

УДК 678.026

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЗМУ РУЙНУВАННЯ ЗАТВЕРДІЛИХ ДИСПЕРСНО-НАПОВНЕНИХ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ

Колосов О.Є., д.т.н., с.н.с., Сівецький В.І., к.т.н., проф.,
Сідоров Д.Е., к.т.н., доц., Кривошеєв В.С., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Відомо, що фізико-механічні властивості затверділих полімерних реактопластичних матриць пов'язані з конкретним н.д.с. цих матриць [1]. Це обумовлено наявністю різних видів включень і дефектів, які власне і зумовлюють різні механізми руйнування затверділої полімерної матриці при конкретних видах руйнування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ).

Прогнозування властивостей кінцевих композитів з наповнювачами, зокрема, у вигляді датчиків н.д.с., наповнювачами нанометрового діапазону у порівнянні з мікрометровим діапазоном є складним завданням, що обумовлено необхідністю врахування цілого ряду інших факторів, що стосуються, зокрема, механізмів адгезії і когезії, а також особливостей руйнування.

Виходячи з припущень, що дисперсні включення являють собою перешкоду для рухомого фронту утворюваної при напруженому стані тріщини, довжина фронту тріщини збільшується у міру того, як цей фронт прогинається між кожною парою сусідніх дисперсних частинок, що містяться у матриці [2].

Довжина фронту тріщини, що збільшується (згідно моделі Ленга), може вносити істотний вклад в енергію руйнування крихкого композитного матеріалу з дисперсними наночастинками, яким є дисперснонаповнений епоксиполімер. Дана модель застосовується на нанорівні для спрощення розглядання механізму руйнування.

Базуючись на припущеннях про те, що місця затримки представляють собою в перерізі тріщини безрозмірні точки, а також про те, що стан прориву наступає, коли фронт тріщини між місцями (точками) затримки має напівкруглу форму, ця умова описується у вигляді залежності:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{L_\phi}{d_c}, \quad (1)$$

де γ – енергія руйнування системи;

γ_0 – енергія руйнування матеріалу матриці;

L_ϕ – довжина фронту тріщини;

d_c – середня відстань між дисперсними частинками (нано)наповнювача.

Можна припустити, що енергія руйнування затверділої наповненої матриці зростає при зменшенні відстані між дисперсними частинками, тобто концентрація цих частинок у полімерній матриці підвищується. Фронт тріщини перестає взаємодіяти з окремими частинками, коли зближення дисперсних частинок матеріалу максимальне та являє собою суцільну систему, через що енергія руйнування зменшується.

Частинки дисперсного наповнювача є своєрідними дефектами всередині матриці, адже вони є концентраторами напружень та причиною виникнення тріщин, які утворюються в процесі виготовлення або навантаження наномодифікованих ПКМ. Проте великі частинки наповнювача також ефективно затримують просування тріщин. Отже, розмір дисперсних включень здійснює істотний вплив на поширення тріщин.

Тобто зона напруження як усередині частинок, так і навколо них збільшується при збільшенні розміру частинки. Таким чином, збільшується накопичена енергія деформації руйнування, пов'язана з дисперсною частинкою.

Такий підхід означає, що за даних умов розтріскування відбуватиметься тільки в тому випадку, коли розмір частинок більше деякого критичного розміру $d_{кр}$, який можна визначити з умови його рівності критичній енергії утворення нової поверхні [2]:

$$d_{кр} = \frac{\gamma \cdot E}{(q \cdot k_{\sigma})^2}, \quad (2)$$

де γ – питома поверхнева енергія;

E – модуль пружності елемента об'єму, в якому виділяється енергія;

q – прикладені до елемента об'єму напруження;

k_{σ} – коефіцієнт концентрації напружень на (нано)дисперсному включенні.

Зовнішні напруження, які можуть бути прикладені до матеріалу, не повинні перевищувати межу міцності для крихких матеріалів і межі текучості для пластичних матеріалів. Виходячи з цієї умови, можуть бути оцінені критичні розміри включень $d_{кр}$, при яких у матеріалі можуть з'явитися відшарування по кордонах розподілу фаз «матриця – наповнювач».

Так, зокрема, у разі необроблених апретуючими складами дисперсних наповнювачів для склоподібного епоксидного полімера критичний розмір включень становить $d_{кр} \approx 3 \cdot 10^{-7}$ мкм.

Слід зазначити, що вищевказане значення еквівалентного діаметра $d_{кр}$ носить суто оціночний характер, так як в кожному конкретному випадку він залежить від стану границь розподілу, локального напруженого стану, механізму утворення відриву і ряду інших чинників [3]. Однак розрахунки показують, що для ініціювання відшарування в низькомодульних матрицях потрібні відносно «великі» розміри дисперсних включень.

Література

1. Колосов О. Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів : монографія / О.Є. Колосов. – К.: ВПІ ВПК Політехніка, 2015. – 197 с.

2. Блохин А.Н. Разработка процесса наноуглеродного модифицирования композиционных материалов на основе эпоксидных смол и его аппаратурного оформления: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.17.06, 05.17.08 / А.Н. Блохин. – Тамбов, 2012. – 15 с.

3. 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.