

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Кіпніса Олександра Леонідовича** на тему «Стійкість матеріалів з покриттям при стиску вздовж межі поділу за різних умов міжфазного контакту», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

1. Ступінь актуальності обраної теми. Стрімкий розвиток сучасних високотехнологічних галузей, таких як гнучка електроніка, сонячна енергетика, створення біосумісних імплантатів, систем м'якої робототехніки та спеціальних захисних покриттів, вимагає створення та використання нових структурно-неоднорідних матеріалів. Найбільш поширеним типом таких матеріалів є бішарові тонкоплівкові системи, що складаються з відносно жорсткого шару покриття (плівки) та значно більш податливої основи (підкладки). У процесі виробництва або під час експлуатації такі композитні системи часто піддаються інтенсивному стисканню. З позицій механіки деформівного твердого тіла, втрата стійкості тонкої плівки, що вкриває підкладку, є одним із найважливіших критичних станів, який часто передує або безпосередньо ініціює процес незворотного руйнування всього елемента конструкції (через відшарування плівки або її розтріскування). При цьому, наявність у таких системах міжфазних дефектів технологічного або експлуатаційного походження (тріщин, зон відшарування, ділянок проковзування) кардинально змінює механіку їх деформування. Існуючі інженерні підходи до розрахунку міцності та стійкості подібних систем здебільшого базуються на класичних теоріях балок і пластин. Проте застосування таких спрощених одновимірних або двовимірних моделей до матеріалів, здатних до великих пружних деформацій (еластомерів, полімерів, гідрогелів), призводить до суттєвих похибок. Класичні теорії часто не здатні врахувати взаємодію локальних та глобальних форм втрати стійкості (зморщування та випучування) та не можуть адекватно описати тривимірний напружено-деформований стан поблизу дефектів на межі поділу. У зв'язку з цим, розробка нових математичних моделей та напіваналітичних методів дослідження стійкості напівобмежених гіперпружних тіл при великих деформаціях з урахуванням різних типів міжфазного контакту (жорсткого з'єднання, проковзування) та наявності дефектів, яка реалізована в дисертації О.Л. Кіпніса на основі строгих співвідношень тривимірної лінеаризованої теорії стійкості, є надзвичайно актуальною, своєчасною та затребуваною в інженерній практиці.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. Ступінь обґрунтованості наукових положень, сформульованих у дисертації, базується на коректному та математично строгому використанні фундаментальних співвідношень тривимірної лінеаризованої теорії стійкості

деформівних тіл при скінченних (великих) деформаціях. Автором вдало обрано математичний апарат: застосування методу інтегральних перетворень Фур'є у поєднанні з методом Бубнова-Гальоркіна для розв'язання інтегральних рівнянь дозволило отримати високу точність розрахунків. Достовірність отриманих числових результатів та висновків переконливо підтверджується, зокрема:

- строгою математичною постановкою відповідних крайових задач та доведенням збіжності запропонованих числових алгоритмів при розв'язанні трансцендентних рівнянь і задач на власні значення для систем інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду;
- співпадінням отриманих результатів у частинних (граничних) випадках із відомими аналітичними розв'язками для бездефектних та однорідних середовищ;
- узгодженістю результатів з даними інших авторів, отриманими на основі альтернативних методів (зокрема, методу скінченних елементів) та з наявними експериментальними спостереженнями щодо утворення поверхневих структур типу «зморшок» (wrinkling) та локального випучування (buckling). Рекомендації щодо меж застосування класичних балкових моделей мають під собою міцне математичне та фізичне підґрунтя, що робить їх надійним інструментом для розрахунків на міцність.

3. Новизна і загальнонаціональне або світове значення. Наукова новизна дисертаційної роботи О.Л. Кіпніса полягає у створенні комплексної методології розрахунку критичних параметрів втрати стійкості гіперпружних тонкоплівкових систем за наявності локальних недосконалостей на межі поділу фаз. Серед найбільш вагомих нових наукових результатів слід виділити такі:

- Вперше розроблено напіваналітичний підхід до дослідження втрати стійкості напівобмежених гіперпружних бішарів при стиску за різних умов контакту в рамках тривимірної лінеаризованої теорії стійкості.
- Отримано нові трансцендентні рівняння для визначення критичних параметрів для бездефектних бішарових систем в умовах жорсткого з'єднання та ідеального проковзування шарів.
- Вперше крайові задачі для стиснутих тіл із міжфазними дефектами (тріщинами та зонами проковзування) зведено до задач на власні значення для систем інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду, що дозволило ефективно визначати критичні параметри втрати стійкості.
- На основі строгого теоретичного аналізу вперше доведено важливий для механіки ефект: взаємодія механізмів зморщування та випучування у гіперпружних бішарах з дефектами призводить до суттєво нижчих

критичних значень відносних укорочень, ніж це передбачалося спрощеними теоріями або результатами аналізу ізольованих дефектів.

- Отримано нові розв'язки задач про вплив внутрішньої тріщини в підкладці, що розташована паралельно до межі поділу середовищ, на загальну стійкість системи.

Загальнонаціональне та світове значення (практична цінність) роботи полягає у тому, що отримані результати створюють надійну теоретичну базу для проектування перспективних елементів сучасної техніки. Розроблений математичний апарат може бути безпосередньо застосований інженерними підрозділами вітчизняних та зарубіжних підприємств при розрахунках на міцність та надійність елементів гнучкої мікроелектроніки, сонячних панелей та біомедичних пристроїв. Важливим практичним внеском автора є сформульовані інженерні критерії та оцінки, які чітко регламентують межі застосовності класичних балкових теорій залежно від відношення модулів пружності матеріалів, геометричних параметрів півки та відносної довжини міжфазних дефектів.

4. Повнота викладу в наукових публікаціях. Основні наукові результати, положення та висновки дисертаційної роботи викладені у 26 наукових працях. Серед них 11 статей опубліковано у провідних міжнародних рецензованих журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science Core Collection (зокрема, більшість публікацій віднесено до престижних квантилів Q2 та Q3). Крім того, результати висвітлено у 2 статтях у періодичних фахових виданнях України, віднесених до категорії «А», та 5 статтях у виданнях категорії «Б». Апробація результатів здійснена на високому міжнародному рівні – опубліковано 9 тез доповідей на авторитетних міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях. Кількість, якість та рівень фахових публікацій повністю і з запасом задовольняють вимоги МОН України, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук.

5. Академічна доброчесність. Дисертаційна робота О.Л. Кіпніса є самостійним, оригінальним та логічно завершеним науковим дослідженням. Проведений аналіз тексту дисертації та опублікованих за її темою наукових праць дає підстави констатувати абсолютну відсутність академічного плагіату, фабрикації даних, фальсифікації результатів, неправомірних запозичень чи компіляції. Усі використані в роботі ідеї, теоретичні положення, математичні моделі та результати, що належать іншим авторам, супроводжуються коректними посиланнями на відповідні першоджерела. Співавторство у спільних публікаціях відображено прозоро, внесок здобувача є визначальним.

6. Зауваження та/або дискусійні питання. Високо оцінюючи фундаментальний науковий і практичний рівень дисертаційної роботи, обсяг виконаних теоретичних та числових досліджень, вважаю за доцільне висловити деякі зауваження та побажання:

1. Робота має яскраво виражений потужний фундаментальний характер. Разом з тим, у розділах, присвячених застосуванню розробленої методики до конкретних класів матеріалів, бракує числових прикладів розрахунку надійності реальних конструктивних елементів із зазначенням конкретних розмірних фізико-механічних характеристик еластомерів, отриманих безпосередньо з натурних експериментів на макроскопічний стиск.

2. Аналізуючи стиск бішару як за умов ідеального проковзування його компонентів, так і за наявності локальних міжфазних зон гладкого проковзування, автор справедливо вказує на суттєвий вплив цих контактних умов на зниження критичних параметрів. Проте, в реальних інженерних конструкціях та композитах на межі поділу шарів часто діє сухе або в'язке тертя. Було б цікаво в рамках дискусії почути міркування автора щодо того, як врахування контактного тертя на інтерфейсі може вплинути на отримані значення критичних відносних укорочень і чи суттєво це ускладнить математичну постановку задачі.

3. В роботі використовуються різні моделі гіперпружних матеріалів (потенціали Трелоара, Бартенева–Хазановича, гармонічного типу). Разом з тим, для потреб фахівців у галузі опору матеріалів та машинознавства, бракує чітких рекомендацій щодо того, який саме гіперпружний потенціал є доцільнішим та фізично більш адекватним обирати для моделювання типових класів промислових еластомерів при великих значеннях деформацій стиску.

4. Дослідження стійкості в дисертації проведено в рамках тривимірної лінеаризованої теорії, яка дозволяє з високою точністю визначити точки біфуркації (критичні параметри стиску). Проте, з точки зору механіки руйнування та експлуатаційної надійності, надзвичайно важливим є розуміння закритичної стадії деформування. У роботі бракує обговорення того, чи є виявлені форми втрати стійкості (зокрема, локальне випучування над тріщиною) стійкими у закритичній стадії, і чи не призведе досягнення критичної деформації до стрімкого вивільнення енергії та подальшого нестабільного росту міжфазного дефекту.

5. В тексті роботи трапляються окремі термінологічні неточності та друкарські помилки в математичних викладках, які, однак, мають суто редакційний характер і не впливають на достовірність результатів.

Наведені вище зауваження та дискусійні питання мають переважно рекомендаційний характер, торкаються здебільшого прикладних аспектів впровадження результатів і жодною мірою не знижують високої наукової

цінності, теоретичної значимості та загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

7. Загальний висновок. Дисертаційна робота **Кіпніса Олександра Леонідовича** на тему «Стійкість матеріалів з покриттям при стиску вздовж межі поділу за різних умов міжфазного контакту» є завершеною науковою працею, яка вирішує важливу та актуальну наукову проблему механіки деформівного твердого тіла — розробку моделей та методів визначення критичних параметрів стійкості гіперпружних шаруватих систем з урахуванням наявності локальних дефектів, у тому числі, на межі поділу. Вважаю, що за актуальністю теми, новизною, обсягом і глибиною проведених досліджень, практичною та теоретичною цінністю результатів дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пп. 7-9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17.11.2021 р., а її автор, **Кіпніс Олександр Леонідович**, безперечно заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент:

в.о. завідувача кафедри
опору матеріалів і машинознавства
Національного транспортного університету
доктор технічних наук, професор

Олександр МАРЧУК

Власноручний підпис Марчука О.В. засвідчую

