

УДК 691.175.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/39>**Лебедєв В.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Кривобок Р.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Черкашина Г.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Близнюк О.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Лісачук Г.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Волощук В.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА ТА ОДЕРЖАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ПОГЛИНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У статті показані дослідження щодо розроблення полімерних композитів для поглинання електромагнітного випромінювання. Проведено глибокий літературний огляд з питань одержання сучасних матеріалів та композитів для створення ефективних матеріалів для поглинання електромагнітного випромінювання. На основі літературного огляду встановлено, що найбільш ефективні широкодіапазонні полімерні композити для поглинання електромагнітного випромінювання зазвичай містять змішані наповнювачі, які забезпечують різні механізми втрат електромагнітної енергії. Переваги термопластичних полімерних композитів для поглинання електромагнітного випромінювання полягає у поєднанні високої хімічної стійкості, задовільних механічних властивостей із технологічністю переробки та низькою вартістю. В роботі досліджені полімерні композитні матеріали на основі полімерної матриці у вигляді поліаміду 6 та карбиду кремнію SiC, які були отримані шляхом екструдювання попередньо підготовленої сировини в одно шнековому лабораторному екструдері. В результаті проведених досліджень встановлено, що оптимальними вмістом карбиду кремнію в розроблених полімерних композитах з точки зору їх міцностних характеристик є 5 % мас. В рамках дослідження розроблених полімерних композитів на автоматизованому скалярному аналізаторі спектру P2-65 у діапазоні частот 26–37,5 ГГц визначено, що їх спектр коефіцієнта передачі T є відносно однаковий у всьому діапазоні частот, а отримані значення SWR вказують на досить великий коефіцієнт відбиття Γ для розроблених полімерних композитів. Відмічено, що розрахований коефіцієнт відбиття Γ полімерних композитів на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбід кремнію вказує на досить високе значення діелектричної проникності, при цьому її значення та значення тангенсу діелектричних втрат можна отримати при вимірюванні на аджіленті, але для цього треба дослідити зразки більшої товщини.

Ключові слова: полімерні композити, поглинання, електромагнітне випромінювання, поліамід, карбід кремнію.

Постановка проблеми. Важливе значення у сучасному полімерному матеріалознавстві займають полімерні композити для поглинання електромагнітного випромінювання [1]. Широку область застосування таких полімерних композитів впродовж багатьох років викликали значний інтерес для них застосування у технологіях Стелс, гамма композиційних матеріалів, комуні-

кації та обробки інформації [2]. Найбільш перспективними за технологічними, експлуатаційними та економічними критеріями є полімерні композити для поглинання електромагнітного випромінювання на основі термопластичних матриць з додаванням неорганічних наповнювачів. Такі матеріали не тільки поєднують властивості компонентів, які входять до них, але

й набувають нових властивостей, які не притаманні окремим компонентам.

Достатньо перспективним виглядає створення полімерних композитів для поглинання електромагнітного випромінювання на основі термопластичних матриць та карбіду кремнію, який характеризується унікальними властивостями з точки зору поглинання різнотипного електромагнітного випромінювання. Однак на сьогодні немає будь яких даних стосовно використання матеріалів для поглинання електромагнітного випромінювання саме на основі термопластичних матриць та карбіду кремнію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з літературними даними, типовими матеріалами для поглинання електромагнітного випромінювання є [3]:

1) електропровідні порошкоподібні матеріали (вугілля, сажа, графіт, метали – сталь, чавун, залізо, алюміній, кобальт, свинець, цинк, олово, мідь та ін., солі металів) зі сферичною, циліндричною, лускатою та ін. формою частинок;

2) провідні вуглецеві, металеві та металовуглецеві волокна, вуглетканини, металеві нитки, пластинки, смужки фольги, обрізки дроту, сітки складної форми, решітки, резонансні елементи у вигляді хрестоподібних диполів або замкнених провідників (кілець) та ін. [4, 5, 6];

3) металізовані вуглецеві та полімерні волокна, тканини, плівки та макросфери;

4) магнітні наповнювачі – ферити різного хімічного складу (переважно магнітно-м'які), а також магнітні порошки металів та аморфних сплавів Fe, сплави Fe-Co-Ni; пермалою та ін.);

5) дисперсні напівпровідники – оксиди, карбіди та сульфідні металів, карбід кремнію, сегнетокераміка, обвуглені кремнійорганічні тканини та волокна;

6) діелектрики, зокрема, легко поляризовані органічні речовини (солі ретинілу Шиффа), біополімери (хітін) і т.п.

В роботі [7] описано використання графену як речовини для поглинання електромагнітного випромінювання при одержанні матеріалів високо-ефективного ослаблення електромагнітних хвиль. Відмічаються важливість для забезпечення ефективного поглинання електромагнітного випромінювання за рахунок раціонального дизайну мікроструктури чистого графену та регулювання його хімічної взаємодії з полімерами, магнітними металами, феритами, керамікою та багатокомпонентними композитами [8]. Загалом графен викликав великий інтерес дослідників завдяки своїм

відмінним фізичним властивостям і унікальному потенціалу застосування для поглинання електромагнітних хвиль, однак обробка стабільного великомасштабного графену та магнітних частинок на провідній основі мікрометрової товщини є серйозною проблемою для досягнення високих втрат на відбиття та узгодження імпедансу між поглиначем і вільним простором [9].

Більш технологічними матеріалами для поглинання електромагнітного випромінювання є матриці на основі сумішей термопластів, порошоків фериту або карбонільного заліза [10, 11]. Такі суміші наносять на поверхню, що захищається пензлем або розбризкуванням у вигляді лакофарбового покриття або наклеюють у вигляді листів. Принципово нові можливості при створенні матеріалів для поглинання електромагнітного випромінювання відкриває порівняно новий клас речовин: сегнетомагнетики, сегнет – , антисегнетоїлі сегнетіелектричні – властивості яких поєднуються з феро-, антиферо– або феромагнітними властивостями і взаємопов'язані в деякому інтервалі температур в одній речовині. Наприклад, сьогодні-електрики мають дуже високу діелектричну проникність, яка зберігається аж до діапазону низькочастотного електромагнітного випромінювання. На сантиметрових хвилях у сегнетокераміці має місце діелектрична дисперсія, в результаті якої дійсна частина діелектричної проникності знижується до кількох сотень, а тангенс кута діелектричних втрат зазнає максимуму.

В ряді досліджень [12, 13] встановлено, що карбід кремнію є достатньо ефективним діелектричним поглиначем за рахунок його власної електричної дипольної поляризації, яка поєднується з можливістю експлуатації в жорстких робочих середовищах з високими характеристиками поглинання електромагнітного випромінювання завдяки його низькому тепловому розширенню, гарній стійкості до теплового удару, високій міцності та гарній хімічній інертності [14]. Крім того, модифікація поверхні карбіду кремнію іншими діелектричними або магнітними матеріалами може внести множинні поляризації та підвищити діелектричні властивості, щоб покращити характеристики поглинання електромагнітного випромінювання [15, 16].

Постановка завдання. Отже, метою статті є розробка та дослідження полімерних композитів для поглинання електромагнітного випромінювання на основі термопластичного поліаміду та карбіду кремнію.

Завдання статті:

– виявлення впливу модифікації карбідом кремнію на комплекс міцностних властивостей полімерних композитів на основі поліаміду,

– визначення ступеня поглинання електромагнітного випромінювання полімерними композитами на основі поліаміду та карбиду кремнію.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Полімерні композитні матеріали одержували на основі полімерної матриці у вигляді поліаміду 6 марки Durethane (Bayer, Німеччина), карбиду кремнію SiC з питомим об'ємним опором ρ_v , Ом·м, високим значенням температури топлення 2700 °С та температурним коефіцієнтом лінійного розширення $5-7 \alpha \cdot 10^6, K^{-1}$.

Полімерні композитні матеріали на основі термопластичного поліаміду та карбиду кремнію були отримані шляхом екструдювання попередньо підготовленої сировини в одно шнековому лабораторному екструдері при температурі 170–200 °С та швидкості обертання шнеку 30–100 об / хв.

Дослідження ударної в'язкості та руйнівної напруги при вигині зразків полімерних композитних матеріалів проводили на маятниковому копрі при температурі 20 °С згідно до ISO 180 та ISO 178, відповідно.

Вимірювання зразка на предмет коефіцієнта передачі T та коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі КСВН проводилося на автоматизованому скалярному аналізаторі спектру P2-65 у діапазоні частот 26–37,5 ГГц. Спектр оцифровувався та виводився на екран комп'ютера за допомогою програми LabVIEW фірми National Instruments. Зразок заповнював повністю переріз хвилеводу 7,2 x 3, 4 мм².

Первинні дослідження були направлені на вивчення впливу введення часток карбиду кремнію на комплекс міцностних властивостей композицій поліаміду 6 – табл. 1.

Таблиця 1

Вивчення впливу введення часток карбиду кремнію на комплекс міцностних властивостей композицій поліаміду 6

Карбід кремнію, % мас.	Ударна в'язкість, МПа	Руйнівна напруга при вигині, МПа
0	31	100
2.5	38.00	160.00
5.0	42.00	200.00
7.5	40.00	180.00

З результатів, наведених у таблиці 1 видно, що модифікація поліаміду 6 за допомогою карбиду кремнію дозволяє отримувати композитні

матеріали з високою міцністю, тоді як оптимальний вміст карбиду кремнію становить 5 % за масою.

Далі, в рамках дослідження розроблених полімерних композитів на автоматизованому скалярному аналізаторі спектру P2-65 у діапазоні частот 26–37,5 ГГц було визначено, що їх спектр коефіцієнта передачі T є відносно однаковий у всьому діапазоні частот, а отримані значення SWR вказують на досить великий коефіцієнт відбиття Γ для розроблених полімерних композитів. Отримані значення SWR полімерних композитів на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбиду кремнію вказують на їх досить великий коефіцієнт відбиття Γ (рис. 1), використовували формулу залежності коефіцієнта відбиття Γ від SWR. Далі визначали здатність одержаних полімерних композицій на ступінь поглинання електромагнітного випромінювання, при цьому значення коефіцієнта поглинання A наведено на рис. 2.

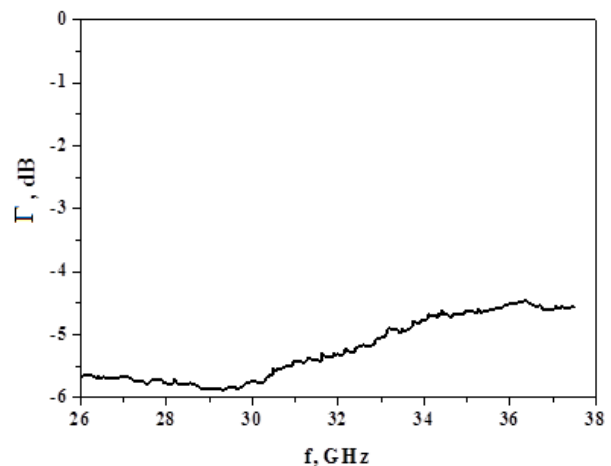


Рис. 1. Спектральна залежність розрахованого коефіцієнта відбиття Γ полімерних композитів на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбиду кремнію

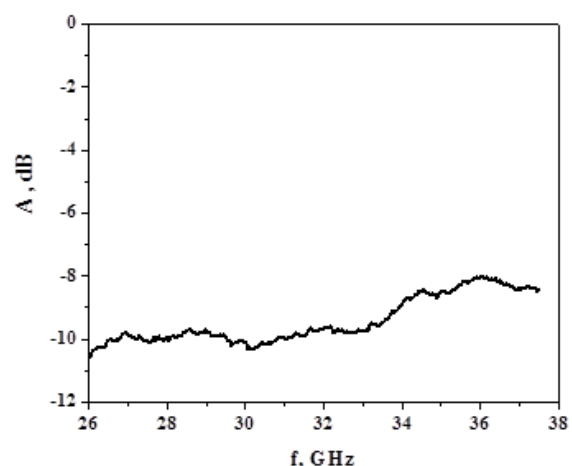


Рис. 2. Спектральна залежність розрахованого коефіцієнта поглинання A полімерних композитів на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбиду кремнію

В результаті отриманих експериментальних даних можна зробити висновок, що полімерні композити на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбїду кремнію є відносно прозорими у міліметровому діапазоні частот (приблизно 3 дБ, це ослаблення в 2 рази) та мають невелике значення коефіцієнта поглинання. Розрахований коефіцієнт відбиття Γ полімерних композитів на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбїду кремнію вказує на досить високе значення діелектричної проникності, при цьому її значення та значення тангенсу діелектричних втрат можна отримати при вимірюванні на аджіленті, але для цього треба виготовити зразок товщиною приблизно 5 мм.

Висновки. Таким чином, у наведеному дослідженні були одержані полімерні композити для поглинання електромагнітного випромінювання на основі поліаміду 6 та карбїду кремнію. Показано, що оптимальними вмістом карбїду кремнію в розроблених полімерних композитах з точки зору їх міцностних характеристик є 5 % мас. Відмічено, що розрахований коефіцієнт відбиття Γ полімерних композитів на основі поліаміду 6 та 5 % мас. карбїду кремнію вказує на досить високе значення діелектричної проникності, при цьому її значення та значення тангенсу діелектричних втрат можна отримати при вимірюванні на аджіленті, але для цього треба дослідити зразки більшої товщини.

Список літератури:

1. Tong X. Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding. Boca Raton.: CRC Press, 2009. 340 p.
2. Chen L., Ong C., Neo C., Varadan V., Varadan V. Microwave electronics: measurement and materials characterization. West Sussex.: John Wiley and Sons, 2005. 552 p.
3. Pozar D. Microwave engineering. New York.: John Wiley and Sons, 2005. 736 p.
4. Lebedev V., Mirosnichenko D., Xiaobin Z., Pyshyev S., Savchenko D. Technological Properties of Polymers Obtained from Humic Acids of Ukrainian Lignite. *Petroleum and Coal*. 2021. Vol. 63 (3). P. 646-654.
5. Lebedev V., Mirosnichenko D., Xiaobin Z., Pyshyev S., Savchenko D., Nikolaichuk Y. Use of Humic Acids from Low-Grade Metamorphism Coal for the Modification of Biofilms Based on Polyvinyl Alcohol. *Petroleum and Coal*. Vol. № 63 (4). P. 953-962.
6. Lv R., Kang F., Gu J., Gui X., Wei J., Wang K. Carbon nanotubes filled with ferromagnetic alloy nanowires: lightweight and wide-band microwave absorber. *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93. P. 223105
7. Menga F., Wanga H., Huang F., Guo Y., Wanga Z., Hui D., Zhou Z. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 137. P. 260-277.
8. Ayub S., Guan B., Ahmad F., Oluwatobi Y., Nisa Z., Javed M., Mosavi A. Graphene and Iron Reinforced Polymer Composite Electromagnetic Shielding Applications: A Review. *Polymers*. 2021. Vol. 13(15). P. 2580.
9. Li J., Lu W., Suhr J., Chen H., Xiao J., Chou T. Superb electromagnetic wave-absorbing composites based on large-scale graphene and carbon nanotube films. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 2349.
10. Li Y., Yang H.J., Yang W.G., Hou Z.L., Li J.B., Jin H.B., Yuan J., Cao M. Structure, ferromagnetism and microwave absorption properties of la substituted BiFeO₃ nanoparticles. *Materials Letters*. 2013. Vol. 111. P. 130-133.
11. Krenke T., Duman E., Acet M., Wassermann E.F., Moya X., Manosa L., Planes A. Inverse magnetocaloric effect in ferromagnetic Ni-Mn-Sn. *Alloys Nature Materials*. 2005. Vol. 4. P.450-454.
12. Kumar A., Agarwala V., Singh D. Effect of milling on dielectric and microwave absorption properties of SiC based composites. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40, P. 1797-1806.
13. Zhu H., Bai Y., Liu R., Lun N., Qi Y., Han F., Bi J. In situ synthesis of one-dimensional MWCNT/SiC porous nanocomposites with excellent microwave absorption properties. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. Vol. 21. P. 13581.
14. Dou Y., Li J., Fang X., Jin H., Cao M. The enhanced polarization relaxation and excellent high-temperature dielectric properties of N-doped SiC. *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. P. 052102.
15. Lisachuk G., Kryvobok R., Voloshchuk V., Lapuzina O., Zakharov A. Study of Technological Features of Celsius Ceramics Creation. *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties"*, NAP 2021.
16. Liang C., Liu C., Wang H., Wu L., Jiang Z., Xu Y., Shen B., Wang Z. SiC-Fe₃O₄ dielectric-magnetic hybrid nanowires: controllable fabrication, characterization and electromagnetic wave absorption. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014. Vol. 2. P. 16397-16402.

Lebedev V.V., Kryvobok R.V., Cherkashina G.M., Bliznyuk O.V., Lisachuk G.V. DESIGN AND RESEARCHING POLYMER COMPOSITES TO ABSORB ELECTROMAGNETIC RADIATION

The article shows research on the development of polymeric composites for the absorption of electromagnetic radiation. A deep literary review was conducted on the production of modern materials and composites to

create effective materials for the absorption of electromagnetic radiation. On the basis of literary review, it is established that the most effective wide -range polymeric compositions for the absorption of electromagnetic radiation usually contain mixed fillers that provide different mechanisms of electromagnetic energy losses. The advantages of thermoplastic polymeric composites for the absorption of electromagnetic radiation are to combine high chemical stability, satisfactory mechanical properties with processing processing and low cost. The work investigated polymer composite materials based on polymer matrix in the form of polyamide 6 and SIC silicon carbide were obtained by extruding of pre -prepared raw materials in one auger laboratory extruder. As a result of the studies, it was found that the optimal content of silicon carbide in the developed polymer compositions in terms of their strength characteristics is 5 % of masses. As part of the study of the developed polymeric composites on the automated scalar analyzer of the spectrum P2-65 in the frequency range of 26-37.5 GHz it is determined that their spectrum of the transmission coefficient T is relatively the same throughout the frequency range, and the obtained SWR values indicate a fairly high reflection coefficient for developed polymer composites. It is noted that the reflection coefficient of D polymer composites based on polyamide 6 and 5 % of masses. Silicon carbide indicates a sufficiently high value of dielectric permeability, with its value and the value of the dielectric loss tangent can be obtained by measuring on the adzhilent, but for this purpose it is necessary to examine samples of greater thickness.

Key words: *polymer composites, absorption, electromagnetic radiation, polyamide, silicon carbide.*