

STUDIU COMPARATIV AL UNOR MICROGRINZI CU DIFERITE CONFIGURAȚII GEOMETRICE DIN COMPONENTA MICROSENZORILOR MEMS

VASILE Alexandru Cristian¹, POPESCU Mihai¹

¹Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Specializarea Mecanică Fină și Nanotehnologii, Anul II, E-mail: Vasile.Alex96@gmail.com

Conducători științifici: Prof.dr.ing. **Adriana SANDU**; Prof.dr.ing. **Georgeta IONAȘCU**

REZUMAT: Lucrarea prezintă o metodă de calcul analitic al deformațiilor statice ale unor microgrinzi cu configurație complexă din componența unor structuri de tip MEMS. Pentru calculul deplasărilor statice s-a folosit metoda Mohr-Maxwell. Validarea rezultatelor obținute prin calcul analitic precum și calculul frecvențelor proprii ale structurilor s-au realizat cu metoda elementelor finite. Soluțiile analitice stabilite în lucrare permit modificarea unor parametri geometrici, aleși ca variabile de proiectare, cu scopul optimizării configurațiilor microstructurilor de acest tip.

CUVINTE CHEIE: microgrinzi, MEMS, metoda elementelor finite, frecvența proprie

1. Introducere

În general, sistemele MEMS [1] constau în microstructuri mecanice, microactuatoare, microsenzori și microelectronică, toate integrate pe același cip. MEMS se constituie ca un mod de proiectare și creare a unor dispozitive mecanice și sisteme complexe, integrând electronica aferentă la nivel micro- și nano-.

După cum sugerează și numele lor, senzorii MEMS rezonanți (microsisteme pentru detecție) sunt dispozitive care măsoară fenomenele fizice prin oscilații. Mai exact, un senzor de rezonanță MEMS conține o structură micromecanică proiectată pentru a ajunge la o anumită frecvență de rezonanță, în funcție de un anumit parametru fizic extern. Când acest parametru se modifică, se produce o variație a frecvenței de rezonanță a structurii, variație care se măsoară și este corelată cu variația valorii parametrului fizic. Natura electromecanică a structurilor MEMS implică faptul că oscilațiile mecanice afectează proprietățile electrice ale dispozitivelor, de asemenea. În consecință, un parametru fizic este convertit prin oscilații mecanice ale structurii într-un semnal electric, care poate fi citit în mai multe moduri. În timp, au fost create și testate mai multe modele de rezonatoare MEMS. Cu toate că fiecare dintre aceste structuri este unică și originală, cele mai multe dintre ele se bazează pe trei modele generale: console („cantilever”), „punți“ sau grinzi dublu încastrate și grinzi flexibile pliate.

2. Stadiu actual

Elementele sensibile de tip microgrinzi în console (cantilever) sunt cele mai simple structuri, atât ca utilizare, cât și ca fabricație. Microgrinda este ancorată la un singur capăt la substrat. Când este acționat, capătul liber pendulează în direcția perpendiculară pe structura dispozitivului. Acest element sensibil are avantaje multiple, cum ar fi:

- un proces de fabricare simplu, cu costuri reduse care implică, în mod tipic, subtăierea structurii în consolă pentru a o elibera de la substrat (placheta de siliciu), uzual prin corodare anizotropă umedă sau uscată [2];

- construcție monobloc, când nu există tensiuni reziduale, ceea ce face ca modurile de vibrație să fie cunoscute și ușor descrise cu ajutorul modelelor matematice [3].

Structurile cantilever sunt interesante în aplicații de senzori biologici și chimici [4] cu sensibilitate ridicată (de exemplu, de formă trapezoidală, flexibilă), precum și în microscopia de forță atomică (forma triunghiulară rigidă), datorită modurilor superioare, utile pentru dezvoltarea de noi moduri de formare a imaginii.

În această lucrare sunt prezentate modelarea și simularea unor structuri MEMS de tip microgrindă în consolă cu grosime variabilă continuu și în trepte, pentru comparație cu microgrinzile clasice cu grosime constantă.

Microgrinzile convenționale, cu secțiune dreptunghiulară constantă, au o sensibilitate redusă, care nu le recomandă pentru utilizări ca biosenzori. Utilizând simulări numerice, diverși cercetători [5-8] au studiat comportamentul unor microgrinzi cu grosime variabilă continuu (trapezoidală) sau în trepte și au constatat îmbunătățirea performanțelor acestora atât în regim static (constantă elastică mare) cât și în regim dinamic (frecvențe proprii de rezonanță mari). Au fost determinate constanta elastică și frecvența fundamentală de rezonanță pentru configurațiile geometrice analizate. Pentru o valoare ridicată a constantei elastice și o deformare statică scăzută, în cazul microgrinzii de grosime variabilă, a rezultat o frecvență de rezonanță înaltă (structura este rigidă), ceea ce a fost demonstrat numeric și validat prin comparație cu microgrinda de grosime constantă.

3. Calcul analitic

Lucrarea tratează microgrinzile MEMS în trei forme constructive: structuri cu grosime constantă (Fig.1); structuri cu grosime variabilă (Fig.2); structuri cu grosime în trepte (Fig.3). Acestea sunt analizate individual cu scopul de a le compara atât din punct de vedere al comportamentului static cât și al frecvențelor proprii. Pentru fiecare dintre cele trei variante, calculul analitic a fost efectuat cu metoda Mohr-Maxwell [9].

3.1. Microgrinzi cu grosime constantă

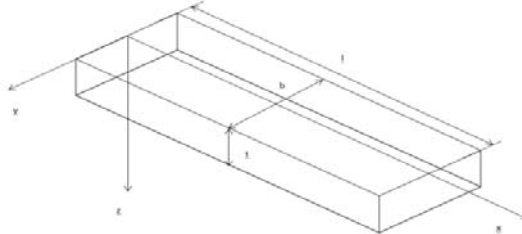


Fig. 1. Microgrinda cu grosime constantă

Expresiile momentelor încovoietoare într-o secțiune oarecare x sunt:

$$M_y(x) = -Fx; m_y(x) = -x \quad (1)$$

Relația lui Mohr-Maxwell pentru calculul deplasării statice:

$$\delta_{st} = \int_0^l \frac{M_y(x)m_y(x)dx}{EI_Y(x)} \quad (2)$$

$$I_y = \frac{bt^3}{12} \quad (3)$$

Înlocuind (1) și (3) în relația (2) se obține:

$$\delta_{st} = \frac{4Fl^3}{Ebt^3} \quad (4)$$

Constanta elastică a microgrinzii se determină cu relația

$$k = \frac{F}{\delta_{st}} = \frac{Ebt^3}{4l^3} \quad (5)$$

3.2. Microgrinzi cu grosime variabilă

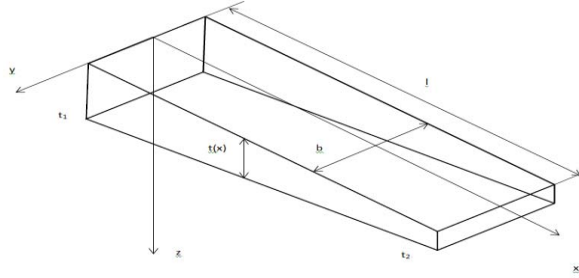


Fig. 2. Microgrinda cu grosime variabilă

Legea de variație a grosimii este dată de funcția:

$$t(x) = t_2 + \frac{x}{l}(t_2 - t_1) \quad (6)$$

Momentul de inerție este:

$$I_y(x) = \frac{bt^3(x)}{12} \quad (7)$$

Deplasarea statică se calculează cu metoda Mohr-Maxwell, ținând cont de expresiile momentelor încovoietoare date de relația (1):

$$\delta_{st} = \frac{12Fl^3}{Eb} \int_0^l \frac{x^2 dx}{\left[t_2 + \frac{x}{l}(t_2 - t_1) \right]^3} \quad (8)$$

Pentru rezolvarea integralei s-a folosit metoda de integrare numerică Simpson [10].
Rezultă:

$$\delta_{st} = \frac{2Fl^3}{Eb} \left[\frac{8}{(t_1 + t_2)^3} + \frac{1}{t_1^3} \right] \quad (9)$$

3.3. Microgrinzi cu grosime în trepte

Momentele de inerție corespunzătoare sunt:

$$I_{y1} = \frac{bt_1^3}{12}; I_{y2} = \frac{bt_2^3}{12} \quad (10)$$

Înlocuind (1) și (10) în relația (2) se obține:

$$\delta_{st} = \frac{F}{3E} \left\{ \frac{l_2^3}{I_2} + \frac{1}{I_1} \left[(l_1 + l_2)^3 - l_2^3 - l_2^2 l_1 \right] \right\} \quad (11)$$

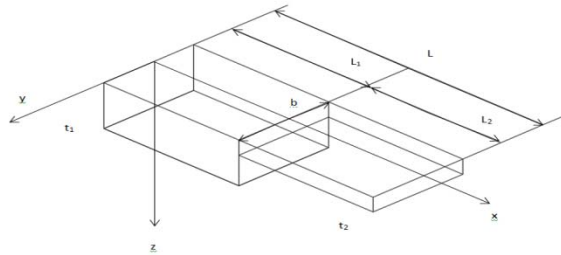


Fig. 3. Microgrinda cu grosime în trepte

4. SIMULARE NUMERICĂ

S-a folosit metoda elementelor finite [10-11], programul SOLIDWORKS/CosmosM Tools [11].

Microgrinda a fost încastrată la un capăt, și, pentru a evita concentrarea tensiunilor ca urmare a aplicării unei sarcini concentrate, pe suprafața frontală a capătului liber a fost aplicată o sarcină uniform distribuită, pe direcția normalei la suprafața microgrinzii (z), a cărei rezultantă să fie egală cu $F_z = 1\mu N$. Proprietățile materialului microgrinzii (siliciu monocristalin) sunt date în tabelul 1, iar dimensiunile microgrinzii studiate, în tabelul 2.

Toate cele trei variante au aceeași lungime l și aceeași latime b , ceilalți parametri geometrici fiind astfel aleși încât masa microgrinzilor să fie egală.

Tabelul 1. Constante material

Material	Si
E (MPa)	$165 \cdot 10^3$
Coefficientul lui Poisson (ν)	0.22
Densitate (ρ) kg/m ³	2330

Tabelul 2. Dimensiuni microgrindă cu grosime constantă

Tip microgrindă	Dimensiuni	Valori [μm]
Microgrindă cu grosime constantă	l	150
	b	50
	t	20
Microgrindă cu grosime variabilă	l	150
	b	50
	t_1	30
	t_2	10
Microgrindă cu grosime în trepte	l_1	75
	l_2	75
	b	50
	t_1	30
	t_2	10

4.1 Calcul static

Rezultatele simulării numerice sunt prezentate în figurile 4-6.

În Fig.4 se prezintă deformata microgrinzii și valoarea maximă a deplasării:

$$\delta_{st} = |\delta_{st}| = 2.048 \cdot 10^{-4} \mu m.$$

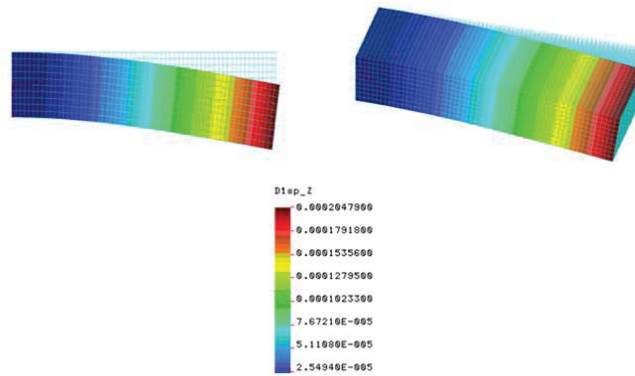


Fig. 4. Microgrinda cu grosime constantă-calcul static

Valoarea maximă a deplasării pentru microgrinda cu grosimea variabilă continuu (Fig.5) este:
 $\delta_{st} = |\delta_{st}| = 1.3 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$.

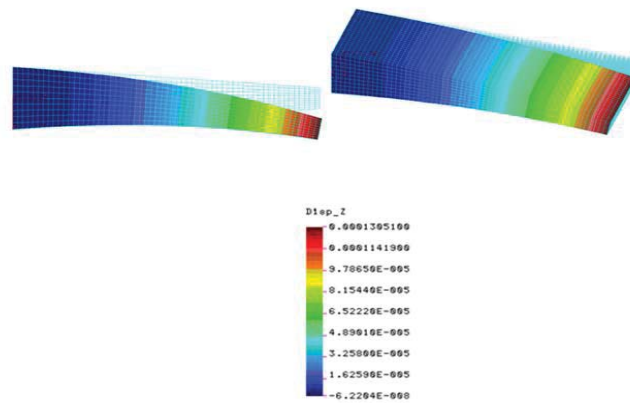


Fig. 5. Microgrinda cu grosime variabilă-calcul static

În Fig.6 se prezintă deformată microgrinzii cu grosime variabilă în trepte și valoarea maximă a deplasării:

$$\delta_{st} = |\delta_{st}| = 2.993 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$$

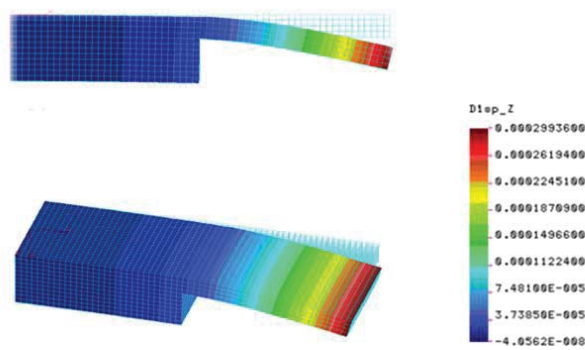


Fig. 6. Microgrinda cu grosime în trepte-calcul static

Analizând rezultatele din Tabelul 4. putem afirma că este validat modelul de calcul analitic prezentat mai sus.

Tabelul 4. Valorile deplasărilor statice (μm)

Microgrinda cu grosime constanta	analitic	$2.045 \cdot 10^{-4}$
	MEF	$2.048 \cdot 10^{-4}$
Microgrinda cu grosime variabila	analitic	$1.312 \cdot 10^{-4}$
	MEF	$1.3 \cdot 10^{-4}$
Microgrinda cu grosime in trepte	analitic	$2.42 \cdot 10^{-4}$
	MEF	$2.9 \cdot 10^{-4}$

4.2 Calculul frecvențelor proprii

În numeroase aplicații (microscopie de forță atomică, biosenzori) microgrinzile în consolă sunt utilizate ca senzori de rezonanță. În consecință interesează valorile frecvențelor proprii fundamentale ale acestora. Aceste frecvențe proprii au fost determinate prin simulare numerică cu metoda elementelor finite.

În Fig.7 este prezentat modul 1 de vibrație în cazul microgrinzii cu grosime constantă, corespunzător frecvenței $f_1 = 1201.48 \text{ kHz}$.

F_Mode=1 1.20148e+006 Hz

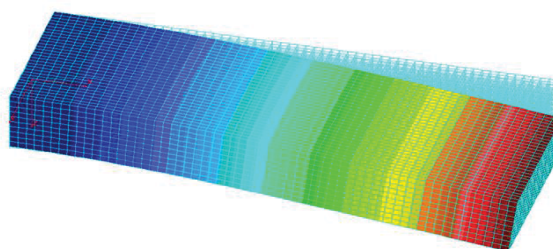


Fig. 7. Microgrinda cu grosime constantă-calcul frecvență

Frecvența proprie pentru modul 1, în cazul microgrinzii cu grosime variabilă (Fig.8) este:

$$f_1 = 2048 \text{ kHz}$$

F_Mode=1 2.048e+006 Hz

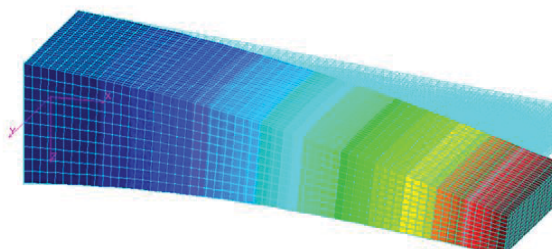


Fig. 8. Microgrinda cu grosime variabilă-calcul frecvență

În Fig.9 sunt prezentate rezultatele pentru modul 1, în cazul microgrinzii cu grosime în trepte :
 $f_1 = 1794.82 \text{ kHz}$

F_Mode=1 1.79482e+006 Hz

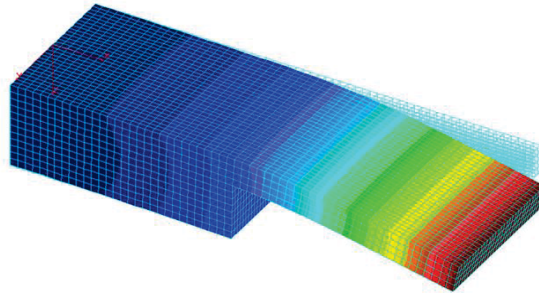


Fig. 9. Microgrinda cu grosime in trepte-calcul frecvență

5. Studiu comparativ al variantelor constructive

În tabelul 5 și în figura 10 sunt centralizate rezultatele obținute pentru cele trei variante constructive studiate.

Tabelul 5. Centralizator rezultate

	$\delta st(\text{analitic})[\mu\text{m}]$	$\delta st(\text{MEF})[\mu\text{m}]$	$f_l[\text{KHz}]$
V1 (grosime constantă)	0.0002045	0.0002048	1201.48
V2 (grosime variabilă continuu)	0.0001312	0.0001305	2048
V3 (grosime variabilă în trepte)	0.000242	0.0002993	1794.82

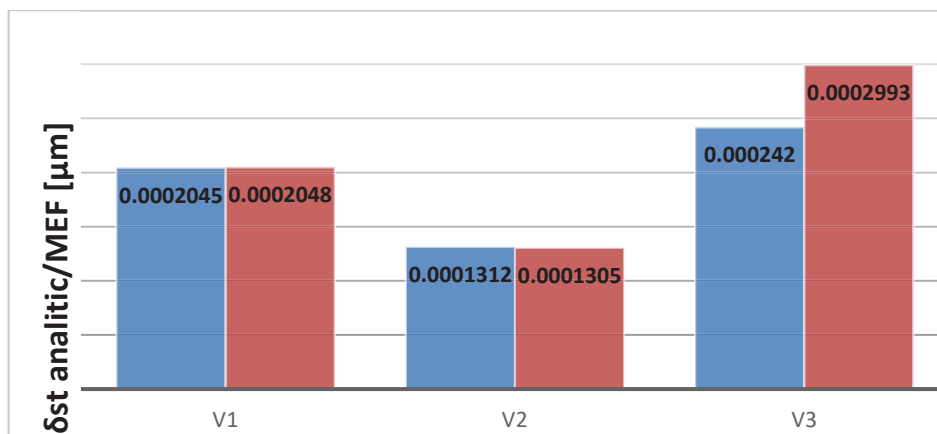


Fig. 10. Comparația valorilor deplasărilor statice

6. Concluzii

Pentru aplicația propusă este optimă varianta 2 (microgrinda cu grosime variabilă continuu) pentru care s-a obținut cea mai mică valoare pentru deplasarea statică (ceea ce înseamnă o constantă elastică mare) și cea mai mare valoare pentru frecvența fundamentală de rezonanță.

Modelul de calcul analitic pentru microgrinda cu grosime variabilă continuu a fost validat pentru comportamentul static.

Relația analitică stabilită pentru deplasarea statică, care permite determinarea constantei elastice a microgrinzii, poate fi utilizată pentru optimizarea geometriei acestor microstructuri.

7. Bibliografie

- [1] Lobontiu N., Garcia E., (2005), *Mechanics of Microelectromechanical Systems*, Kluwer Academic Publishers, Print ISBN: 1-4020-8013-1
- [2] Ionascu G., (2004), *Technologies of Microtechnics for MEMS* (in Romanian), Cartea Universitara, Bucharest, Romania
- [3] Ionascu G., Bogatu L., Sandu A., Manea E., Cernica I., (2008) "Modeling, Simulation and Technology of Microbeam Structures for Microsensor Applications", The Scientific Bulletin of POLITEHNICA University of Bucharest, Series D, Vol. 70, No. 3, pp. 19-30.
- [4] Saranya R, Saranya K, Ceemati D, Chandra Devi K, Meenakshi Sundaram N., "Design of MEMS based microcantilever for tuberculosis detection", PSG College of Technology, Coimbatore, Tamil Nadu, India.
- [5] Kasambe P.V., Bhole K. S., Bhoir D. V., (2017), "Performance Evaluation of Embedded Strain Sensing Varying Thickness Polymer Micro-cantilever as Biosensor Platform", International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS) Volume VI, Issue VII, ISSN 2278-2540
- [6] Parsediya D. K., Singh J. and Kankar P. K., (2005) "Modeling and simulation of variable thickness based stepped MEMS cantilever designs for biosensing and pull-in voltage optimization", PDPM-Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing Jabalpur Dumna, Khamaria P.O., Jabalpur, India-482005.
- [7] Chandel T., Singh B., (2014) "The State of Art Survey on Micro cantilevers for MEMS Devices", e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, Volume 9, Issue 5 Ver. II (Sep – Oct. 2014), PP 08-15.
- [8] Hawari H. F., Wahab Y., Azmi M. T., Shakaff A. Y., Hashim U., Johari S., (2014) "Design and Analysis of Various Microcantilever Shapes for MEMS Based Sensing", Journal of Physics: Conference Series 495 (2014) 012045
- [9] Minca I., Atanasiu C., Sandu A., Sandu M., (1998), *Rezistența Materialelor și elemente de teoria elasticității*, Editura Tehnica Bucuresti, Bucuresti, ISBN 973-31-1244-5.
- [10] Sandu A., Sandu M., Găvan M., (2003), *Metode și programe pentru calculul structurilor elastic*, Editura Printech, București, ISBN 973-652-735-2.
- [11] COSMOS/M – Finite Element System, User Guide, 1995.