

УДК 514.18 : 678.5.05

Колосова Олена Петрівна, к.т.н., доц., **Ванін Володимир Володимирович**, д.т.н., проф.,
Колосов Олександр Євгенович, д.т.н., с.н.с., **Сівецький Володимир Іванович**, к.т.н.,
проф., **Гондлях Олександр Володимирович**, д.т.н., проф.
КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Процес ультразвукової кавітації в низьков'язьких полімерних рідинах та його застосування

***Анотація.** Застосування низькочастотної ультразвукової кавітації розглядається як основний метод фізичної модифікації при одержанні конструкційних полімерних композиційних матеріалів. Описано можливий вплив режимів ультразвукової обробки на технологічні та експлуатаційні властивості реактопластичних полімерів. Охарактеризовано ефективний спектр взаємопов'язаних структурних та технологічних параметрів ультразвукової обробки, що встановлюється розрахунковим та експериментально-статистичним методом. Проаналізовано питання проектування технологічних процесів одержання полімерних композитів функціонального застосування.*

***Ключові слова** – процес, ультразвук, кавітація, полімер, реактопласт, композит*

Конструкційні полімерні композиційні матеріали (ПКМ) застосовуються в різних галузях промисловості: авіація, ракетобудування, суднобудування, автомобільна та електротехнічна промисловість, будівництво, спортивна промисловість, хімічна та спеціальна техніка, медицина тощо [1]. Це пов'язано з широким спектром фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів, одержуваних на основі ПКМ. Наприклад, такі матеріали поєднують низьку щільність, високий модуль пружності та міцності, довговічність та інші цінні властивості.

Під функціональними ПКМ, як правило, розуміють ПКМ зі спеціальними властивостями, які визначаються виключно сферами їх застосування [2]. Більше того, такі матеріали включають як класичні ПКМ з макро- і мікронаповнювачами, так і наномодифіковані (НМ) ПКМ. Зокрема, до функціональних ПКМ належать такі матеріали: теплоізоляційні, у тому числі пінопластові та стільникові, електроізоляційні; корозійно стійкі; провідні; дугостійкі; триботехнічні; антифрикційні; гідрофобні; вогнестійкі; тріщиностійкі; броньовані тощо.

Тут ми також можемо відзначити легкі, високонавантажені частини літальних апаратів та механічні пристрої; вироби спеціального призначення (бронежилети, шоломи, костюми з нагрівачами, датчики та пускачі, вбудовані в армуючу тканину тощо), а також фільтруючі тканини для роботи в суворих умовах [1-4]. Іншими перспективними напрямками використання функціональних матеріалів із комбінованих типів наповнювачів є заміна металевих проводів ліній електропередач вуглецевими нанотрубками (ВНТ), виготовлення спортивного обладнання, наприклад, тенісних ракеток, лиж, хокейних палиць, бамперів та автомобільних деталей, велосипедних рам тощо.

Розробка технічних засобів (технологій та обладнання) для одержання конструкційних ПКМ зі спеціальними властивостями, включаючи інтелектуальні ПКМ на основі термореактивних та термопластичних матриць (включаючи НМ), а також вуглецевих, скляних

чи органічних наповнювачів, є однією з нагальних проблем промислового застосування полімерних матеріалів та полімерних технологій [3, 4].

Одним з напрямів полімерної технології є дослідження особливостей прояву ультразвукової (УЗ) кавітації в рідких, зокрема, полімерних, середовищах.

Процес УЗ-кавітації полягає в утворенні газових, парових або парогазових бульбашок в опроміненій рідині, а також у подальшому утворенні відповідних порожнин на основі цих бульбашок [5-9]. Це явище також супроводжується ефектами першого або другого порядку, що виникають при взаємодії порожнин, що утворюються в рідкому середовищі.

Під час високої інтенсивності УЗ в рідкому середовищі поширюються звукові хвилі, які циклічно чергуються з утворенням періодів високого тиску (напівперіод стиснення) та низького тиску (вакуум-півперіод) згідно [5-9].

Наведені півцикли змінюються зі швидкістю, яка залежить від частоти УЗ. Під час циклу низького тиску високоінтенсивні УЗ-хвилі сприяють утворенню дрібних вакуумних бульбашок або порожнин у рідкому середовищі за рахунок розширення рідкого середовища.

Коли ці бульбашки досягають критичного об'єму, при якому вони вже не здатні поглинати енергію УЗ, порожнини різко лопаються. У той же час, на кордоні розподілу «газ-рідина» перетворення механічної енергії хвиль УЗ у теплову енергію відбувається при багатократному підвищенні температури та тиску в цих прикордонних ділянках. В результаті цього синергетичного ефекту відбувається вибух із утворенням безлічі бульбашок і гарячих газів.

Слід зазначити, що вибухові процеси спрямовані на руйнування внутрішньої структури середовища. На відміну від зовнішнього вибуху, імплізія - це внутрішній вибух або розрідження. Вибух і імплізія особливо характерні для демонстрації незвичних фізичних та хімічних умов, особливо в холодних рідинах.

Згідно [6], аномальна температура (близько 5000 К) та динамічний тиск (до 200 МПа) зі швидкістю нагрівання та охолодження $> 10^{10}$ К/с та швидкості мікрострумів рідини до 280 м/с досягаються в результаті вибуху. Хоча слід зазначити, що наведені вище параметри, включаючи вказані авторами [5 - 9], були отримані суто теоретичним розрахунком.

Процес високоінтенсивної УЗ-кавітації в рідкому середовищі має "ефекти другого порядку", які включають комплекс явищ у вигляді сильних гідродинамічних зсувів, мікропотоків хвиль, накопичувальних мікроелектричних зарядів (розрядів).

Відповідно до [7], існує два різних типи кавітації у УЗ. Перший з них включає перехідну (або інерційну) кавітацію, яка характеризується утворенням парогазових порожнин у рідкому середовищі з інтенсивністю УЗ $I \leq 10$ Вт/см².

Другий тип кавітації включає неінерційну (або стабільну) кавітацію. Її особливістю є коливання вже сформованих і відносно стійких парогазових бульбашок, які характеризуються приблизно однаковими розмірами рівноваги. У цьому випадку інтенсивність УЗ дорівнює $I \sim (1-3)$ Вт/см². Більше того, одночасний прояв вищевказаних двох типів кавітації не виключається при перевищенні порогу інерціальної кавітації та з урахуванням існуючої неоднорідності акустичного поля в рідині [5].

Інший супутній прояв УЗ-кавітації, а саме сонохімія, вивчає хімічні реакції, коли УЗ застосовують для речовин, таких, як рідини, щоб змінити їх структуру та властивості. Сонохімічні реакції, що відбуваються в режимі кавітації, характеризуються незвичайною взаємодією енергії, що подається, і опроміненої речовини з гарячими ділянками всередині крапель. Одним із практичних застосувань сонохімічних реакцій є синтез НМ ПКМ широкого спектру застосувань [10-11].

Моделювання параметрів ультразвукового дозованого кавітатора з випромінюючою пластиною висвітлюється в роботах [12-14]. Використання низькочастотного УЗ як ефективного методу енергозбереження при формуванні реактопластичних композиційних

матеріалів досліджується в роботах [15-16]. Інші питання полімерного матеріалознавства, пов'язані з наномодифікаторами, зокрема, ВНТ та функціоналізованим аерогелем графену, описані в роботах [17-18].

Таким чином, розробка та проектування ефективних технічних засобів низькочастотної обробки в режимі УЗ-кавітації є ефективним напрямком для впровадження технології фізичної модифікації. При цьому в оптимальному варіанті така фізична модифікація спрямована на інтенсифікацію багатьох технологічних операцій з виготовлення таких матеріалів, а також на поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик одержуваних на їх основі виробів та конструкцій.

Список використаних джерел

1. Kolosov A.E., Kolosova E.P., Vanin V.V., Anish Khan. Classical Thermoset Epoxy Composites for Structural Purposes: Designing, Preparation, Properties and Applications. In: Thermoset Composites: Preparation, Properties and Applications. Eds. Anish Khan, Showkat Ahmad Bhawani and Abdullah M. Asiri, 2018. Materials Research Forum LLC, Materials Research Foundations, 2018, 38. Pp. 260–299. doi: <http://dx.doi.org/10.21741/9781945291876-9>
2. Kolosov A.E., Kolosova E.P. Chapter 2. Functional Materials for Construction Application Based on Classical and Nano Composites: Production and Properties. In: Recent Developments in the Field of Carbon Fibers. Eds. Rita Khanna, Romina Cayumil. InTechOpen, 2018. – Pp. 9–31. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73393>
3. Kolosov A.E., Sivetskii V.I., Kolosova E.P., Vanin V.V., Gondlyakh A.V., Sidorov D.E., Ivitskiy I. I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for Functional Application Using Physicochemical Modification. Advances in Polymer Technology, vol. 2019. 12 pp. <https://doi.org/10.1155/2019/3501456>
4. Kolosov, A.E., Sivetskii, V.I., Kolosova, E.P., Vanin, V.V., Gondlyakh, A.V., Sidorov, D.E., Ivitskiy, I.I., Symoniuk, V.P.: Use of Physico-Chemical Modification Methods for Producing of Traditional and Nanomodified Polymeric Composites with Improved Operational Properties. International Journal of Polymer Science, 18 pp. (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/1258727>
5. A. Juan Gallego-Juarez and Karl F. Graff, “Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound,” Elsevier, 1166 p., 2014.
6. K.S. Suslick, “Sonochemistry,” In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th ed., New York, J. Wiley & Sons, vol. 26, pp. 516–541, 1998.
7. I.M. Fedotkin and I.S. Gulyi, “Cavitation, Cavitation Engineering and Technology, Their Use in Industry. Part II,” Kiev, OKO, 2000 [in Russian].
8. T.G. Leighton, “The Acoustic Bubble,” London, Academic Press, 613 p., 1994.
9. <http://www.hielscher.com/sonochem>
10. Kolosov A.E., Kolosova E.P., Vanin V.V., Anish Khan. Chapter 25. Ultrasonic Treatment in the Production of Classical Composites and Carbon Nanocomposites. In: Nano Carbon And Its Composites: Preparation, Properties and Applications. 1st edition. Eds. Anish Khan, S. Mohammad Jawaid, Inamuddin, Abdullah M. Asiri. - Woodhead Publishing (imprint of Elsevier). – 2019. – Pp. 733-780. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00025-0>
11. Kolosov A.E., Kolosova E.P. Modification of Oligomers and Reinforced Polymeric Composites by Carbon Nanotubes and Ultrasonic. Environmental Nanotechnology. – Ser.: Environmental Chemistry for a Sustainable World. - Eds. Raghvendra Mishra, Shivendu Ranjan, Nandita Dasgupta, Ravindra V. Singh, and Eric Lichtfouse. - Vol. 3. Springer, Cham, 2020. - Pp. 89-116. Series Vol. 27. doi: 10.1007/978-3-030-26672-1_3
12. A.E. Kolosov, G.A. Virchenko, E.P. Kolosova, S.L. Shambina. Simulation of the Parameters of an Ultrasonic Dosed Cavitator with Radiative Plate. Part 1. Analysis of Effective Technical Means of Ultrasonic Exposure and a Technique of Variant Structural-Parametric Design // Chemical and petroleum engineering. – 2018. – Vol. 54. – Nos. 7-8. – Pp. 531-541. <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0513-0>
13. G.A. Virchenko, A.E. Kolosov, E.P. Kolosova, S.G. Virchenko. Simulation of the Parameters of Ultrasonic Dosing Device with Radiative Plate. Part 2. Optimization of Design and Technological Parameters // Chemical and petroleum engineering. – 2018. – Vol. 54. – Nos. 7-8. – Pp. 605-612. <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0522-z>
14. V.V. Vanin, G.A. Virchenko, A.E. Kolosov, E.P. Kolosova. Simulation of the parameters of ultrasonic dosing cavitation device with radiative plate. Part 3. Computer-Aided Variant 3D-Design // Chemical and petroleum engineering. – 2019. – Nos. 1. – Pp. 1– 7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10556-019-00535-7>
15. A.E. Kolosov, D.E. Sidorov, E.P. Kolosova and Anish Khan, “Low-Frequency Ultrasound as an Effective Method of Energy Saving During Forming of Reactoplastic Composite Materials,” In: V. Ivanov et al. (eds). Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE - 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 755-764, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_75

16. *Kolosov A.E., Kolosova E.P.* Short Review of Studies on Modeling of Technology and Technical Means Used for Production of Classical and Nanomodified Functional Polymer Composite Materials // International Journal of Engineering & Technology. 2018. - Vol. 7, No. 2.23. - Pp. 483-488. <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/15339/6349>
17. *Anish Khan, Fayaz Ali, Aftab Aslam Parwaz Khan, Kolosov A.E., Abdullah M. Asiri.* Ion Exchange Materials and Their Applications. In: Development and Prospective Applications of Nanoscience and Nanotechnology. Bentham Science. 2018, Vol. 2, pp. 191-217.
18. <http://www.eurekaselect.com/164429/chapter/ion-exchange-materials-and-their-application>
19. *Anish Khan, Aftab Aslam Parwaz Khan, Mohammed Omaish Ansari, Imran Khan, Kolosov A.E., Abdullah M Asiri.* Chapter 8. Functionalized Graphene Aerogel: Structural and Morphological Properties and Applications. In: Functionalized Graphene Nanocomposites and Their Derivatives: Synthesis, Processing and Applications. Micro and Nano Technologies. Mohammad Jawaaid, Rachid Bouhfid and Abou el Kacem Qaiss (Eds.). Bentham Publisher (imprint of Elsevier). 2019. Pp. 157-176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814548-7.00008-8>