

**ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Паценка Сергія Олександровича

“Розв'язання тривимірних задач терморадіаційної повзучості елементів конструкцій”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла

**Актуальність теми дисертаційної роботи.**

В даний час явище терморадіаційної повзучості залишається недостатньо вивченим. Задачі дослідження терморадіаційної повзучості найчастіше виникають при проектуванні елементів конструкцій ракетно-космічного та енергетичного машинобудування. Порівняно зі звичайною високотемпературною повзучістю, терморадіаційна повзучість потребує одночасного урахування декількох механізмів деформування та накопичення пошкоджень в матеріалі. Розробка методів розв'язання тривимірних задач терморадіаційної повзучості та пошкоджуваності залишається актуальною проблемою механіки деформівного твердого тіла і потребує створення сучасних моделей деформування матеріалів, які враховують основні експериментально встановлені закономірності, а також розробки або вдосконалення універсальних методів розв'язання нелінійних початково-крайових задач.

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерного моделювання процесів та систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» відповідно до держбюджетної теми МОН України. Розшифровка зазначеної теми наводиться в дисертації (стор. 9) та авторефераті (стор.1).

**Характеристика змісту роботи.**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі досліджень, основні наукові результати, їх наукова новизна й практичне значення, зазначений особистий внесок автора у роботи з співавторами, інформацію про апробацію результатів досліджень.

Перший розділ містить аналіз сучасного стану проблеми, огляд літературних джерел, що відносяться до терморадіаційної повзучості. Наведено досить докладний аналіз робіт теоретичної та експериментальної спрямованості, присвячених розробці рівнянь стану, що враховують повзучість та пошкоджуваність матеріалу в умовах радіаційного опромінювання, а також праць, в яких досліджується терморадіаційна повзучість та тривала міцність елементів конструкцій в умовах статичного та динамічного навантажень. Окрему увагу приділено аналізу публікацій, що відносяться до досліджень нестационарної теплопровідності для моделювання різноманітних температурних режимів. Також виконано аналіз робіт, присвячених розробці методів розв'язання нелінійним початково-крайових задач механіки. На основі проведеного аналізу зроблено ви-

сновок щодо недостатньої розробленості методів розв'язання тривимірних задач повзучості для конструктивних елементів складної форми, які враховують комплексний вплив температурно-силових та радіаційних полів.

Другий розділ дисертації присвячено вдосконаленню методу скінченних елементів для розв'язання тривимірних задач повзучості та нестационарної теплопровідності. Виконано математичну постановку тривимірної початково-крайової задачі повзучості та пошкоджуваності. Постановка задачі враховує дію неоднорідних температурних полів та радіаційного опромінювання. При цьому вважається, що тензор повних деформацій є адитивною величиною тензорів пружних, температурних, деформацій радіаційної повзучості, деформацій повзучості та деформації радіаційного розпухання. Рівняння стану дозволяють описувати як стаціонарну, так і періодичну дію температурно-силових полів. Кратко сформульовано задачу нестационарної теплопровідності. В цьому ж розділі виконано скінченно-елементні формулювання задач терморадіаційної повзучості та нестационарної теплопровідності. Наведено опис запропонованого в роботі тривимірного скінченного елемента. Описано метод розв'язання початково-крайових-задач, що базується на спільному застосуванні методу скінченних елементів та різницевих методів інтегрування за часом. Обговорено особливості розроблених алгоритмів та програмних комплексів. Наведено результати розв'язання тестових завдань, які продемонстрували задовільний збіг з аналітичними розв'язками та розв'язками, отриманими за допомогою програмного комплексу ANSYS.

У третьому розділі, за допомогою розробленого дисертантом методу та програмних засобів, виконані дослідження температурних полів та напружено-деформованого стану в елементах навігаційних приладів, що розміщуються на космічних апаратах. Розглянуто складові частини волоконно-оптичних гіроскопів та платформа, на якій вони розташовуються. Показано, що запропонований підхід дозволяє виконувати уточнені розрахунки конструктивних елементів, що знаходяться в умовах складного навантаження. Зокрема досліджено вплив температурного поля на повзучість волоконно-оптичного провідника гіроскопу з урахуванням режимів температурного циклування внаслідок руху супутника навколоземною орбітою.

У четвертому розділі автором розв'язуються суттєво тривимірні задачі повзучості для конструктивних елементів складної форми, що працюють в умовах комплексної дії механічних, температурних навантажень та радіаційних полів. Розглянуто амортизатори, елементи системи кріплення та трійникове з'єднання трубопроводу. Досліджено внесок різних факторів в процеси деформування та перерозподілу напружень за часом. Проаналізовано напружено-деформований стан при комплексній дії повзучості та радіаційного розпухання при термосиловому навантаженні. Встановлено, що повзучість матеріалу суттєво зменшує рівень напружень, обумовлених ефектами радіаційного розпухання.

### **Наукова новизна результатів дисертації.**

Підсумовуючи аналіз роботи, можна виділити наступні нові наукові результати, що одержані дисертантом:

1. Вдосконалено метод розрахунку повзучості та пошкоджуваності в тривимірних елементах конструкцій, що знаходяться під дією механічних, температурних навантажень та радіаційного випромінювання. Математична постановка задачі дозволяє враховувати пошкоджуваність внаслідок повзучості та радіаційну пошкоджуваність, а також періодичну дію навантажень. Метод базується на спільному використанні методу скінченних елементів та різницевих методів інтегрування за часом.

2. Розроблено нові підходи до розв'язання тривимірних початково-крайових задач повзучості числі за допомогою розподілених обчислень за технологіями багатопоточності CUDA, OPENCL та бібліотеки THREAD, що дозволило суттєво скоротити час обчислень.

3. За допомогою експериментального та чисельного моделювання визначено нові закономірності роботи волоконно-оптичних гіроскопів, досліджено процес деформування волоконно-оптичного провідника з урахуванням процесів повзучості та пошкоджуваності, що мають місце при дії температурно-силових та радіаційних полів. Визначено час до руйнування волоконно-оптичного провідника при різних типах протирадіаційного захисту.

4. Встановлено нові закономірності деформування в умовах повзучості тривимірних елементів конструкцій. Показано, що для моделей амортизаторів, які піддано нерівномірному стисканню в умовах повзучості, строк служби скорочується практично в два рази у порівнянні з випадком їхнього рівномірного навантаження. Для трійникового з'єднання системи охолодження ядерного реактору, що знаходиться в умовах спільної дії внутрішнього тиску, теплового та радіаційного полів, встановлено що повзучість матеріалу суттєво зменшує рівень напружень, обумовлених ефектами радіаційного розпухання.

### **Оцінка достовірності отриманих результатів.**

Достовірність числових результатів розрахунку повзучості, пошкоджуваності та часу до руйнування елементів конструкцій, розглянутих у дисертації, забезпечується строгістю математичної постановки задачі, використанням універсальних математичних методів, розв'язанням тестових задач та зіставленням із розв'язками інших авторів та експериментальними даними.

### **Практична цінність роботи.**

Розроблений в дисертації програмний комплекс для розв'язання тривимірних початково-крайових задач терморадіаційної повзучості, що базується на використанні метода скінченних елементів, може становити базу інженерних розрахунків повзучості, пошкоджуваності і тривалої міцності конструктивних елементів, що знаходяться під дією механічних, температурних навантажень та

радіації. Результати роботи впроваджено у практику проектування НВП "ХАРТРОН АРКОС ЛТД", про що свідчить відповідний акт (додаток Б). Також результати дисертаційної роботи використано при виконанні держбюджетної теми МОН України «Розробка методів та алгоритмів розрахунку впливу теплових полів на працездатність приладів та елементів ракетно-космічної техніки» (Д.Р. № 0117U0004891, 2017-2018 рр.), де здобувач був виконавцем окремих розділів (додаток В).

### **Апробація результатів.**

Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 13 наукових конференціях, в тому числі міжнародних. Перелік конференцій наведено на стор. 10 дисертації. Робота в повному обсязі розглядалась та обговорювалась на засіданні НТПР ІПМаш НАН України.

Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані у 21 науковій праці, серед яких 5 статей у фахових виданнях за переліком ДАК МОН України (одна з них - у виданні, що індексується науково-метричною базою Scopus). Також дисертант має 1 свідоцтво на авторське право на програмний комплекс (додаток Д).

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових виданнях.

Автореферат у достатній мірі відбиває основні положення та отримані автором результати досліджень.

### **Зауваження по дисертації.**

1. Автором припускається, що сумарна пошкоджуваність є адитивною величиною пошкоджуваності внаслідок повзучості і радіаційної пошкоджуваності. Теоретично, рівняння (2.7), (2.8) можуть бути проінтегровані, поки значення обох скалярних параметрів пошкоджуваності будуть менше або дорівнювати одиниці. Отже, граничне значення сумарної пошкоджуваності може дорівнювати 2, що є з точки зору механіки континуальної пошкоджуваності нісенітницею. Автору необхідно було б конкретизувати критичне значення сумарної пошкоджуваності, та сформулювати критерій завершення прихованого руйнування..
2. Визначальні рівняння повзучості (2.7), (2.63) включають в себе тензорний параметр зміцнення у вигляді компонент тензора деформацій повзучості. Отже, згідно цих рівнянь, при повзучості має місце анізотропне зміцнення. При цьому в дисертації не сказано, які базові експерименти

необхідні для ідентифікації параметрів повзучості, та які обмеження накладаються на параметри, наприклад у випадку від'ємних деформацій повзучості.

3. Для розв'язання тестової задачі повзучості стрижня (розділ 2.12.9) автору знадобилося 9430 елементів у скінченноелементній моделі. Не зрозуміло, чим обумовлена така велика кількість скінченних елементів для розв'язання одновимірної задачі, напружений стан в якій близький до однорідного?
4. У розділі 3.2.5 при дослідженні НДС та пошкоджуваності котушки волоконно-оптичного гіроскопу автор робить висновок, що руйнування відбувається при досягненні сумарної пошкоджуваності деякого критичного значення  $\omega_*$ , величина якого не конкретизується. При цьому графіки для параметра пошкоджуваності, у точках, де починається руйнування, в роботі не наведено. На рис. 3.33 показані графіки для інтенсивності напружень і деформацій повзучості. Ці графіки малоінформативні і не відображають процес накопичення пошкоджень в матеріалі. Треба було б вказати критичне значення для параметра пошкоджуваності, навести графіки зростання пошкоджуваності (сумарної, внаслідок повзучості та радіаційної) в точці, де починається руйнування, та проаналізувати відносний вклад кожного типу пошкоджуваності в сумарну.
5. У розділі 4.2 (формули (4.1), (4.2)) наведено два набори констант повзучості для алюмінієвого сплаву АМГ6 у температурному діапазоні від 127 °С до 157 °С, отриманих в наземних умовах та у вакуумі, які суттєво відрізняються один від одного. При цьому пружні характеристики в наземних умовах та у вакуумі не відрізняються. Відомо, що випробовування деяких жароміцних матеріалів, при температурах понад 1000 °С, дійсно проводять у вакуумі щоб унеможливити вплив згоряння повітря на механічні властивості матеріалу. В нашому випадку температура випробувань є досить невеликою і ніякого горіння відбуватися не може. Автором не пояснено, чим обумовлена відмінність характеристик повзучості. В подальшому в дисертації проведено співставлення результатів розрахунку повзучості системи кріплення сонячних панелей, отриманих за допомогою обох наборів констант. Якщо припустити, що характеристики повзучості відрізняються за

рахунок того, що були отримані при різних рівнях напружень, то ці порівняння та співставлення не мають ніякого сенсу.

6. У розділі 4.2. автором проведено дослідження повзучості кріплення сонячних панелей із алюмінієвого сплаву, яка виникає внаслідок нерівномірного нагріву конструкції. З показаних рисунків та графіків розподілу напружень видно, що інтенсивність напружень у всі моменти часу менше 7 МПа, що дуже мало для того, щоб проявилася повзучість. Зазвичай випробування алюмінієвих сплавів на повзучість проводять в діапазоні напружень від 50 до 250 МПа. Й, взагалі, незрозуміло, що хотів сказати автор, наводячи графіки напружень, що змінюються в діапазоні від 7 МПа до 0.008 МПа. При цьому, в роботі не надано інформації щодо величин деформацій та переміщень.
7. На стор. 138 автор стверджує: “Відомо, що швидкість зміни інтенсивності напружень прямо пропорційна швидкості зміни параметру пошкоджуваності”. Далі, порівнюючи графіки релаксації інтенсивності напружень (рис. 4.7 та 4.8) робиться висновок: “Це дозволяє припустити, що у космічних умовах пошкоджуваність може зростати швидше, ніж у наземних.” Якщо припустити, що перше висловлювання має сенс, то висновок має бути протилежним, оскільки з графіків видно, що у вакуумі (рис. 4.8) релаксація відбувається повільніше, чим у наземних умовах (рис. 4.7, крива 1). Оскільки в даному випадку фізичні рівняння не враховують явище пошкоджуваності і, відповідно відсутні будь які результати для параметра пошкоджуваності, то робити такі припущення некоректно.

Зважаючи на широкий круг проблем і задач, порушених у дисертації, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

### **Висновок**

На підставі викладеного вважаю, що дисертація Паценка Сергія Олександровича “Розв'язання тривимірних задач терморадіаційної повзучості елементів конструкцій” є завершеною науковою працею. В ній отримано нові наукові результати, які у сукупності розв'язують наукову задачу, що пов'язана із розробкою методу розрахунку терморадіаційної повзучості елементів конструкцій.

Дисертаційна робота за актуальністю, рівнем вирішення основних наукових задач, науковою новизною, відповідає вимогам, зокрема пп. 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів» (зі змінами), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04. – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,  
старший науковий співробітник відділу математичного  
моделювання й оптимального проектування  
Інституту проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України  
д. т. н.

С.М. Склепус

Підпис д.т.н. Склепуса С.М. засвідчую  
Учений секретар  
Інституту проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України



К.В. Максименко-Шейко