Кіпніс Олександр1

1 старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Інститут механіки ім.. С.П Тимошенка НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: a.l.kipnis@gmail.com

ВТРАТА СТІЙКОСТІ ТОНКОЇ ЖОРСТКОЇ ПЛІВКИ НА ПОДАТЛИВІЙ НЕСТИСЛИВІЙ ПІДКЛАДЦІ ПРИ СТИСКУ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОГО ВІДШАРУВАННЯ

Анотація. Визначені критичні деформації, що відповідають механічній нестійкості тонких плівок з матеріалів PEDOT:PSS та P3HT:PCBM, які жорстко з'єднані з достатньо товстою нестисливою підкладкою з матеріалу PDMS, при стиску такої бішарової системи вздовж міжфазного відшарування. Досліджено залежність критичних деформацій від відносної товщини плівки покриття та у випадку відносно коротких відшарувань проведено порівняння одержаних значень критичних деформацій з цими значеннями в аналогічній задачі для такого ж тіла без міжфазного дефекту та зі значеннями, визначеними з використанням відомих наближених формул.

Ключові слова: матеріал з покриттям, відшарування, межа поділу середовищ

Вступ. Якщо кусково-однорідне конструкційне тіло, яке являє собою податливу підкладку, вкриту тонкою жорсткою нано-розмірною плівкою, знаходиться в умовах стиску, то при досягненні величини деформації стиску свого критичного значення відбувається поверхнева втрата стійкості бішару з утворенням хвилеподібного патерну на його поверхні. В літературі таке явище носить назву «wrinkling» (дослівно «зморщування») [1, 2]. При цьому для визначення критичних деформацій, що відповідають поверхневій нестійкості, часто використовують відомі наближені формули [3, 4]. Менш вивченими є питання, пов'язані можливою наявністю дефектів на межі поділу плівки та підкладки, які виникають в процесі експлуатації зразків. Так, внаслідок послаблення адгезії на межі поділу на певній її ділянці можливий розрив суцільності з втратою зв'язку між компонентами бішару. Такий дефект з вільними від напружень берегами можна називати як тріщиною так і відшаруванням. Задачі про стискання тіл вздовж площин розташування тріщин відносять до некласичних проблем руйнування через неможливість застосувати для такої геометрії навантаження класичні критерії руйнування. Ефективним методом дослідження некласичних проблем руйнування є використання апарату лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл [5].

Лінеаризована задача теорії стійкості. В умовах плоскої деформації розглянемо бішар, утворений напівобмеженою підкладкою, з якою жорстко з'єднана тонка плівка покриття товщини *h* (рис. 1). Межа поділу середовищ 2 x 0 містить дефект у вигляді відшарування (тріщини) довжини 2a , береги якого, як і гранична поверхня бішару 2 x h вільні від напружень. Матеріали бішару вважаються високоеластичними матеріалами, а структура їх пружних потенціалів – довільною.

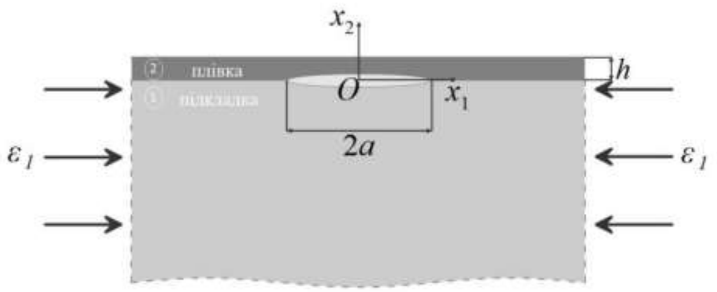

Рис. 1 – система підкладка/тонка плівка при стиску вздовж міжфазного відшарування

На нескінченності матеріали стискаються вздовж осі Ox_1 рівномірно розподіленими навантаженнями таким чином, що забезпечуються однакові укорочення вздовж осі Ox_1 для матеріалів півплощини та смуги. Крайові умови сформульованої задачі записуються наступним чином:

$$t_{22}^{(2)}=0,\ t_{21}^{(2)}=0\ \ (x_2=h,\ 0\le|x_1|<\infty);$$

$$t_{22}^{(1)}=t_{22}^{(2)},\ t_{21}^{(1)}=t_{21}^{(2)}\ \ (x_2=0,\ 0\le|x_1|<\infty);$$

$$t_{21}^{(2)}=0,\ \ t_{22}^{(2)}=0\ \ (x_2=0,\ |x_1|\le a);\ u_1^{(1)}=u_1^{(2)},\ u_2^{(1)}=u_2^{(2)}\ \ (x_2=0,\ |x_1|>a),$$

де $t_{kl}^{(i)},\ i,k,l=1,2$ – збурення компонент несиметричного тензору напружень Піоли – Кірхгофа $\tilde{t}^{(i)}$; $\vec{u}^{(i)}$ – вектор збурення переміщень; верхні індекси "1" або "2" визначають приналежність величини або функції, відповідно, області "1" або "2".

Сформульовану задачу лінеаризованої теорії стійкості з використанням загальних представлень розв'язків лінеаризованих рівнянь рівноваги через гармонічні потенціальні функції [5] зведено до задачі на власні значення для системи інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду з деякою додатковою умовою, яка досліджується чисельно з використанням методу Бубнова – Гальоркіна [6].

Числові результати. Розглянемо випадок, коли нестислива PDMS (E_1 2.97 МПа)
підкладка вкрита тонкоплівковими матеріалами PEDOT:PSS (E_2 2000 МПа, 0.35 ν)

або P3HT:PCBM (E_2 7300 МПа, 0.35 ν) [2]. Такі бішарові системи представляють собою легкі та міцні матеріали, які широко використовуються, наприклад, при виробництві органічних фотоелектричних сонячних елементів [7]. Нестисливий матеріал підкладки моделюється пружним потенціалом Трелоара [8], а матеріали плівок – стандартним потенціалом гармонічного типу [9].

Залежності критичних деформацій $\mathcal{E}_1$ від значення геометричного параметру lg β, β h / a, зображені суцільними кривими на рис. 2. Рисунок 2, а відповідає плівці PEDOT:PSS, а рис. 2 б – плівці P3HT:PCBM.

Штрихові прямі на рис. 2 відповідають критичним деформаціям зморщування тонкої плівки на напівобмеженій підкладці у випадку відсутності дефекту. Відповідні лінеаризовані задачі теорії стійкості, які зводяться до розв'язання певного трансцендентного рівняння, розглядаються роботі [10].

Як зазначалося у вступі, оцінку критичних деформацій, що відповідають початку зморщування, можна одержати і з використанням відомої наближеної формули [3, 4]. Цим значенням на рис. 2 відповідають штрих-пунктирні прямі.

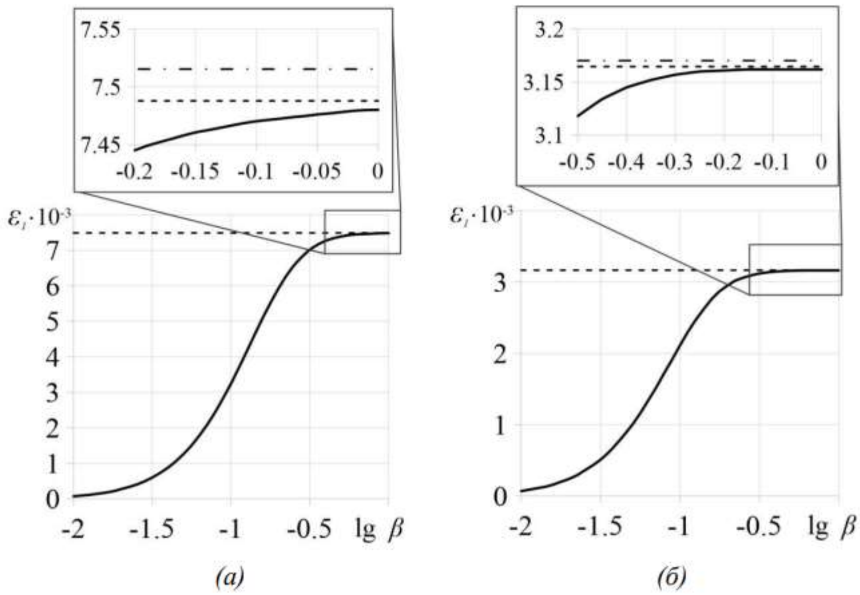

Рис. 2 – критичні деформації втрати стійкості плівки PEDOT:PSS (а) та P3HT:PCBM (б)

Висновки. Із застосуванням аналітико-чисельного підходу в рамках лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл вивчено питання впливу наявності міжфазного відшарування на критичні деформації, що відповідають втраті стійкості тонких плівок з матеріалів PEDOT:PSS та P3HT:PCBM на PDMS підкладці, товщина якої суттєво більша за товщину плівок. Показано, що для плівок обох типів у випадку ідеального контакту компонентів кусково-однорідного тіла, за наявності відшарування, довжина якого складає 1/4 товщини плівки і менше, для оцінки значень критичних деформацій з точністю до 1% можна застосовувати наближені інженерні формули, які не враховують наявність дефектів на межі поділу середовищ і слугують для визначення критичних деформацій початку зморщування тонких плівок на податливих підкладках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Groenewold, J. (2001). Wrinkling of plates coupled with soft elastic media. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 298(1–2), 32–45.

2. Nikravesh, S., Ryu, D., & Shen, Y. L. (2020). Instabilities of thin films on a compliant substrate: Direct numerical simulations from surface wrinkling to global buckling.Scientific Reports, 10, 5728.

3. Allen, H. G. (1969). Analysis and design of structural sandwich panels. Pergamon Press.

4. Mei, H., Landis, C. M., & Huang, R. (2011). Concomitant wrinkling and buckledelamination of elastic thin films on compliant substrates. Mechanics of Materials, 43(11), 627–642.

5. Guz, A. N. (1999). Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies. Springer.

6. Bogdanov, V. L., Nazarenko, V. M., & Kipnis, O. L. (2024). Compression of semibounded body with thin coating layer along interface near-surface crack. Part I. International Applied Mechanics, 60(5), 511–524.

7. Kaltenbrunner, M., White, M., Głowacki, E., et al. (2012). Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. Nature Communications, 3, 770.

8. Treloar, L. R. G. (1955). Large elastic deformations in rubber-like materials. In IUTAM Colloquium (pp. 208–217).

9. John, F. (1960). Plane strain problems for a perfectly elastic material of harmonic type. Communications on Pure and Applied Mathematics, 13(2), 239–296.

10. Bogdanov, V. L., Nazarenko, V. M., & Kipnis, A. L. (2025). Compression of a semi-bounded body with a coating layer along the interface sliding zone. ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 105(1).