

Колосова О. П., к.т.н., Ванін В. В., д.т.н., професор, Колосов О. Є., д.т.н., с.н.с.,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ОДЕРЖАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

Анотація. Розглянуті аспекти моделювання об'єктів одержання полімерних композиційних матеріалів із використанням ультразвуку. На прикладі технологічного процесу озвучування рідких епоксидних олігомерів розглянуто особливості зародження і розвитку процесу низькочастотної ультразвукової кавітації. Проаналізовано питання моделювання структури та властивостей дисперснонаповнених реактопластичних ПКМ, у тому числі одержуваних з використанням кавітаційної УЗ-обробки стосовно полімерного матеріалознавства. Зазначено, що таке моделювання можна здійснити із залученням апарату фрактальної геометрії та кластерної моделі аморфного тіла.

Ключові слова – моделювання, ультразвук, кавітація, полімер, реактопласт, композит, фрактал, кластер

Відомо, що застосування механічних коливань ультразвукового (УЗ) діапазону, або ультразвукових коливань (УЗК), є одним з найбільш перспективних засобів фізичного впливу на рідкі чи тверді компоненти, які використовуються в хімічній технології для інтенсифікації ряду технологічних процесів [1].

Наприклад, при введенні низькочастотного УЗ (18 – 22 кГц) у рідкі епоксидні олігомери (ЕО), відповідно до проведення їх фізичної модифікації з метою покращення технологічних та експлуатаційних властивостей одержуваних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), відбувається «розжиження» озвучуваного ЕО (рис. 1).

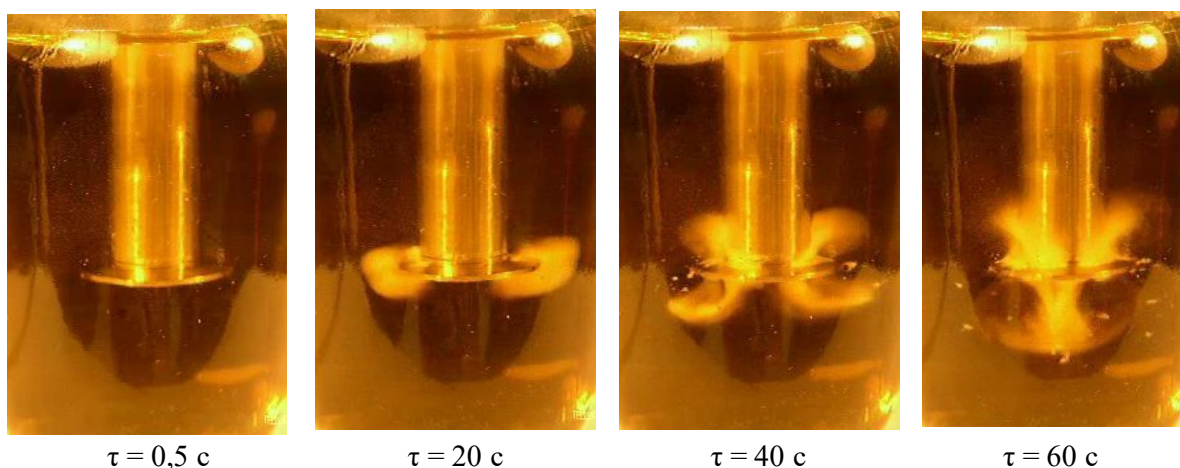


Рис. 1 – Зародження і розвиток процесу УЗ-кавітації в рідкому ЕО марки ЕД-20 у залежності від часу τ (с) його озвучування в низькочастотному діапазоні хвилеводом УЗК циліндричної форми.

Спершу біля випромінюючої (торцової) поверхні концентратора відбувається симетричне формування окремих кавітаційних тяжів, форма яких є подібною до «грибу». Далі відбувається подальший розвиток процесу кавітації, внаслідок чого відбувається значний розігрів ЕО, і, відповідно, зниження його динамічної в'язкості. При продовженні озвучування ЕО відбувається подальше зниження в'язкості ЕО, поширення процесу розвиненої кавітації по усьому його об'єму із-за великих значень амплітуд звукового тиску. Останні встигають збільшуватись до видимих розмірів, що дозволяє візуально спостерігати кавітаційні тяжі, які відходять від випромінюючої поверхні УЗ-привода в об'єм рідини (рис.1).

Проте при цьому важливо не допустити руйнування структури озвучуваного ЕО і його трансформації у желеподібний стан. Це, власне, й обумовлює верхнє значення ефективного діапазону амплітуди A озвучування ЕО. Надалі випромінююча поверхня УЗ-привода, що коливається з високою амплітудою, й крупні кавітуючі бульбашки створюють в об'ємі рідини інтенсивні *мікротечії*.

У свою чергу, із зростанням амплітуди й інтенсивності поздовжніх УЗК концентратора в ЕО відбуваються процеси, які сприяють виникненню (або збільшенню) числа повітряних включень, що призводить в кінцевому результаті до збільшення дефектності, а також до зниження міцності затверділих епоксидних полімерів (ЕП).

Виявлено [2 – 6], що озвучування ЕО за ефективних параметрів УЗ-модифікації приводить до підвищення щільності молекулярного упакування, до зростання ефективної гущини макромолекулярної сітки. Адже із збільшенням ступеня зшивання відбувається зростання числа вузлів просторової макромолекулярної сітки. Останні підсилюють обмеження вільного обертання сегментів ланцюга, що може бути пов'язано із зменшенням «дефектності» макромолекулярної сітки із-за «поліпшення» структури початкового ЕО. Це, у свою чергу, приводить до відповідного зміцнення полімерів, а також до покращення їх експлуатаційних властивостей.

Окремо стоїть питання моделювання структури та властивостей дисперснонаповнених реактопластичних ПКМ, у тому числі одержуваних з використанням кавітаційної УЗ-обробки. Стосовно полімерного матеріалознавства таке моделювання можна здійснити із залученням апарату фрактальної геометрії [7]. Зокрема, для ПКМ з дисперсними наповнювачами нанорозмірного рівня (фулерени, вуглецеві нанотрубки, графені, аерогелі графена, кристали і т.п.), які інкорпорується до рідкої полімерної матриці, ефективним є використання принципів комбінованого фрактально-кластерного підходу.

Наприклад, якщо аналізувати фрактальну структуру досліджуваного затверділого полімерного нанокомпозиту в рамках реалізації системного підходу, то можна відзначити, що така структура одночасно має властивості динамічності й інформативності. До того ж вона може природним чином забезпечувати синергетичну взаємодію структури і властивостей такого матеріалу [8].

У роботі [9] запропоновано розглядати структуру дисперсно-наповненого полімерного композиту як сукупність двох фракталів (мультифракталів) – каркаса частинок дисперсного наповнювача (як макро-, мікро, так і нанорозмірного рівня) та полімерної матриці. Проаналізовано взаємодію двох вищевказаних фракталів. Зокрема, показано, що така взаємодія, як правило, зводиться до «збурення» структури полімерної матриці каркасом уводимих у рідке полімерне сполучне частинок дисперсного наповнювача. При цьому під фізичною сутністю використовуваного в роботі [9] терміна «збурення» структури полімерної матриці розуміють зниження в ній ступеня локального порядку. Визначений в рамках даної кластерної моделі структури аморфного стану полімерів [10] ступінь локального порядку «забезпечує» всі найважливіші технологічні та експлуатаційні властивості полімерної матриці, і, отже, затверділого наповненого ПКМ на її основі.

Практична адаптація запропонованих концептуальних ідей фрактальної геометрії [7 – 9] стосовно до полімерного матеріалознавства створює передумови до моделювання ПКМ нового покоління (нанокомпозитів, інтелектуальних композитів [6]). Такі матеріали містять у своїй структурі різні нанорозмірні наповнювачі (фази). Останні утворюють кластери, які взаємопов'язані з фрактальною структурою основної полімерної фази [11]. Тому не дивно, що структуру ряду затверділих блок-полімерів, до яких відносяться і затверділі «гарячим» способом (тобто при дії підвищеної температури) ЕО, моделюють за допомогою кластерної моделі аморфного тіла та методів фрактального аналізу [9]. Ці моделі і методи взаємно доповнюють один іншого. У той же час слід зазначити, що їх роздільне використання не приносить бажаного синергетичного результату.

Так, наприклад, фрактальний аналіз стосовно до структури аморфних тіл дає тільки загальні уявлення про їх структуру. На відміну від фрактального аналізу, кластерна модель конкретизує особливості структури розглянутих аморфних тіл згідно детермінацій, прийнятих у фізиці полімерів. У цьому випадку вищеописане поняття «збурення» полімерної матриці при введенні в неї дисперсних частинок наповнювача може бути формалізовано. Зокрема, у вигляді збільшення значення фрактальної розмірності D затверділого дисперснонаповненого композиту [12].

Таким чином, зміна величини фрактальної розмірності D свідчить про зміну як структурної організації дисперснонаповненого полімеру, варіації його експлуатаційних властивостей, так і стану (розподілу) уведеного дисперсного наповнювача. Так, наприклад, аналіз залежностей експлуатаційних (фізико-механічних) властивостей таких матеріалів від їх фрактальної розмірності підтвердив застосовуваність до нанокompозитів принципу мультиплікативності [9].

У той же час з положень фрактальної геометрії [7] відомо, що частки дисперсного наповнювача формують у затверділій полімерній матриці каркас. Останній має фрактальні (в загальному випадку мультифрактальні [9]) властивості. Тому утворений каркас можна охарактеризувати величиною фрактальної розмірності. Структура ж затверділої полімерної матриці також може бути охарактеризована своєю розмірністю. У цьому випадку для експериментально визначеної фрактальної розмірності дисперснонаповненого затверділого композиту D існує співвідношення, що зв'язує дві вищевказані розмірності.

У кластерній моделі аморфного тіла структура моделюемого дисперснонаповненого композиту розглядається як набір областей локального порядку (кластерів), занурених у щільноупаковану полімерну матрицю. У цій моделі кластери являють собою набори декількох колінарних щільноупакованих сегментів різних макромолекул (аморфний аналог кристалітів з витягнутими ланцюгами). Відносна частка сегментів різних макромолекул у всій структурі композиту є параметром її порядку. При цьому величини розмірності структури полімерної матриці та відносної частки щільноупакованих сегментів різних макромолекул у всій структурі також пов'язані між собою певним співвідношенням [9].

Слід особливо відзначити особливість структури полімерних нанокompозитів. У процесі інкорпорування нанонаповнювачів до рідкої полімерної матриці утворюються великі агрегати (агломерати) частинок наповнювача внаслідок його фізико-хімічної природи. Після затвердіння композиту ці агрегати (агломерати) частинок виконують негативну роль концентраторів напружень, що сприяють утворенню та подальшому поширенню тріщин у композиті в процесі його експлуатації. Тому у кластерній моделі наповненого полімеру необхідно також враховувати зміну максимального радіусу агрегатів частинок одного розміру [9]. Також відзначається ефективність застосування УЗ для деагломерації таких частинок [3].

Список літератури

1. *Новицкий Б.Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Новицкий Б. Г. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
2. *Колосов О.Є.* Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: [монографія] / О.Є.Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.
3. *Колосов О.Є.* Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: [монографія] / О.Є. Колосов. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 227 с.
4. *Колосова О.П.* Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів [монографія] / О. П. Колосова, В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, О. Є. Колосов. – К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. – 164 с.
5. *Колосова О.П.* Моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних матеріалів: [монографія] / О.П. Колосова, В. В. Ванін, О.Є. Колосов, В.І. Сівецький. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 235 с.

6. Сівецький В.І. Технології і устаткування для формування виробів з традиційних та інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів [монографія] / В.І.Сівецький, О.С. Колосов, О.Л. Сокольський, І.І. Івцький. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2017. – 120 с.

7. Федер Е. Фракталы / Федер Е. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

8. Ананьева Е.С. Модификация эпоксидианового реактопласта горячего отверждения наноматериалами различной природы / Е.С. Ананьева, М.И. Ананьев, В.Б. Маркин, А.В. Ишков, В.А. Новоженков, А.В. Новоженков, И.С. Ларионова. // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – 3(1)75. – С. 155–159. <http://izvestia.asu.ru/2012/3-1/chem/01.ru.html>

9. Козлов Г.В. Новый подход к фрактальным размерностям структуры полимерных дисперсно-наполненных композитов / Г.В. Козлов, А.К. Микитаев // Механика композитных материалов и конструкций. – 1996. – Т. 2. – №3–4. – С. 144 – 157.

10. Sanditov D.S. The model of fluctuation free volume and cluster model of amorphous polymers / D.S. Sanditov, G.V. Kozlov, V.N. Belousov, Yu.S. Lipatov // Ukrain. Polymer J. – 1992. V. 1. – № 3 – 4. P. 241 – 258.

11. Ролдугин В.И. Фрактальные структуры в материаловедении / В.И. Ролдугин // Материаловедение. – 2005. – №4. – С. 22 – 29.

12. Новиков В.У. Фрактальная механика наполненных полимеров / В.У. Новиков, Г. В. Козлов // Пластические массы. – 2005. – №2. – С. 21 – 27.

УДК 621.65

Ткач П.Ю.

Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування ПАТ «ВНДІАЕН», м. Суми, Україна

ПЕРЕВІРКА КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШНЕКОВОВІДЦЕНТРОВОГО СТУПЕНЯ З НАДРОТОРНІМИ ЕЛЕМЕНТАМИ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛЕГКОРУЙНІВНИХ ПОКРИТТІВ

Забезпечення роботи відцентрових робочих коліс без слідів кавітаційного зношування є однією з основних сучасних вимог до живильних насосів атомних і теплових електростанцій і на сьогоднішній день цей ресурс складає не менше 50000 годин. Розглядаючи можливість покращення кавітаційно-ерозійних якостей безбустерних насосів особливу увагу необхідно звернути на конструкції з першим шнекововідцентровим ступенем при цьому одним із перспективних шляхів збільшення кавітаційної зносостійкості шнекововідцентрового ступеня можна виділити використання у конструкції негладкої статорної втулки над передвключеним колесом [1].

Дана робота є продовженням дослідження впливу надроторних елементів над передвключеним колесом на характеристики шнекововідцентрового ступеня насосу і за результатами попередніх робіт [2, 3] були отримані рекомендації щодо геометричних параметрів негладкої статорної втулки з пазами, використання якої дозволило отримати поліпшені кавітаційно-ерозійні характеристики шнекововідцентрового ступеня, що було зафіксовано за допомогою використання методу заміру вібраційних характеристик під час кавітаційних випробувань шнекововідцентрового ступеня на експериментальному стенді. У даному дослідженні використовувалося передвключене колесо з профілем лопаті – дужка круга з виступом, що має одні з найкращих кавітаційно-ерозійних характеристик [4]. Фізичний експеримент проводився на експериментальному стенді ПАТ «ВНДІАЕН», опис експериментального стенду наведено у статті [5]. Було вирішено продовжити це дослідження застосувавши метод оцінки кавітаційно-ерозійних якостей з використанням легкоруйнівних покриттів, що дозволить якісно оцінити і довести правильність отриманих у дослідженні [3] результатів.

Згідно зі статтею [6], автори якої успішно застосовували метод оцінки кавітаційно-ерозійних якостей з використанням легкоруйнівних покриттів, стверджують, що ці покриття дозволяють за короткий час (протягом години) отримати виразні характерні сліди механічної дії кавітації і виявити місця, небезпечні з точки зору кавітаційної ерозії в будь-якому необхідному режимі. Покриття легко наносяться на поверхні деталей