

ВІДГУК

офіційного опонента
на дисертацію Степанової Наталії Іванівни
**«Обернені задачі ідентифікації силових впливів,
включень та розрізів у тонкій пластині»**, що подана
на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю - 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла

Однією з найважливіших задач сучасної інженерної практики є розробка методик прогнозування поведінки механічних систем на основі відомих моделей механіки деформівного твердого тіла та методів розв'язання обернених задач. Найбільшу актуальність це питання набуває стосовно до тонкостінних елементів внаслідок особливої вразливості та широти їх застосування у якості складових частин полегшених конструкцій у багатьох галузях промисловості. Присутність у тонкостінному елементі пошкоджень структури за певних умов експлуатації може стати причиною руйнування конструкції.

Дослідженню дійсного стану тонкостінних систем та виявленню дефектів у вигляді включень, тріщин, розрізів присвячено численні роботи Л. Т. Бережницького, О. О. Ватульяна, Н. П. Лазарева, М. П. Саврука, І. Ю. Цвелодуба, Е. І. Шифріна, П. В. Шушпаннікова, В. В. Щербакова, Є. Б. Яреми, G. Alessandrini, A. Morassi. Ідентифікацію локальних силових впливів у тонких пластинах виконано в роботах Ю. Г. Одинокова, А. Р. Сковороди, Є. Г. Янютіна, M. Bonett.

У вказаних дослідженнях задачі ідентифікації переважно розв'язано для необмежених або напівобмежених тонких пластин. Обернені задачі сформульовано в крайовій та в варіаційній постановках, для їх розв'язання застосовано методи обернення розв'язку прямої задачі, екстремальні методи. Для усунення проблеми нестійких розв'язків використовуються методи регуляризації (регуляризація на компактних множинах, побудова квазірозв'язків, ітераційна регуляризація тощо).

На даний час існує незначна кількість методик, які б дозволили за результатами одного статичного випробування виконати ідентифікацію місця розташування дефекту або локального силового впливу та визначити їх параметри. Крім того, в літературі практично відсутні

відомості про дослідження процесу ідентифікації методом обернених задач силових впливів та дефектів у тонкій пластині в залежності від їх фізико-механічних параметрів.

Предметом дослідження поданої до захисту дисертаційної роботи є ідентифікація методом обернених задач параметрів реальної моделі тонкої пластини за наявністю локальних силових впливів та дефектів структури матеріалу у вигляді включень або розрізів на основі результатів спостереження за її пружним деформуванням.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Подана до захисту дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Розроблений у роботі підхід визначення дійсного стану тонкої пластини та результати його застосування проілюстровано на 54 рисунках та наведено у 17 таблицях.

У вступі доведено практичну вагомість та актуальність теми дослідження, вказано зв'язок роботи з науковими темами, поставлено мету та основні задачі роботи, наведено перелік методів дослідження, зазначено наукову новизну, вірогідність та практичне значення отриманих у дослідженні результатів. Також вступ містить інформацію про публікації за темою дисертаційної роботи, апробацію її результатів та особистий внесок здобувача.

Надані в перших трьох розділах дисертації (одна - оглядова та дві оригінальні) теоретичні дослідження, присвячено розвитку методів обернених задач ідентифікації стосовно до теорії тонких пластин.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан даної наукової проблеми, зроблено огляд постановок та методів розв'язання обернених задач, окреслено коло питань, що на даний час є недостатньо дослідженими та у зв'язку з їх практичною цінністю потребують більш пильної уваги науковців.

У другому розділі сформульовано математичну модель прямої та оберненої задач ідентифікації. Зазначається, що проблема виявлення в реальних тонкостінних системах точкових збурень, що не є проєктними, а виникають в процесі експлуатації внаслідок присутності в матеріалі пластини неоднорідностей та пошкоджень суцільності матеріалу або під впливом випадкових зосереджених сил, вимагає створення адекватних математичних моделей зазначених систем. Вказано, що для подолання некоректності оберненої задачі у дослідженні використовується варіаційне формулювання задачі у поєднанні з умовно-коректною

постановкою, яка заснована на залученні додаткової інформації про шуканий розв'язок. У роботі здійснюється перехід до задачі мінімізації функціоналу повної енергії системи з урахуванням додаткових обмежень на «відстань» між функціями, що характеризують обчислений з використанням математичної моделі та вимірний в результаті експерименту напружено-деформований стан пластини.

Для опису особливостей досліджуваної пластини введено характеристичні вектор-функції, які визначають параметри тонкостінної системи, а саме: наявність локальних силових впливів, включень та розрізів, вказано області визначення введених характеристичних вектор-функцій. Напружено-деформований стан пластини описано за допомогою нелінійної крайової задачі теорії пластин з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Лява та нелінійних співвідношень теорії В. В. Новожилова. До нелінійної системи рівнянь додано крайові умови на внутрішніх та зовнішніх контурах пластини.

Близькість спостережуваного та обчисленого з використанням математичної моделі станів системи оцінюється за допомогою метрики, що характеризує середньоквадратичне ухилення деформацій (розтягування-стискання та згину) від значень відповідних функцій, які виміряно в експерименті.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено побудові методу розв'язання задачі ідентифікації. Для визначення невідомих функцій оберненої задачі здійснюється перехід до дискретної моделі з використанням методу скінченних елементів. Після введення сіток, призначених для опису невідомих функцій прямої та оберненої задач, невідомі функції подаються у вигляді векторів, компонентами яких є вузлові значення функцій задачі, а значення невідомих функцій на елементі задаються для локальної системи координат за допомогою апроксимацій через вузлові значення.

На підставі теорії оптимального розбиття множин та введеної дискретизації область, що займається пластиною, подається у вигляді сукупності підмножин, а невідомі оберненої задачі виступають як характеристичні функції підмножин. Компоненти вектор-функції невідомих приймають бінарні значення 0 та 1, при цьому: значення 1 свідчить про належність відповідного вузла включенню, про наявність у вузлі силового впливу або вершини розрізу, значення 0 – про відсутність зазначених особливостей у відповідному вузлі.

Шляхом запропонованого двоетапного підходу з використанням одноразового вимірювання характеристик напружено-деформованого стану пластини у роботі визначаються просторова локалізація силових впливів та дефектів в системі (перший етап) та їх геометричні параметри (другий етап).

В роботі запропоновано підхід щодо вибору інформативних точок спостереження, використання якого істотно зменшує кількість обчислень.

У підрозділі 4.1 дисертації наводяться результати використання запропонованого двоетапного підходу для розв'язання задач ідентифікації жорстких включень у тонкій пластині. На першому етапі обчислень визначається область розташування включень, на другому - в ітераційній процедурі методу Ньютона-Рафсона уточнюються значення їх модулів пружності. Досліджено можливості розробленого підходу щодо виявлення у пластині включень різного розміру та пружних властивостей, які розташовано на різних відстанях одне від одного.

Підрозділ 4.2 містить результати використання запропонованого підходу для реконструкції локального навантаження у тонкій пластині. Розв'язано задачі ідентифікації силових впливів різних величин, які прикладено на різних відстанях від кромки пластини. З використанням двоетапної процедури ідентифікації визначено області прикладання зосереджених сил та відновлено їх величини. Проведено аналіз чутливості запропонованого алгоритму до похибки вхідних даних. Встановлено, що зі збільшенням рівню шуму для значень цих даних спостерігається зростання похибки відновлення параметрів моделі навантаження. Проведені обчислювальні експерименти довели стійкість розробленого підходу до можливих похибок вимірювань та задовільну точність отриманих результатів ідентифікації.

Проведено порівняння результатів реконструкції локального навантаження з аналітичними розв'язками, відомими з літературних джерел, яке підтвердило задовільну узгодженість результатів.

У п'ятому розділі розвинуто підхід щодо моделювання розрізів у тонкій пластині лінією у суцільній пластині, уздовж якої задано стрибки переміщень та кутів повороту, що визначаються шляхом розв'язання оберненої задачі. За допомогою запропонованого способу моделювання розв'язано задачу ідентифікації дефектів у вигляді лінійних розрізів у

тонкій пластині, а також досліджено вплив геометричних параметрів розрізу на виконання процедури ідентифікації.

У висновках до дисертації сформульовано основні отримані у роботі результати.

Наукові положення, які сформульовано у дисертації, та отримані у роботі висновки є цілком обґрунтованими. Вірогідність отриманих у роботі результатів підтверджується порівнянням з результатами інших досліджень.

Оцінка наукової новизни та практичної значимості роботи.

Дисертаційна робота містить ряд нових результатів:

1. В рамках нелінійної теорії пластин побудовано модель деформівної тонкої пластини, параметри моделі описано за допомогою характеристичних функцій, які виступають у якості невідомих оберненої задачі та підлягають визначенню за результатами вимірів характеристик напружено-деформованого стану системи.

2. Обернену задачу сформульовано у варіаційній постановці, що передбачає мінімізацію функціонала енергії системи з приєднаною умовою, яка визначає близькість дійсного та спостережуваного станів пластини. Близькість зазначених станів оцінюється із застосуванням метрики, що базується на використанні компонент тангенціальних та згинальних деформацій.

3. Запропонований двоетапний метод ідентифікації дійсного стану тонкої пластини поєднує скінченно-елементну дискретизацію моделі пластини, лінеаризацію за допомогою методу продовження за параметром навантаження, теорію оптимального розбиття множин та метод Ньютона-Рафсона для визначення параметрів моделі.

4. Розвинуто підхід щодо моделювання розрізу у тонкій пластині лінією у суцільній пластині, вздовж якої задано стрибки переміщень та кутів повороту, які визначаються із розв'язання оберненої задачі шляхом задоволення статичних умов на берегах розрізу.

5. Проаналізовано можливості запропонованого підходу ідентифікації в залежності від фізико-геометричних параметрів моделі. Досліджено стійкість розроблених алгоритмів ідентифікації щодо збурення вхідних даних.

Практична значимість результатів дисертаційної роботи полягає у можливості застосування розроблених математичних моделей, методів та алгоритмів ідентифікації для визначення дійсного стану тонких пластин.

Дисертаційна робота відповідає наступним встановленим вимогам:

– зміст дисертаційної роботи, ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів свідчать, що дисертаційне дослідження Н. І. Степанової є завершеною науковою працею, у якій розвинуто метод обернених задач щодо виявлення локальних силових впливів та дефектів структури матеріалу тонких пластин;

– дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук щодо актуальності теми дослідження, одержаних нових наукових та практичних результатів, кількості публікацій у наукових фахових виданнях, зазначених у «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України;

– дисертаційна робота Н. І. Степанової відповідає паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла;

– результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковано в наукових фахових виданнях та апробовано на міжнародних наукових конференціях та семінарах;

– зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертації;

– структура дисертації, її обсяг і оформлення повністю відповідають всім вимогам Міністерства освіти і науки України.

По роботі маю такі зауваження:

1. Запропонована в роботі метрика оцінювання близькості обчисленого з використанням математичної моделі та спостережуваного станів базується на значеннях тангенціальної та згинальної деформацій. Було б доцільним навести приклади, які б довели переваги саме обраної метрики у порівнянні з відомою з літератури метрикою, побудованої з використанням прогинів.

2. В роботі нечітко визначено границі застосовності запропонованого підходу, не вказано можливі діапазони параметрів, що характеризують область визначення невідомих оберненої задачі.

3. При розв'язанні оберненої задачі ідентифікації включень та діючих в системі навантажень не сформульовано рекомендації щодо вибору початкового наближення множників Лагранжа $\{\lambda_n\}$.

4. При виконанні процедури вибору інформативних точок спостережень запропоновано розділити вектор нев'язок на суму двох незалежних векторів: інформативного та неінформативного. Однак не зовсім зрозуміло, яким чином до розв'язання оберненої задачі це можна здійснити. Також не надано рекомендації щодо кількості точок спостереження для розв'язання обернених задач із заданою точністю для всіх розглянутих у роботі задач.

Загальний висновок по дисертаційній роботі. Зроблені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від роботи. Дисертація написана чітко, зрозуміло, містить корисні наукові результати, що можуть бути застосованими на практиці.

Вважаю, що дисертація «Обернені задачі ідентифікації силових впливів, включень та розрізів у тонкій пластині» повністю відповідає вимогам, зазначеним у «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами та доповненнями, внесеними Постановою КМУ від 19.08.2015 р. № 656 та від 30.12.2015 р. № 1159, а її автор, Степанова Наталія Іванівна, заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,
професор кафедри механіки
Національного університету
«Запорізька політехніка»,
доктор фіз.-мат. наук, професор



В. І. Пожуєв

Підпис проф. В. І. Пожуєва завірив

Вчений секретар
Національного університету
«Запорізька політехніка»,
кандидат соціологічних наук, доцент



В. В. Кузьмін