

Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu **SK-CN-RD-18-0005****Multiškálová flexoelektrická teória a nova metóda na detekciu mikrotrhlín v dielektrikach v realnom čase**Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Jan Sladek, DrSc.**Príjemca **Ústav stavebníctva a architektúry SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav stavebníctva a architektúry SAV Bratislava

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

State Key Laboratory for Strength and Vibration of Structures,
School of Aerospace,
Xi'an Jiaotong University
Xi'an 710049, China

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

žiadne

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

- [1] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, C.L. Tan: Crack analysis of solids with gradient thermo-piezoelectricity. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 103 (2019) 102267.
- [2] J. Sladek, V. Sladek, M. Jus: The MLPG for modeling of flexoelectricity. AIP Conference Proceedings 2116 (2019) 450005, <https://doi.org/10.1063/1.5114472> .
- [3] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, C.L. Tan: Size dependent thermo-piezoelectricity for in-plane cracks. Key Engineering Materials 827 (2019) 147-152.
- [4] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, S. Schmauder: Gradient theory for crack problems in quasicrystals. European Journal of Mechanics / A Solids 77 (2019) 103813.
- [5] V. Sladek, J. Sladek, M. Repka: Mesh-free analysis of plate bending problems by Moving finite element approximation, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 126 (2019), pp. 211-223, ISSN 1743-3533.
- [6] O. Hrytsyna, H. Mroz: Some general theorems for local gradient theory of electrothermoelastic dielectrics, Journal of Mechanics of Materials and Structures 14 (2019) 25-41.
- [7] O. Hrytsyna, V. Kondrat: Local gradient theory for thermoelastic dielectrics: Accounting for mass and electric charge transfer due to structural changes. Journal of Mechanics of Materials and Structures, Vol. 14, No. 4, (2019) P. 549-568.
- [8] X. Tian, M. Xu, Q. Deng, J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, Q. Li: A general explicit solution to a micro-hole in flexoelectric solids, Acta Mechanica 231 (2020) 4851-4865.

- <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02792-7>
- [9] L. Sator, V. Sladek, J. Sladek: Analysis of coupling effects in FGM piezoelectric plates by a meshless method. *Composite Structures* 244 (2020), 112256.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112256>
- [10] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, S. Schmauder: Crack analysis of nano-sized thermoelectric material structures. *Engineering Fracture Mechanics* 234 (2020) 107078.
- [11] O. Hrytsyna: A Bernoulli-Euler beam model based on the local gradient theory of elasticity. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 15 (2020) No 4, 471-487.
<https://doi.org/10.2140/jomms.2020.15.471>
- [12] O. Hrytsyna: Applications of the local gradient elasticity to the description of the size effect of shear modulus. *SN Applied Sciences* 2 (2020) 1453.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-03217-9>
- [13] J. Sladek, S. Hocker, H. Lipp, V. Sladek, Q. Deng: Atomistic approach for the evaluation of direct flexoelectric coefficients in gradient theory, *Ferroelectrics* 569 (2020) 182-195.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1822681>
- [14] X. Tian, J. Sladek, V. Sladek, Q. Deng, Q. Li: Collocation mixed finite elements for flexoelectric solids. *International Journal of Solids and Structures* 217-218 (2021) 27-39.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.01.031>
- [15] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, Q. Deng: Flexoelectric effect in dielectrics under a dynamic load, *Composite Structures* 260 (2021) 113528.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113528>
- [16] J. Sladek, V. Sladek, S.M. Hosseini: Analysis of a curved Timoshenko nano-beam with flexoelectricity. *Acta Mechanica* 232 (2021) 1563-1581.
<https://doi.org/10.1007/s00707-020-02901-6>
- [17] J. Sladek, V. Sladek, M. Xu, Q. Deng: A cantilever beam analysis with flexomagnetic effect, *Meccanica* 56 (2021) 2281-2292. <https://doi.org/10.1007/s11012-021-01357-9>
- [18] J. Sladek, V. Sladek, X.Tian, Q. Deng: Mixed FEM for flexoelectric effect analyses in a viscoelastic material. . *International Journal of Solids and Structures*, 234-235 (2022) 111269.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111269>
- [19] O. Hrytsyna, J. Sladek, V. Sladek: The effect of micro-inertia and flexoelectricity on Love wave propagation in layered piezoelectric structures, *Nanomaterials* 11 (2021) 2270.
<https://doi.org/10.3390/nano11092270>
- [20] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka: The MLPG method in multiphysics and scale dependent problems. *Mechanisms and Machine Science*, 98 (2021) 385 – 403.
- [21] O. Hrytsyna: Local gradient Bernoulli–Euler beam model for dielectrics: effect of local mass displacement on coupled fields. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2021, Vol. 26(4) 498–512. <https://doi.org/10.1177/1081286520963374>
- [22] O. Hrytsyna: Electromechanical fields in a hollow piezoelectric cylinder under non-uniform load: Flexoelectric effect. *Mathematics and Mechanics of Solids*.
<https://doi.org/10.1177/10812865211020785>
- [23] O. Hrytsyna: The effect of local mass displacement on coupled fields in dielectrics. *Appl Nanosci* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01714-w>
- [24] J. Sladek, V. Sladek, M. Repka, E. Pan: Size effect in piezoelectric semiconductor nanostructures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, accepted

Uplatnenie výsledkov projektu

Monitorovanie zdravia konštrukcií (SHM) je potrebné k predchádzaniu katastrofickej deštrukcie, znižovania nákladov na údržbu a jej prevádzku. Zvlášť dôležité je to pre veľké špeciálne konštrukcie, kde ich zlyhanie môže viesť k živeľnej katastrofe so stratami životov a veľkým hmotným škodám. Doteraz sa na monitorovanie využívali senzory na princípe piezoelectricity. Piezoelektrický materiál má schopnosť transformovať mechanickú energiu na elektrickú alebo naopak. Pre silnú odozvu senzora je potrebné mať piezoelektrické materiály s veľkým piezoelektrickým koeficientom. Avšak tento koeficient je v prírodných materiáloch dosť malý a piezoefekt sa vyskytuje len v materiáloch nevykazujúcich centrosymetriu. Cesty cez kompozíciu viacerých materiálov boli iba čiastočne úspešné a podarilo sa zvýšiť piezoelektrický koeficient iba 10-20%. Preto je potrebné hľadať iné cesty so silnejšou odozvou v senzoch. V polovici minulého storočia objavený a v súčasnosti

intenzívne študovaný jav flexoelektricity sa ukazuje byť veľmi vhodný pre návrh nových senzorov využívajúcich gradient deformácií. Na rozdiel od piezoelektu vyskytuje sa vo všetkých materiáloch a koeficient transformácie mechanickej energie na elektrickú je možné zvýšiť až o stovky percent v porovnaní s klasickými piezoelektrickými materiálmi. Nový typ senzorov citlivých na gradient deformácií je vhodnejší ako klasické snímače monitorujúce priemerné hodnoty deformácií z relatívne veľkej oblasti, čo nie je postačujúce pre lokalizáciu únavových trhlin. Sensory na princípe flexoelektricity môžu merať gradient deformácií na malej lokálnej zone v okolí koreňa únavovej trhliny. Vibrujúce časti strojov (odpadová energia) je možné v piezoelektrických materiáloch pretransformovať na elektrickú energiu. No efektívnosť transformácie závisí od piezoelektrického koeficienta, ktorý je žiaľ dosť malý. Avšak flexoelektrický efekt môže byť ďaleko efektívnejšie využitý aj pre tento účel.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Cieľom projektu je vybudovať spoľahlivú výpočtovú metódu pre úlohy v gradientnej teórii kontinua, kde veľkostný efekt je sprievodný jav uváženia gradientov deformácií v konštitutívnych rovniciach. Variačné princípy sú korektným nástrojom na odvodenie riadiacich rovníc spolu s možnými okrajovými podmienkami. Následne je vybudovaná FEM formulácia pre numerické riešenie takto postavených okrajových úloh. Riadiace rovnice sú parciálne diferenciálne rovnice 4-tého rádu. Potom C^1 spojitosť pre premiestnenia a elektrický potenciál sú požadované pre existenciu vyšších derivácií vo FEM. Z dôvodu eliminácie potiaží s C^1 kontinuálnymi elementami v 3-D úlohách, sme sa rozhodli pre vybudovanie zmiešanej FEM formulácie pre priamu a konverznú flexoelektricitu v piezoelektrických materiáloch. Pre určenie flexoelektrických koeficientov sme navrhli a použili hybridný atomisticko-kontinuálny model s analytickým riešením pre jednoduchý problém v gradientnej teórii kontinua. Flexoelektrické javy sú tiež experimentálne potvrdené pre špeciálnu triedu mäkkých materiálov, ako napr. biologické membrány. Vlastnosti dotvarovania v mäkkých materiáloch s polymérnym základom sme zahrnuli aplikovaním princípu korešpondencie na riešenie 2-D elektro-väzkoelastických problémov s flexoelektrickým efektom. Flexoelektrický efekt a vedenie tepla v gradientnej teórii sme uvažovali pre úlohy s trhlinami v nano-rozmerných konštrukciách pri teplotnom zaťažení.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The goal of the project is to develop a reliable computational method for problems in gradient theory, where the size-effect is accompanied by consideration of strain gradients in the constitutive equations. The variational principles are correct tool for derivation of the governing equations together with the corresponding boundary conditions. The FEM formulation is developed for numerical solution of the posed boundary value problems. The governing equations are partial differential equations (PDE) of the fourth order. Then, C^1 continuity for approximation of displacements and electric potential are required for existence of higher-order derivatives. In order to eliminate difficulties with development of C^1 continuous, we decided for development of a mixed FEM formulation for direct and converse flexoelectricity in piezoelectric materials. For determination of the flexoelectric coefficients, we proposed and used a hybrid atomistic-continuum model with the analytical solution for a simple problem within gradient theory of continua. Flexoelectric effects are experimentally observed also in soft materials, like biological membranes. The creep behaviour in soft materials with a polymer base is taken into account by applying the correspondence principle to solve general 2-d electro-viscoelastic problems with flexoelectric effect. The flexoelectric effect and higher-order heat conduction are considered for the fracture mechanics analysis of piezoelectric nano-sized structures under a thermal load.