

## ВІДГУК

офіційного опонента – заслуженого діяча науки і техніки України, в. о. завідувача відділу будівельної механіки тонкостінних конструкцій Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка Національної академії наук України, доктора технічних наук, професора Лугового Петра Захаровича на дисертацію Чернобривко Марини Вікторівни «**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ВИСОКОШВІДКІСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

### 1. Актуальність теми дисертації.

Елементи конструкцій з полікристалічних матеріалів, у тому числі і оболонкові елементи з різноманітними конструктивними особливостями у вигляді кільцевих ребер, достатньо широко застосовуються у багатьох галузях техніки: ракето-, літако-, кораблебудуванні, енергетичній, хімічній, нафто- та газовидобувній промисловості, у будівництві та інших. В останні роки в ракето- та літакобудуванні оболонкові корпусні елементи все частіше виготовляють з композитних матеріалів. Такі конструкції часто знаходяться в умовах екстремального високошвидкісного силового навантаження і тому надзвичайно важливою є необхідність розробки методів для отримання достовірного розрахунку напружене-деформованого стану, а також оцінки граничного стану, що виникає в процесі експлуатації. Надійна оцінка виникаючих в процесі експлуатації деформацій і напружень в елементах конструкцій при високошвидкісних навантаженнях має надзвичайно важливе значення для проектування і безпечної експлуатації об'єктів техніки і будівництва. Це досить актуальна проблема, вирішення якої все ще далеке від завершення.

Дисертаційна робота виконана у відповідності до програм і планів наукових робіт Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України за 6 держбюджетними науковими темами, 2 науковими темами за державним замовленням та 12 науковими темами за програмно-цільовою та конкурсною тематикою; а також договорами про наукове співробітництво з науковими установами Польщі та

за господарськими договорами з промисловими підприємствами України, зокрема з ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля». Це також є свідченням актуальності роботи.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

В дисертації здійснено всебічний аналіз експериментальних досліджень високошвидкісного деформування полікристалічних матеріалів та показана зміна фізико-механічних властивостей цих матеріалів при високошвидкісному деформуванні. Обґрунтовано необхідність урахування температури та швидкості деформації при моделюванні високошвидкісного деформування елементів конструкцій з полікристалічних матеріалів.

У дисертаційній роботі:

- наукові задачі досліджень поставлені коректно;
- при розробці моделей розрахунку використовуються відомі фізичні закони, експериментально визначені динамічні фізико-механічні властивості матеріалу, а також загальновизнані та адекватні гіпотези і припущення механіки деформівного твердого тіла при нестационарних навантаженнях;
- методи та алгоритми реалізації задач розроблено з зауваженням коректного математичного апарату та апробованих числових методів;
- одержані результати апробовано шляхом їх порівняння з деякими результатами досліджень інших авторів.

Таким чином, методологічно забезпечено необхідну ступінь обґрунтованості наукових положень сформульованих у дисертації.

У цілому можна вважати, що наукові положення, висновки та методи, які розвинуті в дисертації, достатньо обґрунтовані.

## **3. Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів досліджень, описаних у дисертаційній роботі, забезпечується дотриманням коректних процедур побудови моделей, а також застосуванням апробованих програмних засобів для реалізації розрахунків. Крім того, всі отримані результати числових досліджень автор перевіряє шляхом їх порівняння з даними експериментів, отриманими іншими авторами, або з результатами, отриманими за іншими моделями. Продемонстровано ефективність урахування динамічних фізико-механічних

властивостей матеріалу при визначені напружено-деформованого стану елементів конструкцій при високошвидкісному деформуванні.

#### **4. Наукова новизна отриманих результатів.**

В дисертаційній роботі автором було розроблено ефективні методи дослідження динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій внаслідок впливу високошвидкісного механічного навантаження різної фізичної природи. Застосовуючи ці методи, розв'язано прикладні задачі механіки для типових елементів конструкцій при імпульсному навантаженні. Досліджено вплив надзвукової газової течії на стійкість деяких оболонок обертання. Тому в цілому можна погодитися із формулюваннями складових наукової новизни у редакції, яка наведена у дисертації, а саме:

1. Запропоновано нову 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 зміщення та температурного знеміщення матеріалу;

2. Запропоновано нове рівняння напружено-деформованого стану у модифікованій формі Пежини з додатковими температурними множниками у формі Джонсона-Кука, в якому еквівалентні напруження залежать як від еквівалентних деформацій, так і від швидкості деформацій та від температури;

3. На основі запропонованої нової моделі динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій з полікристалічних матеріалів при імпульсному навантаженні вперше отримано уточнені розв'язки задач за термо-пружно-пластичним високошвидкісним деформуванням оболонкових елементів корпусу газотурбінного двигуна внаслідок обриву частини лопатки та локального пошкодження лопаток газотурбінних двигунів сторонніми предметами, та визначено локалізацію динамічних напружень в зоні ударно-імпульсного навантаження;

4. На основі запропонованого рівняння напружено-деформованого стану вперше отримано уточнені значення динамічних напружень 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;

5. Запропоновано нову розрахункову модель нестационарного деформування композитного корпусу твердопаливного двигуна у формі сферично-циліндрично-сферичної оболонки обертання з ортотропними чи функціонально-градуйованими характеристиками;

6. На основі запропонованої оболонкової моделі композитного корпусу отримано нові закономірності процесу деформування симетричної сферично-циліндрично-сферичної ортотропної оболонки, сферичні зрізані частини якої жорстко закріплені по лініям зрізу, при внутрішньому імпульсному навантаженні;

7. 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 виявлено їх форми коливань при втраті динамічної стійкості.

## **5. Практична цінність результатів дисертаційних досліджень**

В роботі значна увага приділяється висвітленню практичного використання отриманих результатів досліджень.

Теоретичне значення отриманих у роботі результатів полягає в розробці методології досліджень високошвидкісного деформування елементів конструкцій з полікристалічних матеріалів та побудові коректної математичної моделі, що дозволяє враховувати нелінійний зв'язок еквівалентних напружень з еквівалентними деформаціями, швидкістю деформацій та температури, які можуть застосовуватись у подальшому для розв'язку широкого кола інших задач.

Практична цінність полягає в можливості безпосереднього використання отриманих результатів у вигляді розроблених методик і створених програм розрахунку напруженно-деформованого стану зазначених елементів конструкцій та динамічної нестійкості вказаних оболонкових систем у практиці проектування реальних конструкцій.

Теоретичні та практичні результати, які викладені в дисертаційній роботі вже знайшли практичне застосування на таких провідних підприємствах України, як ДП КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля та ДП «ЗМКБ «Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченка», а також у ТОВ Науковий центр вивчення ризиків «РИЗИКОН», ВАТ НВП «ОСНАСТКА» і ДП «Харківський науково-дослідний інститут технологій машинобудування». Довідки про впровадження результатів досліджень додаються.

## **6. Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях.**

Матеріали дисертаційної роботи відображені у 65 публікаціях. Серед них 42 статті у фахових виданнях, у тому числі 12 робіт у виданнях за базою Scopus. Також 23 публікації у матеріалах міжнародних конференцій і симпозіумів.

Усі основні матеріали досліджень здобувача опубліковані у такій формі та із таким змістом, що відображають основні положення розділів дисертації. Особливо варто відзначити численні роботи у виданнях за базою Scopus.

Матеріали дисертаційної роботи було обговорено та схвалено на багатьох зарубіжних та вітчизняних профільних симпозіумах і конференціях. Це свідчить про широке доведення матеріалів роботи до наукової спільноти.

Зазначені наукові роботи були опубліковані після захисту кандидатської дисертації автора, результати якої не включалися до докторської дисертації.

Таким чином, публікації здобувача за кількісними показниками та повнотою викладення повністю відповідають чинним вимогам стосовно докторських дисертацій.

## **7. Оцінка мови та стилю викладення матеріалу в дисертації та автореферату. Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.**

Дисертація та автореферат викладені українською мовою із дотриманням термінології, що прийнята у механіці деформівного твердого тіла. Текст дисертації і автореферату викладені на належному науковому рівні. Стиль викладання матеріалу у дисертації та автореферату відповідає загальноприйнятим вимогам. Матеріал у дисертації структурований за розділами. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел (364 найменування) та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 347 сторінок, з них 285 сторінок основного тексту.

Оформлення, структура і обсяг роботи відповідають вимогам МОН України до докторських дисертацій.

Автореферат повністю відображає основні положення дисертаційної роботи. Зміст автореферату відповідає змісту розділів дисертації.

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

## **8. Оцінка змісту роботи і її завершеності.**

В цілому дисертаційна робота Чернобривко М. В. є завершеним науковим дослідженням. Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають її меті.

Рукопис роботи містить сім основних розділів.

У вступі визначено основні кваліфікаційні ознаки дисертації. Вони вписані чітко, обґрутовано та взаємно відповідають темі, завданням, методам, об'єкту, предмету, науковій новизні та змісту основних розділів і висновків.

Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертаційної роботи.

Розділ 1 знайомить із сучасним станом досліджень за темою роботи. Здійснений аналіз дав підстави для вибору напрямків і шляхів вирішення завдань дослідження.

У розділі 2 проводиться обґрунтування необхідності урахування температури та швидкості деформації при моделюванні високошвидкісного деформування елементів конструкцій з полікристалічних матеріалів. Запропоновано тривимірну узагальнену модель динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій під впливом імпульсного навантаження. Також наведено структурну схему розв'язання сформульованої задачі та проведено аналіз достовірності результатів розрахунків.

У розділі 3 представлено результати розв'язання практичних задач високошвидкісного деформування елементів конструкцій при локальному імпульсному навантаженні із застосуванням представленої у другому розділі узагальненої моделі. Досліджено достовірність отриманих результатів.

Розділ 4 відображає результати дослідження процесу розділення обтічників ракет при спрацюванні подовженого кумулятивного заряду. Моделювання процесу розділення обтічників проведено для усіченої конічної оболонки, але розроблена методика може бути застосована і для більш складної геометрії головного обтічника ракети.

У розділ 5 продовжено дослідження працездатності конструкцій обтічників ракет при експлуатаційних навантаженнях. Аналізується динамічна нестійкість обтічників, що знаходяться під впливом надзвукової газової течії. Запропоновано метод аналізу режимів автоколивань обтічників

у формі параболічної оболонки обертання та підкріпленої кільцями конічної оболонки. Аналізується втрата динамічної стійкості, що відповідає біфуркації Хопфа. Досліджено достовірність отриманих результатів.

Розділ 6 містить опис розв'язків прикладних задач про високошвидкісне деформування композитного корпусу твердопаливного двигуна ракети як складеної осесиметричної сферично-циліндрично-сферичної оболонки обертання з ортотропними або функціонально-градуйованими характеристиками. Отримано рівняння руху складеної оболонки під впливом внутрішнього імпульсного тиску, що враховують зсув та інерцію обертання. Досліджено деформування оболонкових конструкцій. Отримані чисельно-аналітичні результати порівнювалися з розрахунками аналогічної конструкції, розрахованої методом скінчених елементів з допомогою програмного комплексу ANSIS. Проведені порівняння показали хорошу узгодженість отриманих результатів.

Розділ 7 відображає розрахункові дослідження процесу руйнування кріпильних елементів першого та другого ярусів корисного вантажу головної частини спеціальної ракетної конструкції. Запропоновано методику комп'ютерного моделювання руйнування елементів конструкцій із застосуванням адаптованої моделі Купера-Саймондса в програмній системі ANSYS / Explicit Dynamics.

Висновки відображають результати роботи.

У роботі є список літературних джерел із 364 найменувань та додатків з актами та довідками про впровадження результатів дисертаційних досліджень.

У цілому за актуальністю та рівнем розв'язання наукової проблеми, обсягом теоретичних досліджень, їх всебічним обґрунтуванням, науковою новизною та практичним використанням отриманих результатів, дисертаційна робота Чернобривко М. В. відповідає вимогам, що ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

## **9. Зауваження до дисертаційної роботи.**

До дисертації можна зробити деякі зауваження:

1. У дисертаційній роботі надано значну кількість розв'язків прикладних задач за сформульованою узагальненою моделлю динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій з полікристалічних матеріалів при імпульсному навантаженні (див. розділ 3). Однак не досліджено вплив швидкості деформації та температури на загальний

напружено-деформований стан в зонах локалізації навантажень. Вважаю, що бажано було б провести такі дослідження.

2. У четвертому розділі проводиться порівняння чисельних результатів за моделлю Купера-Саймондса та динамічною білінійною моделлю. Однак по тексту роботи не приведено формулювання динамічної білінійної моделі. Okрім цього, не продемонстрована достовірність отриманих результатів розрахунків з допомогою скінчено-елементного програмного комплексу ANSYS.

3. У шостому розділі переміщення довільної точки циліндричної оболонки рівняння (6.2) записані згідно гіпотез С.П. Тимошенка, а приписуються іншому автору. Більшість результатів в даній роботі отримані з використанням гіпотез С.П. Тимошенка, але посилань на його роботи немає.

4. Дисертаційна робота включає в себе значну кількість числових результатів досліджень оболонкових конструкцій. У той же час недостатньою є інформація про алгоритми та програмні засоби розрахунку. Це ускладнює можливості практичного використання роботи.

5. В роботі виконано досить повне порівняння отриманих результатів дослідження власних частот та форм вільних коливань корпусних оболонкових елементів конструкцій ракет з результатами розрахунків за скінченно-елементними моделями. При цьому відсутні пояснення, яким чином ці розрахунки було виконано в ANSYS.

Зазначені недоліки не стосуються актуальності проведених досліджень, наукової новизни, достовірності та практичної цінності отриманих результатів і тому не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи у цілому.

## **10. Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам.**

В цілому дисертаційна робота Чернобривко Марини Вікторівни «Напружено-деформований стан елементів конструкцій при високошвидкісних навантаженнях» є завершеною кваліфікованою науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми, що полягає в розробці ефективних аналітично-числових методів дослідження динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій внаслідок впливу імпульсного

навантаження різної фізичної природи і надзвукової газової течії та застосуванні цих методів до розв'язання актуальних прикладних задач.

Робота має вагоме значення для науки та промисловості. Розв'язана науково-технічна проблема, її наукова новизна, а також практична спрямованість одержаних результатів та їх впровадження у сукупності мають вагоме значення для науки та практики, що підтверджує відповідність дисертаційної роботи чинним вимогам.

Тема, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (технічні науки). Результати дисертаційної роботи відповідають меті та поставленим завданням, а автореферат відображає основний зміст роботи.

Вважаю, що за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, науковим рівнем виконаних досліджень, новизною отриманих результатів, їх практичною цінністю 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 та 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 Чернобривко Марина Вікторівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,  
в. о. завідувача відділу будівельної механіки  
тонкостінних конструкцій  
Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка  
НАН України доктор технічних наук,  
професор, Заслужений діяч  
науки і техніки України,

П. З. Луговий

Підпис Лугового П.З. засвідчує  
Вчений секретар Інституту механіки  
ім. С. П. Тимошенка НАН України  
доктор фіз.-мат. наук



О.П. Жук