

ВІДГУК офіційного опонента

на дисертаційну роботу *Чернобривко Марини Вікторівни*
«Напружено-деформований стан елементів конструкцій
при високошвидкісних навантаженнях»,
поданої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми роботи.

Проектування елементів сучасної техніки та обладнання пов'язано з вирішенням низки, зазвичай суперечливих між собою питань, спрямованих на забезпечення заданих критеріїв надійності, економічності та довговічності проектного виробу. Особливо ці питання набувають актуальності у випадку елементів відповідальних конструкцій, які в процесі експлуатації знаходяться в умовах нестационарних, в тому числі імпульсних, навантажень. Надійність та довговічність таких конструкцій забезпечується, зокрема, міцністю її складових, що визначає важливість розробки нових і удосконалення існуючих методів аналізу напружено-деформованого стану елементів конструкцій при інтенсивних зовнішніх навантаженнях з врахуванням особливостей деформування матеріалу та впливу оточуючого середовища. Цим визначається актуальність теми дисертаційної роботи «Напружено-деформований стан елементів конструкцій при високошвидкісних навантаженнях», яка присвячена розробці нових методів розрахунку динамічного термо-пружно-пластичного стану різноманітних елементів конструкцій в умовах високошвидкісного механічного навантаження.

Про актуальність теми також свідчить той факт, що сама робота виконувалася у рамках багатьох наукових тем Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України та низки програм Міжнародного співробітництва зазначеного Інституту (зокрема, з Інститутом проточних машин Польської академії наук та Воєнно-технічною академією ім. Я. Домбровського, Польща).

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.

Всі наукові завдання з проведення теоретичних і прикладних досліджень високошвидкісного деформування елементів конструкцій в дисертації сформульовано обґрунтовано. Всі розрахункові моделі для визначення їх напружено-деформованого стану розроблено з використанням загально визнаних положень механіки деформівного твердого тіла. Розроблені моделі апробовано на тестових задачах. В роботі забезпечено коректність математичних постановок задач.

Для створення алгоритмів чисельного розв'язання сформульованих задач застосовано обґрунтовані та апробовані числові методи.

Достовірність отриманих результатів.

В дисертаційній роботі приділено особу увагу перевірці достовірності отриманих результатів чисельного моделювання. Зокрема, достовірність результатів розрахунку за запропонованою автором моделлю термо-пружно-пластичного деформування елементів конструкцій досліджувалася на тестовому прикладі двома способами: порівнянням отриманих у роботі розрахункових значень з результатами експериментальних досліджень локального ударного навантаження сталюї оболонки та з результатами на основі методу скінченних елементів із залученням класичної та адаптованої моделі Купера-Саймондса, які реалізовані у програмному комплексі ANSYS.

Достовірність отриманих розв'язків прикладної задачі розділення обтічника кумулятивним зарядом та руйнування крипильних його елементів була перевірена автором через їх порівняння з даними натурних експериментів.

Достовірність результатів розрахунків за розробленими оболонковими моделями перевірялася їх порівнянням з результатами розрахунків, отриманими за тривимірними скінченно-елементними моделями в ANSYS.

Наукова новизна результатів дослідження.

До основних пунктів наукової новизни можна віднести наступні положення, які сформульовані у дисертації:

- запропоновано нову узагальнену модель динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій з полікристалічних матеріалів при імпульсному навантаженні, яка ґрунтується на поєднанні моделей нестационарного термопружного деформування і швидкісного пластичного деформування для урахування високошвидкісного зміцнення та температурного знеміцнення матеріалу;
- запропоновано нове рівняння напружено-деформованого стану у модифікованій формі Пежини з додатковими температурними множниками, в якому еквівалентні напруження залежать як від еквівалентних деформацій, так і від швидкості деформацій та від температури;
- на основі запропонованого рівняння напружено-деформованого стану вперше отримано уточнені динамічні напруження плити з оребренням під впливом газодинамічної ударної хвилі та пластини під впливом гідродинамічного ударного навантаження при урахуванні динамічних характеристик матеріалів елементів конструкцій будівельних споруд та оснастки для обробки матеріалів тиском;

- запропоновано нову розрахункову модель нестационарного деформування композитного корпусу твердопаливного двигуна у формі складеної оболонки обертання з ортотропними чи функціонально-градуйованими характеристиками;
- встановлено нові закономірності втрати динамічної стійкості обтічників ракет в надзвуковому газовому потоці, що моделюються оболонками у формі параболоїда обертання і підкріпленого шпангоутами конуса, та вперше досліджені їх форми коливань при втраті динамічної стійкості.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Матеріали роботи опубліковано в 65 наукових публікаціях. Серед них 42 статті у фахових виданнях, у тому числі 12 робіт у виданнях, які входять до науко-метричної бази Scopus. Слід відзначити, що ключові наукові положення дисертаційної роботи опубліковані в провідних журналах за тематикою досліджень, зокрема в *Meccanica*, *Nonlinear Dynamics*, *J. of Mathematical Sciences*, *Applied Mechanics and Materials*, *Defense Technology*, *Advances in Engineering Software* та *Int. J. of Protective Structures*. Також є 23 публікації автора у матеріалах Міжнародних конференцій і симпозіумів, серед яких *International Symposium on Impact Engineering*, *International Conference on Mechanics and materials in design*, *Workshop of dynamic behavior of materials and its applications in industrial processes*, *International Conference on Protective Structures*, *European Nonlinear Dynamics Conference*, *Conferences "Shell Structures. Theory and Applications"*.

Матеріали зазначених наукових робіт не входять до кандидатської дисертації М.В. Чернобрівко і повністю відображають основні положення розділів даної дисертаційної роботи.

Таким чином, публікації здобувача за кількісними показниками та повнотою викладення матеріалу дисертаційної роботи повністю відповідають чинним вимогам до докторських дисертацій.

Практичне значення і впровадження результатів досліджень.

Одержані в роботі результати можуть бути використані при проектуванні та удосконаленні відповідальних елементів конструкцій ракетно-космічної, авіаційної та машинобудівної галузей. Розроблені автором математичні моделі, методи та алгоритми становлять при цьому розрахункову базу для визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій при високошвидкісному механічному навантаженні, у т.ч. з врахуванням температурних полів.

Низка результатів досліджень вже була впроваджена на провідних підприємствах України. Зокрема, на ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля» використані моделі, методи та програми для: розрахунку динамічного напружено-

деформованого стану композитного корпусу твердопаливного двигуна в робочих режимах навантаження при старті ракети; визначення форми коливання обтічників ракет і ракет-носіїв при втраті динамічної стійкості в надзвуковому газовому потоці; перевірки працездатності елементів кріплення спеціальної ракетної конструкції при імпульсному навантаженні. У ТОВ «Науковий центр вивчення ризиків «РИЗИКОН» були реалізовані методи моделювання та програми розрахунку наслідків впливу ударно-хвильових навантажень на будівлі та будівельні споруди. У ВАТ НВП «ОСНАСТКА» – методика підвищення надійності і довговічності оснащення для обробки матеріалів тиском. На ДП «Харківський науково-дослідний інститут технології машинобудування» – математичні моделі, методи розрахунку та рекомендації з аналізу динамічної міцності захисних споруд і оснастки для формоутворення. На ДП «ЗМКБ «Прогрес» ім. академіка О. Г. Івченка» – математичні моделі та методики чисельного аналізу динамічної міцності елементів корпусів газотурбінних двигунів в умовах експлуатаційного руйнування лопаткового апарату.

Структура дисертаційної роботи, оцінка її завершеності в цілому.

У цілому за актуальністю, рівнем розв'язання наукової проблеми, обсягом теоретичних досліджень та обґрунтування застосовних моделей та розрахункових значень, за науковою новизною та практичним використанням отриманих результатів, дисертаційна робота М. В. Чернобривко, беззаперечно, є завершеним науковим дослідженням, яке відповідає вимогам, що формулюються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 364 найменування на 37 сторінках, та двох додатків на 19 сторінках. Дисертація містить 87 рисунків та 16 таблиць. Загальний обсяг дисертації складає 347 сторінок, з них 285 сторінок основного тексту. Структура, обсяг роботи та її оформлення відповідають вимогам МОН України до докторських дисертацій.

У вступі представлено кваліфікаційні ознаки дисертації.

Розділ 1 містить огляд літературних джерел та аналіз сучасного стану досліджень за темою дисертації.

У розділі 2 сформульовано крайову задачу просторового термо-пружно-пластичного високошвидкісного деформування твердого тіла. Запропоновано структурну схему числового розв'язання сформульованої задачі. Проведено аналіз достовірності результатів розрахунків за узагальненою моделлю для тестового прикладу.

У розділі 3 розв'язані прикладні задачі високошвидкісного деформування елементів конструкцій при імпульсному навантаженні, які ґрунтуються на за-

стосуванні термо-пружно-пластичної математичної моделі та числовому методі розв'язання тривимірної динамічної задачі.

У розділі 4 викладено методику дослідження процесу розділення обтічників ракет при спрацюванні лінійного кумулятивного заряду на основі сформульованого у другому розділі методу.

У розділі 5 досліджено динамічну нестійкість таких обтічників у випадку впливу на них надзвукової газової течії. Проаналізовано питання втрати їх динамічної стійкості та отримані форми втрати динамічної стійкості, які спостерігаються при зародженні автоколивань.

У розділі 6 проведено дослідження нестационарного деформування композитної сферично-циліндрично-сферичної оболонки під впливом імпульсного навантаження.

У розділі 7 досліджено процес руйнування кріпильних елементів головної частини спеціальної ракети під впливом газодинамічного імпульсного навантаження та додаткових статичних навантажень.

Висновки відображають результати роботи. Загальні висновки дисертації повністю відповідають її меті.

Докторська дисертаційна робота не містить матеріалів, викладених у кандидатській дисертації здобувача.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Зміст автореферату повною мірою відображає основні положення дисертаційної роботи та відповідає змісту розділів дисертації. Автореферат містить основні результати здійснених досліджень і дає змогу досить повно оцінити актуальність, наукову новизну і практичну цінність дисертації.

Дисертація та автореферат викладені українською мовою із дотриманням прийнятої у механіці термінології. Текст дисертації і автореферату викладені на належному науковому рівні. Стиль викладання матеріалу у дисертації та автореферату відповідає загальноприйнятим вимогам.

Зауваження по роботі.

При загальному високому рівні теоретичних і практичних результатів дисертації, були виявлені деякі недоліки. Зокрема:

1. У другому розділі роботи дана постановка задачі про термо-пружно-пластичний стан конструктивних елементів при імпульсних навантаженнях. Зазначена необхідність врахування температури при моделюванні високошвидкісного деформування матеріалу елемента. Однак не наведені чисельні дані, на підставі яких сформульовано зазначене твердження.

2. Відомо, що результати скінченно-елементного аналізу, зокрема механічні напруження, суттєво залежать від порядку та розміру скінченних елементу в околі розрахункової точки. Разом з тим в роботі не наведені рекомендації стосовно вибору зазначених параметрів і не досліджене питання збіжності результатів відповідних розрахунків.
3. У третьому розділі представлено чисельний розв'язок прикладної задачі зіткнення відірваної частини лопатки з оболонковою частиною корпусу газотурбінного двигуна і зазначено, що поява пластичного деформування оболонки залежить від швидкості "ударника" при зіткненні та площі контакту. Вплив маси "ударника" та температурного поля на напружений стан оболонки чомусь не обговорюється.
4. У п'ятому розділі показано, що при значеннях $\theta \geq 0.4\pi$ кутової координати вздовж твірної параболічної оболонки точність розрахунку власних частот методом Релея-Рітца зменшується у порівнянні з тривимірним скінченно-елементним розрахунком. Тому для дослідження коливань "високих" параболоїдів рекомендовано метод скінченних елементів. Але в розділі не приведено результатів, на підставі яких для "високих" параболоїдів можна рекомендувати метод скінченних елементів, і чому не можна рекомендувати його для "низьких".
5. Аналіз нестационарного деформування композитних корпусів твердопаливних двигунів проводився для осереднених властивостей матеріалу з різним напрямком волокон (шостий розділ). Слід було б показати, які математичні труднощі виникають при врахуванні можливого розшарування матеріалу по товщині виробу чи інших дефектів і які перспективи розв'язання таких задач.

Недоліки, які висловлені вище, не стосуються актуальності проведених досліджень, наукової новизни, достовірності та практичної цінності отриманих результатів і тому не знижують загальної позитивної оцінки дисертації в цілому.

Висновок про дисертацію в цілому і відповідність її чинним вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота Марини Вікторівни Чернобривко «Напружено-деформований стан елементів конструкцій при високошвидкісних навантаженнях» є завершеною науковою працею. Робота містить нові наукові результати, які спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми, яка полягає в розробці ефективних аналітично-числових методів дослідження динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій при дії імпульсного навантаження різної фізичної природи та застосуванні цих методів до розв'язання актуальних прикладних задач.

Розв'язана науково-технічна проблема, її наукова новизна, практична значимість одержаних результатів для промисловості у сукупності мають вагомe значення для науки та практики, що підтверджує відповідність дисертаційної роботи чинним вимогам.

Результати дисертаційної роботи відповідають меті та поставленим завданням. Автореферат у повній мірі відображає основний зміст роботи.

Тема, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (технічні науки).

Вважаю, що за актуальністю теми, науковим рівнем виконаних досліджень, науковою новизною отриманих результатів, їх практичною цінністю, обсягом виконаних досліджень дисертаційна робота «Напружено-деформований стан елементів конструкцій при високошвидкісних навантаженнях» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів...», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р., № 943 від 20.11.2019 р. та 607 від 15.07.2020 р., а її автор, Марина Вікторівна Чернобривко, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри динаміки і міцності машин
та опору матеріалів Національного технічного
університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

Ігор В. ЯНЧЕВСЬКИЙ

Підпис д-ра фіз.-мат. наук, професора І.В. Янчевського засвідчую.
Учений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО