

АНОТАЦІЯ

Петров О.Д. Моделювання термомеханічної поведінки матеріалів з пам'яттю форми. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
Дніпро, 2019.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню поведінки матеріалів з пам'яттю форми та псевдо-пружно-пластичністю. Пам'яттю форми називають властивість деяких матеріалів накопичувати деформації визначеної величини при навантаженні, а потім через петлю гістерезіса повертатися у вихідне положення після розвантаження. Основним механізмом при цьому є зворотне мартенситне перетворення між фазами твердого тіла, яке може мати місце при порівняно незначній зміні температури. Таке перетворення може бути викликано зміною температури або зміною напруги.

До матеріалів, які проявляють пам'ять форми, псевдо-пружність та псевдо-пружно-пластичність зазвичай відносять наступні: NiTi AgCd, AuCd, CuAlNi, CuSn, CuZn, FePt, MnCu, FeMnSi, CoNiAl, CoNiGa, NiFeGa, TiPd, NiTi, NiTiNb, NiMnGa .

У роботі виконано аналітичний огляд феноменологічних та структурних моделей. Сплави, які мають властивість пам'яті форми, псевдо-пружність та псевдо-пружно-пластичність являють собою особливу групу сплавів, що володіють здатністю відновлювати колишню форму навіть після досить великих деформацій. Якщо при низьких температурах матеріал з пам'яттю форми, псевдо-пружністю та псевдо-пружно-пластичністю деформується пластично, то при цьому деформація може бути поновлена за допомогою порівняно незначного збільшення температури. Механізмом

такого поновлення є перетворення з мартенситної фази у початкову аустенітну фазу. Мартенситні перетворення зазвичай діляться на дві групи термопружні і нетермопружні.

Нетермопружні перетворення здійснюються головним чином в сплавах заліза і пов'язані з немобільними границями вихідної фази мартенситу, скріпленими постійними дефектами і переходять в наступне створення ядра і його збільшення. Такі перетворення кристалографічно незворотні в тому сенсі, що мартенсит не може повернутися до вихідної фази орієнтації.

Термопружні мартенситні перетворення пов'язують з мобільними межами між вихідною і мартенситною фазою. Межі між ними здатні до зворотного руху за рахунок усадочної деформації пластин мартенсита.

Ключова характеристика матеріалів з пам'яттю форми, псевдопружністю та псевдо-пружно-пластичністю - виникнення мартенситного фазового перетворення між фазою аустеніту і різними варіантами низькотемпературної, низько симетричної мартенситної фази. Мартенситне перетворення являє собою головним чином перетворення зсуву, яке позбавлено дифузії при фазових переходах в твердому тілі. Воно супроводжується створенням ядра і збільшенням мартенситної фази з вихідної фази аустеніту.

Такі характеристики роблять матеріали з пам'яттю форми, псевдопружністю та псевдо-пружно-пластичністю зручними для використання в радіоелектронних елементах конструкцій і пристроях або в якості складових частин у деяких передових композиційних матеріалах. Сплав NiTi застосовується в більшості випадків через його пам'ять та структурні властивості.

Перші матеріали з пам'яттю форми, псевдопружністю та псевдо-пружно-пластичністю були розроблені в середині минулого століття, однак точних і надійних визначальних моделей континуального рівня, необхідного для практичних застосувань матеріалів поки не існує. Зв'язок між

мікроскопічною і макроскопічною поведінкою таких матеріалів складний і досі не розроблений до необхідного ступеня. Частково це пов'язано з досить сильною залежністю механічної реакції на температуру, швидкість навантаження, діапазон деформації, геометрію досліджуваного тіла, термомеханічну історію, природу навколишнього середовища, а також взаємодії між цими параметрами. Такі сплави, як NiTi, CuZnAl, CuAlNi, AuCd та інші можуть відновлювати деформації до 3% .

За результатами аналізу встановлено, що в даний час існує цілий ряд моделей для опису термомеханічного поведінки сплавів з пам'яттю форми, псевдо-пружністю та псевдо-пружно-пластичністю. Більшість з них будуються на підставі класичних уявлень, тобто ставлять собі за мету безпосереднє описати експериментальні дані, отримані на різних макрозразках при простому і складному навантаженні. Однак, як встановлено в експериментальних дослідженнях поведінка матеріалу в точці тіла в загальному випадку відрізняється від поведінки зразка в цілому.

Новизна запропонованого у дисертації підходу полягає в формулюванні феноменологічної моделі для опису властивостей матеріалів з пам'яттю форми і термо-псевдо-пружно-пластичністю в точці з урахуванням тепла, що виділяється в процесі фазового переходу. Деформація в точці представляється у вигляді суми пружною складової, стрибка деформації при фазовому переході, деформації, викликаній температурними змінами і пластичної деформації. Остання в дисертаційній роботі визначається за допомогою співвідношень теорії течії. При цьому передбачається, що властивості матеріалу залежать від температури. Для опису пружної деформації і деформації фазового перетворення використовувалася діаграма псевдо-пружного матеріалу, що складається з трьох прямолінійних або нелінійних ділянок.

Таке трактування теорії призводить до нестійкої діаграмі напруження-деформація і для опису термомеханічного поведінки зразків різної форми вимагає рішення граничної задачі з урахуванням розвитку фронту деформації

фазового перетворення. У цій моделі враховується не тільки температура навколишнього середовища, але і тепло, що виділяється в тілі при фазовому переході. Це дозволило описати цілий ряд експериментальних даних на різних зразках при різних умовах навантаження, включаючи температурний і силовий вплив. Встановлено конкретні залежності для механічних параметрів.

На підставі даного підходу показано, що межа розділу фаз переміщається з постійною для обраної температури швидкістю. Встановлено, що класичні діаграми матеріалів представляють собою криву, що огинає сімейство діаграм матеріалу, яке побудовано для певних законів зміни швидкості фронту розриву деформацій.

Користуючись узагальненими фізичними співвідношеннями розширено межі застосування відомого методу по компонентного розщеплення. Розроблено новий варіант ефективного методу розв'язання нестационарних просторових задач термомеханіки у випадку деформування термо-псевдо-пружно-пластичного матеріалу. Метод заосновано на використанні ідеї розщеплення повної системи рівнянь за геометричними властивостями та застосуванні для апроксимації невідомих величин та їх похідних по координатах двовимірних напружених сплайнів. Такий підхід дозволив підвищити до четвертого порядку точність апроксимації методу. Це дало можливість обирати більшу за розмірами сітку по координатах в порівнянні з кінцево-різницеvim методом при досягненні однакової точності обчислень. Для підвищення до третього порядку апроксимації метода за часом запропонована ітерційна процедура, що збігається. Початковим наближенням для неї будуть результати, обчислені за допомогою формул явної схеми методу розщеплення.

Досліджена ефективність узагальненого методу та проведена оцінка точності отриманих результатів. У разі застосування неявних схем методу розщеплення за геометричними властивостями встановлена збіжність відповідної ітераційної процедури.

Поставлено і на основі запропонованого методу розв'язано новий клас задач про нестационарне деформування просторових тіл зі сплавів, що мають властивості пам'яті форми, псевдо-пружності, термо-псевдо-пружно-пластичності.

Виявлено нові механічні ефекти пов'язані з урахуванням локального тепловиділення в процесі фазових перетворень в тілах з псевдо-пружно-пластичних матеріалів, та їх форми і розмірів.

Результати дисертаційної роботи використані в рамках досліджень, які здійснені у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара за темами держбюджетних робіт № 1-301-15 «Розробка методик розв'язку фундаментальних задач міцності та руйнування кусково-однорідних тіл, скомпонованих з інтелектуальних матеріалів» (№ ДР 015U002393) та Дніпровському державному технічному університеті по держбюджетній науково-дослідницькій темі «Методи дослідження міцності елементів конструкцій із функціонально-неоднорідних матеріалів, чутливих до виду термонапруженого стану» (номер державної реєстрації № 0113U000379, 2013-2015 рр.)

Також результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара при викладанні навчальної дисципліни «Теорія пластичності» і «Нелінійна механіка руйнування», Дніпровського державного технічного університету при викладанні навчальної дисципліни «Математичне моделювання технологічних процесів», Національного авіаційного університету при викладанні дисциплін «Сучасні комп'ютерні технології в фізиці» та «Методи математичної фізики».

Ключові слова: пам'ять форми, фазові переходи, теорія псевдо-пружно-пластичності, теорія течії, двовимірні сплайни.

Список публікацій здобувача

Основні наукові результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України,

які входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Petrov A. Development of the method with enhanced accuracy for solving problems from the theory of thermo-pseudoelastic-plasticity / A.Petrov, Yu.Chernyakov, P.Steblyanko, K.Demichev, V.Haydurov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4/7 (94). P. 25–33.

Статті у наукових виданнях інших держав:

2. Domichev K. Iterative methods improved accuracy for solving nonstationary problem thermomechanics / K.Domichev, P.Steblyanko, A.Petrov // Collective monograph on Theoretical and experimental aspects of revealing and solving the current issues of fundamental sciences, International Academy of Science and Higher Education, London, United Kingdom, 2017. – P. 27-29.

3. Steblyanko P. Phenomenological Model of Pseudo-Elastic-Plastic Material Under Nonstationary Combining Loading / P.Steblyanko, Y.Chernyakov, A.Petrov, V.Loboda // Structural Integrity, Volume 8, Theoretical, Applied and Experimental Mechanics, Springer Verlag, 2019.- P. 205-208.

Монографія:

4. Демічев К.Е. Математичне моделювання термомеханічних процесів в пружно-пластичних циліндричних тілах / К.Е.Демічев, П.О.Стеблянко, Ю.А.Черняков, О.Д.Петров - К.: Вид-во Київського міжнародного університету (ISBN 978-917-651-178-6), 2017. – 169 с.

Статті у наукових фахових виданнях України:

5. Petrov A. Behavior of material with a memory of form and pseudo-elasticity under nonstationary loading of the body / A.Petrov // Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Фізико-математичні науки. - 2017. - №1. - С. 37-42.

6. Шевченко Ю.Н. Численные методы в нестационарных задачах теории термопластичности / Ю.Н. Шевченко, П.О. Стебляк, А. Петров // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць.- Випуск 22.- Дніпропетровськ, 2014.- С. 250-264.

7. Черняков Ю.А. Модель поведінки псевдоупругого матеріала при нестационарному навантаженні / Ю.А.Черняков, П.А.Стебляк, А.Д.Петров // Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. № 2. 2017. – С. 297-303.

8. Петров А. Феноменологическая модель поведінки псевдоупруго-пластического матеріала при нестационарному навантаженні / А. Петров // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наукових праць.- Випуск 28.- Дніпро, 2018.- С. 133-141.

9. Петров О.Д. Комп'ютерне моделювання поведінки стрижня з трилінійного двофазного матеріалу при розтягуванні / О.Д. Петров // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання; матеріали статей МНПК (ISBN 978-617-7468-26-3) - 2018. - Івано-Франківськ.- 2018.- С. 234-237.

Статті у наукових фахових виданнях України, що додатково відображають результати дисертації

10. Петров А. Расчет полей пластических деформаций при термосиловом навантаженні / А.Петров // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Випуск 1(24).– Дніпродзержинськ, 2014. – С. 211-216.

11. Петров А. Термо-напружено-деформований стан стрижня з неоднорідного матеріалу при наявності фазових перетворень / А.Петров, Ю.Черняков // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Випуск 1(26), додаток, розділ Математичні проблеми технічної механіки . –Дніпродзержинськ, 2015. – С. 26-36.

12. Петров А.Д., Экспериментальное обоснование варианта модели поведение материала с памятью формы и псевдоупругостью / А.Д.Петров, К.Э. Демичев, П.А.Стеблянко, Ю.А.Черняков // Моделювання та інформаційні технології : зб. наук. пр. Інституту проблем моделювання в енергетиці ім Г.Є. Пухова НАН України, №80. –2017. – С. 81-87.

Тези наукових доповідей

13. Петров О.Д. Феноменологічна модель термо-пружно-пластичної поведінки матеріалу з пам'яттю форми / О.Д.Петров, Ю.А.Черняков, П.О.Стеблянко // Сучасні проблеми механіки та математики: зб. наукових праць / за заг.ред. А.М. Самойленка та Р.М. Кушніра // Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, вересень 22–25 2018. – Т.1. – Ресурсу: www.iapmm.lviv.ua/mpmm2018 .- С. 188-189 .

14. Shevchenko Yu. Methods of calculation in non-stationary problems of theory thermal-plasticity / Yu.Shevchenko, P.Steblyanko, A.Petrov // Applied problems of the fluid mechanics and heat and mass transfer, November 6-8 2014, Dnipropetrovsk. - 2014.- P. 9-11.

15. Петров А. Связанная нестационарная задача термопластичности для срединного слоя / А. Петров, Ю.Черняков, П. Стеблянко // VII International Conference «Modern achievements of science and education», August 25 – September 01 2012 p., Opatija (Croatia). – P. 20-22.

16. Петров А. Методи розв'язання нестационарних задач для складових пластин / А.Петров, Ю.Черняков, П.Стеблянко // IX МНК Математичні проблеми механіки неоднорідних структур Інститут проблем

механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, вересень 15–19 2014.– Львів, 2014. – С.135-137.

17. Петров А. Определения перемещений точек тела в некоторых задачах механики путем непосредственного интегрирования / А.Петров, П.Стеблянко // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 13–15 2011. Том 2. – Дніпропетровськ –Дніпродзержинськ. – 2011. – С. 40-42.

18. Петров А. Связанная задача термо-упруго-пластичности с фазовым переходом/ А.Петров, Ю.Черняков, П.Стеблянко // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 16–19 2012. Том 1 .– Дніпропетровськ – Дніпродзержинськ. – 2012. – С. 52-54.

19. Петров А. Связанная контактная задача термо-упруго-пластичности / А.Петров, Ю.Черняков, П.Стеблянко // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 15–18 2013. Том 2. – Дніпродзержинськ. – 2013. – С. 14-18.

20. Петров А. Расчет полей пластических деформаций при термосиловом нагружении / А.Петров // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 14–17 2014. Том 2. – Дніпропетровськ – Дніпродзержинськ. –2014.–С. 39-42.

21. Стеблянко П. Описание термомеханической поверхности материала при помощи двумерного сплайна / П.Стеблянко, А.Галишин, А.Петров // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 14–17 2015 .– Дніпродзержинськ. – 2015. – С. 126.

22. Петров А. Моделирование псевдоупругого поведения сплавов с памятью формы/ А.Д.Петров, Ю.А.Черняков // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 18–21 2016. – Дніпродзержинськ, Дніпропетровськ, Київ. – 2016. – С. 121.

23. Черняков Ю.А. Модель поведінки матеріалу з пам'яттю форми і псевдо пружністю/ Ю.А.Черняков, О.Д.Петров, П.О.Стеблянко // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 18–20 2017.– Дніпропетровськ – Дніпродзержинськ. – 2017. – С. 14-15.

24. Демічев К.Е. Аналіз інструментальних засобів комп'ютерного моделювання поведінки пружно-пластичних тіл / К.Е.Демічев, П.О.Стеблянко, Ю.А.Черняков, О.Д.Петров // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 18–19 2017 . Том 2. – Дніпро, Кам'янське. – 2017. – С. 9-12.

25. Стеблянко П.О. Числові методи в просторових стаціонарних і нестаціонарних задачах теорії термопружнопластичності / П.О.Стеблянко, Ю.А.Черняков, О.Д.Петров // МНК Математичні проблеми технічної механіки, квітень 16–19 2018. – Київ, Черкаси, Кам'янське. – 2018. – С. 14-15.

26. Петров О.Д. Модель термо-пружно-пластичної поведінки матеріалів з зубом плинності / О.Д.Петров, Ю.А.Черняков, П.О.Стеблянко // МНК Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики, квітень 15–18 2019. – Дніпро, Кам'янське. – 2019. – С. 6-7.