of carbon composites], Kyiv, dysertatsiia, 376 [in Ukrainian].

BUTENKO OKSANA

PhD, Associate Professor,
Department of Electrochemical Power Engineering and
Chemistry, Kyiv National University of Technologies and
Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-4513-3355>
Scopus Author ID: 57207988484
ResearcherID: AAH-4024-2019
E-mail: butenko.oo@knuud.com.ua

KUBAI YULIIA

Student of the Department of Electrochemical Power
Engineering and Chemistry, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
E-mail: kruglichok.ulichka@gmail.com

BARSUKOV VIACHESLAV

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of
Department of Electrochemical Power Engineering
and Chemistry, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3041-2474>
Scopus Author ID: 8590938100
ResearcherID: O-6308-2017
E-mail: barsukov.vz@knuud.com.ua

CHERNYSH OKSANA

Candidate of Engineering Sciences, Senior Research
Officer, Department of Electrochemical Power
Engineering and Chemistry, Kyiv National University of
Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-9402-1595>
Scopus Author ID: 57210980450
E-mail: chernish.ov@knuud.edu.ua

KHOMENKO VOLODYMYR

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Department of Electrochemical Power Engineering
and Chemistry, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>
Scopus Author ID: 7004402598
ResearcherID: X-2214-2018
E-mail: v.khomenko@i.ua

KURYPTIA YAROSLAV

Candidate of Engineering Sciences, Senior Research
Officer, Department of Electrochemical
Power Engineering and Chemistry, Kyiv National
University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6181-644X>
Scopus Author ID: 57192820834
ResearcherID: AAJ-7175-2021
E-mail: yarik_lg@ukr.net

**BUTENKO O. O., CHERNYSH O. V., KUBAY Yu. O.,
KHOMENKO V. G., BARSUKOV V. Z., KURYPTIA Ya. A.**

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**APPLICATION OF GRAPHITES IN ELECTRICALLY
CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES**

Purpose: Study of the influence of the physical properties of natural graphites on the electrical conductivity of polymer coatings.

Methodology: The geometrical parameters of particles of different-dispersed graphites were studied by optical and electron microscopy. The change in the spatial electrical conductivity of graphite powders under the action of an external load was determined using a specially made cell. Taking into account the anisotropic physical properties of graphite crystals, dispersed carbon black was added to the polymer binder during the manufacture of composites. Dispersion was carried out using ultrasound in an alcohol medium. A 10% solution of polyvinyl butyral in ethanol was used as a binder for dispersed components. The thickness of the composite on a solid surface was set using an applicator. The surface electrical conductivity was recorded by the four-electrode method.

Findings: The dependence of the surface electrical conductivity of polymer composites on the size, shape and polydispersity of graphite particles was studied. When obtaining polymer coatings based on graphite by the paint and varnish method, a significant orientation of two-dimensional mineral particles occurs, which has a significant effect on the spatial electrical conductivity of the composite. The factor limiting the electrical conductivity of polymer coatings based on coarse graphite is micropores and small cracks due to low compaction of such particles and a large volume of ethanol in a 10% polymer binder solution. Ultrasound under certain conditions leads to delamination of graphite particles, which contributes to an increase in the electrical conductivity of composite coatings.

Scientific novelty: It has been established that with an increase in the size and a decrease in the polydispersity of particles of flake graphite, the surface electrical conductivity of the polymer coating increases. Adding a composite of dispersed carbon or inorganic additives reduces this electrical conductivity.

Practical value: The increase in the surface electrical conductivity of polymer composites in shielding devices contributes to the effectiveness of protecting humans and electronics from the negative effects of electromagnetic radiation.

Keywords: graphite; composite; electrical conductivity; slice; dispersion; polymer binder; carbon black.