

Mikroelektromechanikai szerkezetek szilárdsági és megbízhatósági vizsgálata

Témavezető: Dr. Kovács Ádám egyetemi docens,
BME Műszaki Mechanikai Tanszék

Kutatási beszámoló:

A kutatás a munkatervben lefektetett ütemezés szerint haladt, tartalmilag a következő tevékenységekkel (zárójelben a tevékenységek végzésének ideje):

1. *A kutatási témával kapcsolatos szakirodalmi eredmények feldolgozása (2005).*
2. *Kapcsolt piezo-termo-mechanikai mezők (elektromos térerősség, hőmérséklet, elmozdulás, alakváltozás, mechanikai feszültség) számítási módszerének kifejlesztése és vége-selemes implementálása (2005-2006).*
3. *Többrétegű szilícium struktúrák mechanikai modellezése – a működést jellemző szilárdsági mennyiségek numerikus meghatározása. A struktúrákon végzett mérési eredmények feldolgozása (2006-2008).*
4. *Túlterhelt mikroszerkezetek törésmechanikai analízise. Tönkremeneteli kritérium megállapítása és megbízhatósági vizsgálat (2007-2008).*

1. Először a kutatási témában eddig megjelent szakirodalmi eredményeket dolgoztuk fel. Összegyűjtöttük a mikroelektro-mechanikai szerkezetekben használt Si-alapú anyagok rendelkezésre álló szilárdsági anyagjellemzőit (rugalmassági modulus, Poisson-tényező, szakítószilárdság). Az anyagjellemzők - a Poisson-tényező kivételével - igen nagy tartományban szórtak, ezért megállapítottuk, hogy saját méréseket kell végezzünk a hiteles anyagjellemzők meghatározása érdekében.

Kerestünk olyan alkalmazási területeket, ahol várhatóan hasznosítani lehet a kifejlesztésre kerülő számítási módszereket ill. a mérési eredményeket. Két ilyen területet választottunk: az egyik a kapacitív mikrokapcsolók voltak, ahol a kapcsolást létrehozó mozgó lemez szilárdságának változtatásával a gyors visszahúzást jelentő merev és kis kapcsolási feszültséget igénylő lágy viselkedés közötti optimum megtalálása numerikus szimulációval történhet. Az ez irányú kutatást rövid idő után abbahagytuk, mert találtunk egy ennél sokkal ígéretesebb területet: a mikroszűrést.

Megállapítottuk, hogy ezen a területen igen hézagosak a kutatási eredmények. A mikro- és nanoszűrést lehetővé tévő struktúrák a többféle igény (nagy porozitás, kellő szilárdság, stb.) kielégítése igen összetett, többrétegű szerkezetet igényel. Ezek szilárdsági modellezése és szimulációja vált a kutatás fő irányává.

2. A MEMS-alkalmazások során a szerkezetek elektromos, termikus és mechanikai terheléseknek egyaránt ki lehetnek téve. A három mező kapcsolt, azaz egymással oda-vissza irányban összefüggő elemzése, az alapegyenletek megfogalmazása és azok vége-selem módszerrel való megoldása új tudományos eredmény.

A piezo-termo-elasztikus alapegyenletek (ún. konstitutív egyenletek) levezetése a legalapvetőbb összefüggésekből (Maxwell-egyenletek, termodinamika főtételei, Fourier-

féle hővezetési törvény és annak Cattaneo-Vernotte-féle módosított változata, rugalmasságtan alapegyenletei) történtek. A levezetett tenzor-egyenleteket hely szerinti diszkrétizációja – variációs elv létezésének hiányában - Galjorkin módszerével történt. Erre épülve elkészült egy FORTRAN-nyelven írt végeelem program, amely alkalmas piezo-termo-elasztikus időfüggetlen, három dimenziós statikai problémák megoldására. A programot teszteltük.

A kutató csoport egyik tagja sikerrel védte meg PhD-dolgozatát, melynek egyik fejezete e témával foglalkozott. [1]

3. Először kapacitív mikrokapcsoló kapcsoló lemezének szilárdsági vizsgálatával foglalkoztunk. A cél az volt, hogy eljárást dolgozzunk ki téglalap alakú kapcsoló elem adott anyagminősége és membránhossza esetén az optimális működést lehetővé tevő szélesség/vastagság arány meghatározására. Ez kellően kis behúzási feszültséget és kellően gyors kapcsolást jelent, mely követelmények ellentétes szilárdságú lemezt feltételeznek.

A feladat a membrán kis vastagsága miatt nemlineáris. Az Airy-féle feszültségfüggvény használatával és trigonometrikus lehajlás függvény feltételezésével analitikus megoldást találtunk. Eredményeinket végeelemes szimulációval is ellenőriztük. [2,3]

A kutatás második, egyben leghosszabb, és eredményeit tekintve leggazdagabb része a többrétegű struktúrák, különösen a mikroszűrők mechanikai modellezése, analitikus és végeelemes szilárdsági analízise volt.

A mikroszűrők olyan többrétegű struktúrák, amelyekben rendezett vagy rendezetlen lyukak vannak. A mechanikai modellezést először szilícium-nitrid (SiN) homogén lemezzel végeztük, melynek deformációjára és terhelhetőségére szakirodalmi eredmények vannak.

Egyszerű, négyzet alakú membránra a hajlított lemezek elmélete alapján, Ritz-módszerrel próbafüggvényes analitikus modellt készítettünk. A modell egy állandó vastagságú, vékony, hajlított lemez. Mivel az analitikus megoldás csak egyszerű peremfeltételek mellett lehetséges, ezért a valós membrán-keret kapcsolatot alulról és felülről közelítő csuklós támasszal ill. merev befogással helyettesítettük. természetesen a két esethez különböző próbafüggvényekre volt szükség, és az azokkal számított maximális lehajlások is különbözők voltak. Ez alapján zárt alakú összefüggést vezettünk le a lemezközép lehajlására, melyben paraméterként szerepelt a rugalmassági modulus is.

Mivel a Ritz-módszer köztudomásúlag csak az elmozdulásmezőre ad jó közelítést, a terhelhetőség becsléséhez szükséges maximális feszültség meghatározásra új módszert fejlesztettünk ki. A módszer azon a felismerésen alapszik, hogy a membrán peremének közepén ébredő maximális normálfeszültség arányos a membrán közepén ébredő normálfeszültséggel. Az arányossági tényezőt egy nagyon sűrű elemfelosztású nemlineáris véges elem modellel határoztuk meg. Először térbeli modellt készítettünk, ahol figyelembe vettük a struktúra valós geometriáját (a Si-szeletből a marás után megmaradó keretet is). Megállapítottuk, hogy a keretnek a membránhoz viszonyítva nagyságrendekkel nagyobb hajlítószilárdsága miatt elegendő egy egyszerűbb, az analitikus modellhez hasonló befogott peremű héjat vizsgálni. Az egyszerű geometria és terhelés, valamint a szimmetria feltételek miatt ráadásul elegendő volt negyed-moddal dolgozni, ami még finomabb elemfelosztást tett lehetővé. Az analitikus és numerikus eredmények összehasonlítása azt mutatta, hogy az analitikus becslés 10%-nál nem nagyobb hibát tartalmaz. [4]

A szűrendő részecskék méretétől függően mikron nagyságrendjébe eső lyukméretű perforált membránokra van szükség. A membránok terhelhetőségét a kritikus nyomás értékével jellemezzük, mely a membrán törését idézi elő. Ennek ismerete kulcsfontosságú a szerkezet tervezésekor. Tervezési cél a minél nagyobb perforációs index (a lyukfelület és a teljes felület aránya) elérése, mivel ez tesz lehetővé hatékonyabb szűrést, ugyanakkor ez jelentősen csökkenti a membrán szilárdságát, egyben a szűrendő közeg megengedhető nyomását. A terhelhetőség minél pontosabb becslésével segíthetjük az optimális tervezést, ami a kétféle szempont – nagy perforációs index és nagy megengedhető nyomás – egyidejű kompromisszumos figyelembevételét jelenti.

Perforált lemez esetén a becsléshez az anyagjellemzők módosított értékeit használtuk, a szakirodalomban talált lineáris függvény nemlineáris módosításával. A nemlinearitást okozó paraméterek értékét szintén numerikus szimulációval határoztuk meg. Érzékenység vizsgálattal megállapítottuk, hogy az eredmények nagy perforációs index esetén csak a perforációs indextől és nem a perforációk számától függenek. [6,7]

Vizsgálataink másik eredménye az volt, hogy a perforációmentes perem szélessége nagyban befolyásolja a feszültség eloszlást. Szélesebb perem nagyobb mechanikai stabilitást ad a szerkezetnek és egyúttal csökkenti a perforációk okozta szilárdság csökkenést. Ha a perforációk közel esnek a membrán széléhez, akkor a maximális lehajlás csak kis mértékben nő (mi a rugalmassági modulus kis változására utal), viszont nagyon lecsökken a kritikus nyomás (ami a szakítószilárdság nagy csökkenését bizonyítja).

A hiteles anyagjellemzők megállapításához szükséges méréseket a külföldi társkutató intézményben (Institut für Angewandte Forschung, Hochschule Furtwangen) végezték. Ez az együttműködés remekül sikerült. Személyes, jó szakmai kapcsolat alakult ki az ottani kutatókkal – különösen az egyik, magyar származású mérnökkel (a témavezetőnek csak névrokona). Egyrészt a különböző perforációs indexű és méretű membránok maximális lehajlását mérték, másrészt a terhelő nyomás növelésével megállapították a tönkremenetelt (ti. a membrán törését) előidéző kritikus nyomást. [5,13]

A mérési eredményekből a fent vázolt analitikus módszer segítségével tudtuk megállapítani a membránok rugalmassági modulusát és szakítószilárdságát. Érdekes tapasztalat volt, hogy a rugalmassági modulus kis nyomás értékek esetén nyomásfüggő – erre vonatkozólag a szakirodalomban is találtunk utalást. A szakítószilárdság meghatározását az könnyítette, hogy a SiN igen rideg, ugyanakkor nagy terhelési tartományban lineárisan rugalmas anyag, azaz folyáshatára, maradó alakváltozása. [8,14]

A következő lépés az összetettebb, nanoszűrést is lehetővé tévő porózus szilíciumot (PS) is tartalmazó réteget tartalmazó szűrő struktúrák vizsgálata volt. A PS nagyságrenddel kisebb üregekkel rendelkezik, mint a SiN-réteg, azonban annál lényegesen gyengébb is. A társkutató intézményben olyan struktúrákat hoztak létre, amelyek a szilárdságot növelő kristályos szilícium (c-Si) oszlopokat tartalmaztak. A mérések ez esetben is a maximális lehajlás és a törési nyomás meghatározására irányultak. [9]

A bonyolult struktúra már nem tett lehetővé analitikus számítást, ezért végesem modellt alkottunk. A valós geometria térbeli elemekkel való modellezése gyakorlatilag lehetetlennek bizonyult a SiN és PS rétegek ill. a c-Si merevítő oszlopok nagyságrendekkel eltérő mérete miatt. Ezért kutatócsoportunk olyan modellt fejlesztett ki, melyben a c-Si

oszlopokat egy szilárdságilag egyenértékű homogén réteggel helyettesítettük. Az általunk használt végeelem szoftverek (ANSYS, COSMOS/M) tartalmaztak többrétegű héjelemeket, ezért az így előálló három rétegű membrán viselkedését numerikus szimulációkkal már tudtuk vizsgálni.

A szűrő elsősorban folyadék szűrésre szolgálna, ezért a mechanikai terhelés a folyadék nyomásból származik. Ezt a modellben homogén nyomásnak tételeztük fel. A modellt a legnagyobb lehajlásra vonatkozó mérési eredményekkel validáltuk. [10,11,12]

4. A mikromechanikai szerkezetek túlterhelése tönkremenetelt okozhat. Az általunk vizsgált szűrők esetében ez azonnali membrán törést jelent. A társkutató intézmény mérési eredményeinek kiértékelése azt mutatta, hogy a többrétegű struktúrák is rideg anyagi viselkedésűek, ezért a tönkremeneteli feltételt a legnagyobb normálfeszültség (Navier-féle) elmélet szerint számított egyenértékű feszültségre állapítottuk meg. E szerint a szűrő tönkremegy, ha a legnagyobb főfeszültség értéke eléri a szerkezet egyenértékű (effektív) szakítószilárdságát.

E kritérium ellenőrzéséhez szükség volt az effektív anyagjellemzők meghatározására. Ezt, szakirodalmi ajánlások alapján, a rétegekre vonatkozó anyagjellemzők térfogat szerinti átlagolásával tettük meg. A korábbi vizsgálatainkban meghatároztuk a SiN szükséges anyagtulajdonságait, a porózus rétegre és a merevítő c-Si oszlopokra pedig a kristályos szilíciumra vonatkozó értékekkel számoltunk. A porozitás hatását a perforációhoz hasonlóan, a tömör és perforált anyagtulajdonságok közti nemlineáris összefüggés segítségével vettük figyelembe. [15,16]

Utolsó lépésként olyan struktúra kifejlesztését kezdtük el, amely kellően szilárd, nagy folyadéknyomást kibír, ugyanakkor jó a szűrőképessége, azaz nagy a porozitása. Mérésekkel és numerikus szimulációkkal hasonlítottuk össze a változó rétegvastagságú és merevítési fokú struktúrák terhelhetőségét és meghatároztuk azt a struktúrát, amely termékfejlesztés után széleskörű alkalmazást sejtet. [17]

Hivatkozott publikációk és előadások:

- [1] Vízváry Zs.: Mikromechanikai érzékelők elektromos-, mechanikai- és termikus modellezése, PhD dolgozat, BME, 2005.
- [2] Kovács Á.: Numerical optimization of the capacitive micro-switch. *Engineering Mechanics*, Vol. 12, No. 1, pp. 23-28, (2005).
- [3] Kovács Á.: Shape optimization of a capacitive micro-switch. WCSMO6, Rio de Janeiro, Brazil, May 29 - June 3, 2005.
- [4] Kovács Á.: Large deflection analysis of SiN membranes. (in: Gépészet 2006. Proc. of Fifth Conference on Mechanical Engineering, Eds.: A. Penninger, L. Kullmann, G. Vörös, BME, Budapest, 2006), CD Edition, ISBN 963593 4653.
- [5] Kovacs, A., Kovács Á., Pogány M., Mescheder, U.: Realization and mechanical investigation of perforated and porous membranes for filter applications, Proc. of Eurosensors XX, Gothenburg, Sweden, September 17-2006, 2006.

- [6] Kovács Á., Kovács, A., Vízváry Zs., Mescheder, U.: Large deflection analysis of perforated silicon nitride membranes. (in: 6th European Solid Mechanics Conference, ISBN 963-87244-0-4, CD-Edition, Budapest, Hungary, 2006 <http://esmc2006.mm.bme.hu/>).
- [7] Kovács Á., Kovács, A., Mescheder, U.: Estimation of elasticity modulus and fracture strength of thin perforated SiN membranes with finite element simulation. 16th International Workshop on Computational Mechanics of Materials, Lublin, Poland, September 25-26, 2006.
- [8] Kovács Á.: Numerical estimation of load capacity of thin microfilter-plates. (in: Advanced Researches in Computational Mechanics and Virtual Engineering, ISBN 978-973-635-821-0, CD-Edition, Brasov, 18-20 October 2006, Romania).
- [9] Kovács, A., Kovács, Á., Pogány M., Mescheder, U: Mechanical investigation of perforated and porous membranes for micro- and nanofilter applications. *Sensors & Actuators B*, Vol. 127, pp. 120-125, (2007).
- [10] Kovács Á.: Perforált mikroszűrő membránok terhelhetőségének becslése. *Műszaki Szemle*, Vol. 38, pp. 210-213, (2007).
- [11] Kovács Á.: Semi-Analytical Estimation of Load Capacity of Silicon Nitride Microsieve Membranes. 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, Toronto, Canada, June 3-7, 2007.
- [12] Kovács Á., Kovács, A.: Estimates for the Load Capacity of Perforated and Porous Membranes. USNCCM9, San Francisco, CA, USA, July 23-26, 2007.
- [13] Kovács Á., Vízváry Zs.: Kétrétegű porózus nanoszűrő membrán rugalmassági moduluszának meghatározása numerikus szimulációval. X. MaMeK, Miskolc, 2007. augusztus 27-29.
- [14] Kovács Á., Kovács, A., Mescheder, U.: Estimation of elasticity modulus and fracture strength of thin perforated SiN membranes with finite element simulations. *Comp. Mat. Sci.*, 43, pp. 59-64, (2008).
- [15] Kovács Á., Kovács, A.: Effect of Silicon Reinforcement on Load Capacity of Porous Nanofilters. GAMM Conference 2008, Bremen, Germany, March 31 - April 4, 2008.
- [16] Kovács Á., Kovács, A., Mescheder, U.: Estimation of Material Properties of Multi-Layered Porous Nanofilters. XVth MCM Conference, Riga, Latvia, May 26-30, 2008.
- [17] Kovács Á., Kovács, A., Mescheder, U.: Estimation of Load Capacity of Multi-Layered Porous Nanofilters. ICTAM 2008, Adelaide, Australia, August 24-29, 2008.