

# PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH

Łódź 09-10 maja 1995 roku

Zygmunt Rymuza

*(Instytut Konstrukcji Przyrządów Precyzyjnych i Optycznych, Politechnika  
Warszawska)*

## MIKROŁOŻYSKA

### SŁOWA KLUCZOWE

Mikrołożyska, mikrosystemy, tarcie, zużycie

### STRESZCZENIE

Omówiono konstrukcję i trybologiczne zachowanie się łożysk ślizgowych poprzecznych i wzdłużnych służących do łożyskowania wirujących elementów w mikrosystemach (Microelectromechanical systems - MEMS) np. w mikrosilnikach o mikrometrowych wymiarach elementów.

### WPROWADZENIE

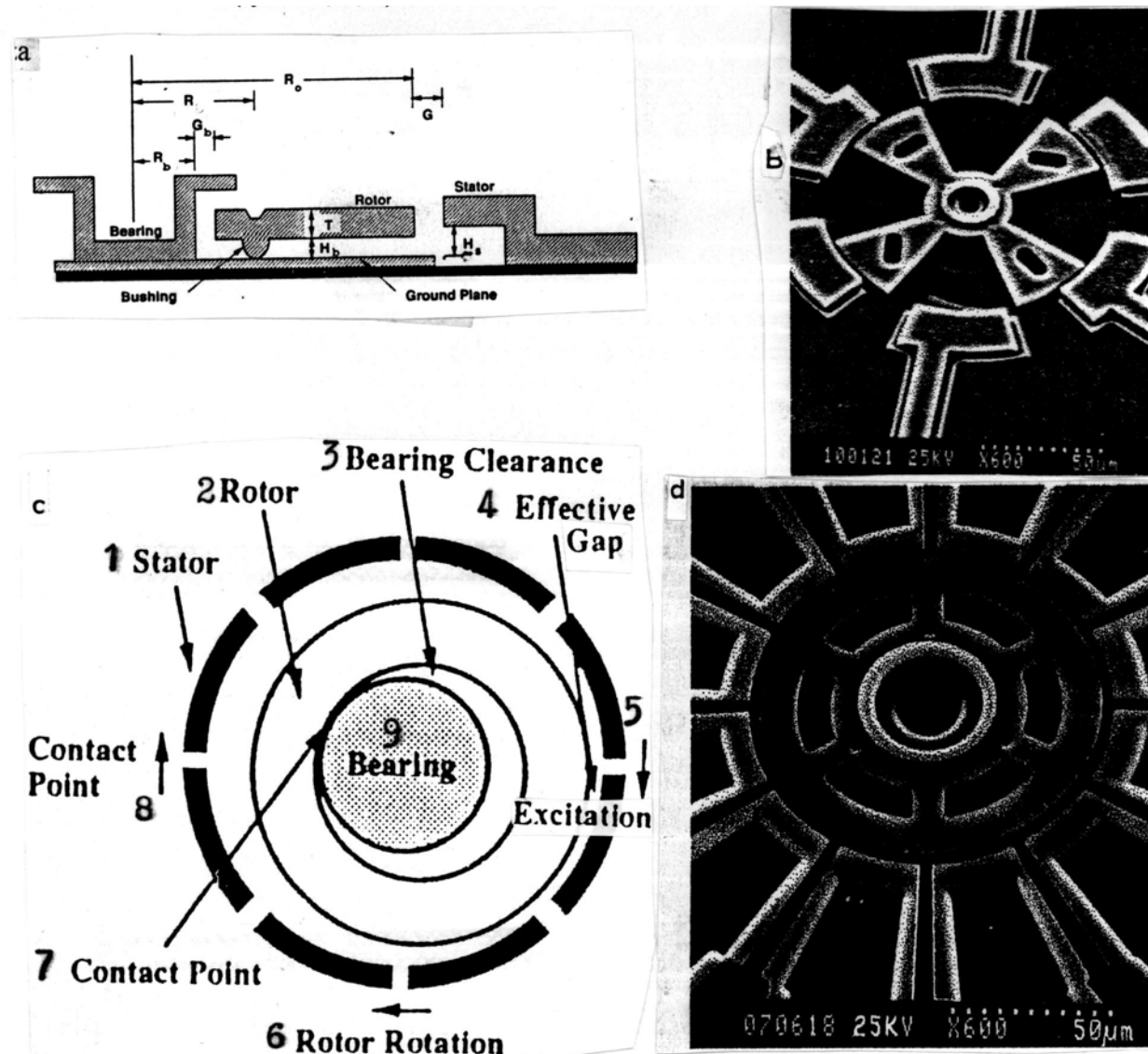
Od kilku lat rozwija się technologia micromachiningu na podłożu krzemowym, LIGA i inne technologie umożliwiające wytwarzanie mikrosystemów (microelectromechanical systems - MEMS) zawierających elementy o mikrometrowych wymiarach [1, 2]. Najczęściej są to mikrosilniki o różnych zasadach działania: elektrostatyczne, magnetyczne, indukcyjne itp.[8]. Istotnym problemem przy wytwarzaniu takich mikrosilników krzemowych (średnica wirnika 100  $\mu\text{m}$ , moment na wirniku 10 pNm i prędkość obrotowa do 15000 obr/min) jest jego łożyskowanie. Podobne problemy z łożyskowaniem występują dla innych mikroelementów ruchomych np. turbin, kół zębatach itp.[1, 2, 6, 9-11].

Łożyskowanie innych mikroelementów (np. optycznych) wykonujących obrotowe ruchy oscylacyjne o niewielkiej amplitudzie wymaga stosowania odpowiednich łożysk lub przegubów w szczególności bezluzowych [12-15]. Łożyskowanie ruchomych mikroelementów powinno być możliwe do łatwego wykonania najlepiej bez oddzielnej operacji montażu elementów łożyska. Łożyskowanie powinno zapewnić małe straty tarcia i małe zużycie elementów trących. Zmniejszenie strat z powodu tarcia jest obecnie podstawowym problemem przy budowie MEMS. Niezawodność i trwałość mikromechanizmów zależy przede wszystkim od jakości łożyskowania elementów ruchomych.

### ŁOŻYSKOWANIE MIKROSILNIKÓW I INNYCH MIKROURZĄDZEŃ

Łożyskowanie wirników mikrosilników (MS) zależy od typu silnika. W najczęściej obecnie wytwarzanych MS elektrostatycznych o biegunach wydających (salient-pole

micromotors - rys. 1 a, b) lub z oscylacyjno-obrotowym ruchem wirnika (wobble micromotors - rys. 1 c, d). przy wytwarzaniu MS metodą micromachiningu na podłożu krzemowym łożyskowanie wirnika realizuje się na centralnej nieruchomej osi z kołnierzem lub bez kołnierza (rys. 2 a, b, c).

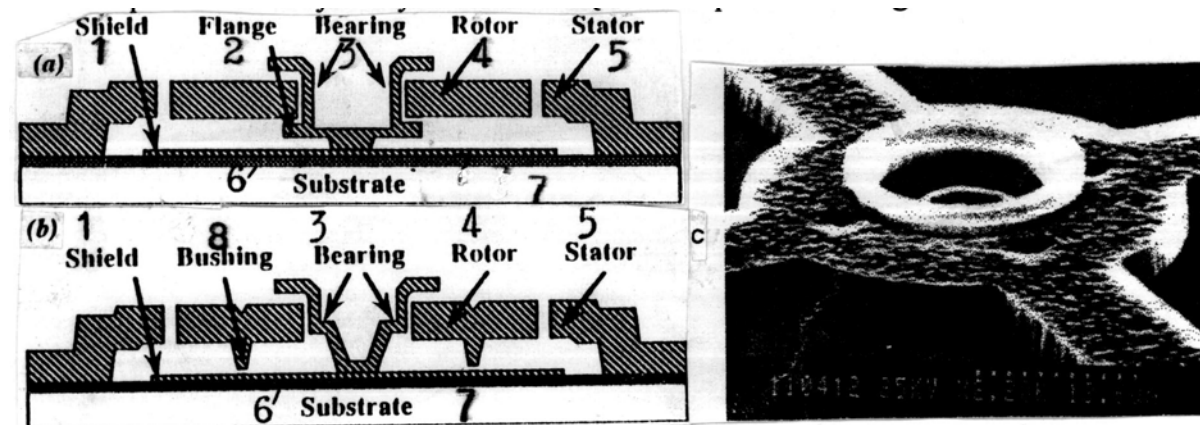


Rys. 1. Schemat i widok typowych mikrosilników elektrostatycznych krzemowych. a, b - o biegunach wydających (salient-pole), c,d - harmoniczny o oscylacyjno-obrotowym ruchu wirnika (wobble). Typowe wymiary (w  $\sim\mu\text{m}$ ) elementów mikrosilnika:  $G=1.65$ , promień wirnika  $=50$ ,  $R_b = S = 10$ ,  $G_b = 0.35$ , grubość wirnika-stojana  $=2 - 3$ , odległość biegunów stojana od podłoża  $=1 - 1.5$ , wysokość pierścienia łożyska wzdłużnego (bushing, p. rys. 2 b)  $=0.8 - 0.9$ , 2 c: 1 - stojan, 2 - wirnik, 3 - luz łożyskowy, 4 - szczelina między stojanem i wirnikiem, 5 - wzbudzenie, 6 - kierunek obrotu wirnika, 7 - styk wirnika z osią nieruchomą, 8 - kierunek wirowania strefy styku wirnika z osią.

Elementy mikrosilnika wytwarzane są z krzemu polikrystalicznego. W przypadku stosowania technologii LIGA elementy MS wykonywane są z niklu a łożyskowanie wirnika, o stosunkowo dużej wysokości (grubości) w stosunku do średnicy, wygląda jak na rys. 3 [3, 5]. Wirnik obtacza się po nieruchomym czopie (osi) podobnie jak w mikrosilnikach krzemowych typu wobble.

W przypadku MS krzemowych celem zmniejszenia tarcia (przez zmniejszenie powierzchni styku) wywołanego siłami osiowymi w przypadku rozwiązania ułożyskowania przedstawionego na rys. 2 b na wirniku wykonuje się pierścień lub występy (np. trzy) o

kształcie półkuli [16, 17]. Dla zmniejszenia współczynnika tarcia pierścien krzemowy ślizga się po warstwie oporowej z azotku krzemu [2, 4, 16, 17]. W łożyskowaniu MS przy obtaczaniu się wirnika po nieruchomym czopie (osi) występuje toczenie ze ślizganiem (przy występowaniu poślizgu). W czasie ruchu wirnika strefa styku wirnika z osią przemieszcza się w kierunku wirowania pola elektrycznego (rys. 1 c). Ze względu na to że siła normalna pola elektrycznego jest znacznie mniejsza od siły stycznej powodującej obrót wirnika współczynnik tarcia wirnika z osią musi być jak najmniejszy dla obtaczania się wirnika po osi. Istotne jest czyste toczenie się wirnika po osi bez ślizgania.



Rys.2. Widok łożyskowania mikrosilników. a - z kołnierzem z obu stron do przenoszenia obciążeń osiowych, b - z kołnierzem jednostronnym i pierścieniem (bushing) do przenoszenia sił osiowych, c - widok łożyska o średnicy otworu 7.3 N.m. 1 - warstwa (nakładka) spolaryzowana tak samo jak wirnik, 2 - kołnierz, 3 - nieruchomy czop (oś), 4 - wirnik, 5 - stojan, 6 - warstwa izolacyjna, 7 - podłoże krzemowe, 8 - łożysko wzdłużne.

Przełożenie  $n$  MS definiowane jest jako stosunek prędkości kątowej wirowania pola elektrycznego stojana do prędkości kątowej wirowania wirnika [18, 19]. Prędkość kątowa wirnika związana jest z prędkością wirowania pola elektrycznego wzbudzenia następującą zależnością:

$$\omega_w = \omega_e [(R_w/R_o) - 1] \quad (1)$$

gdzie:  $R_w$  i  $R_o$  - odpowiednio promień otworu łożyskowego wirnika i nieruchomej osi (rys. 1 c i 3 a).

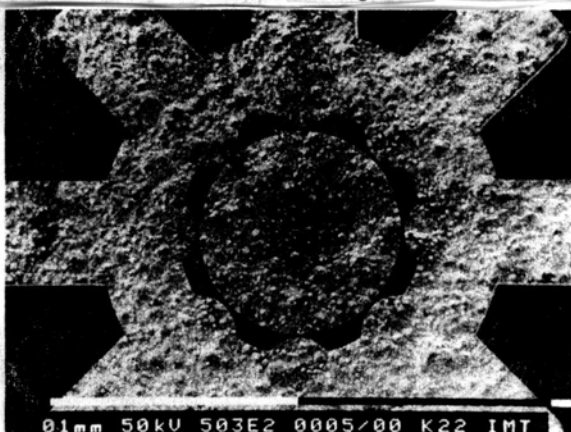
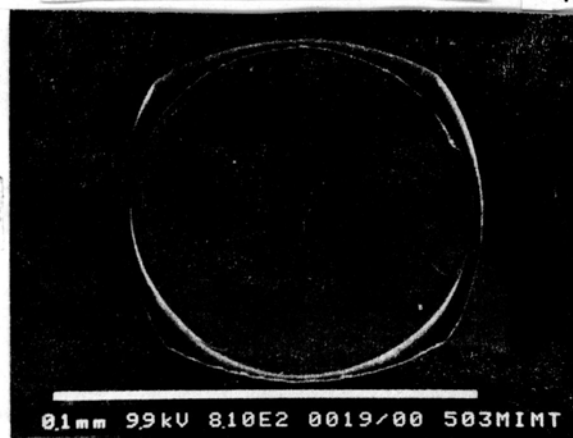
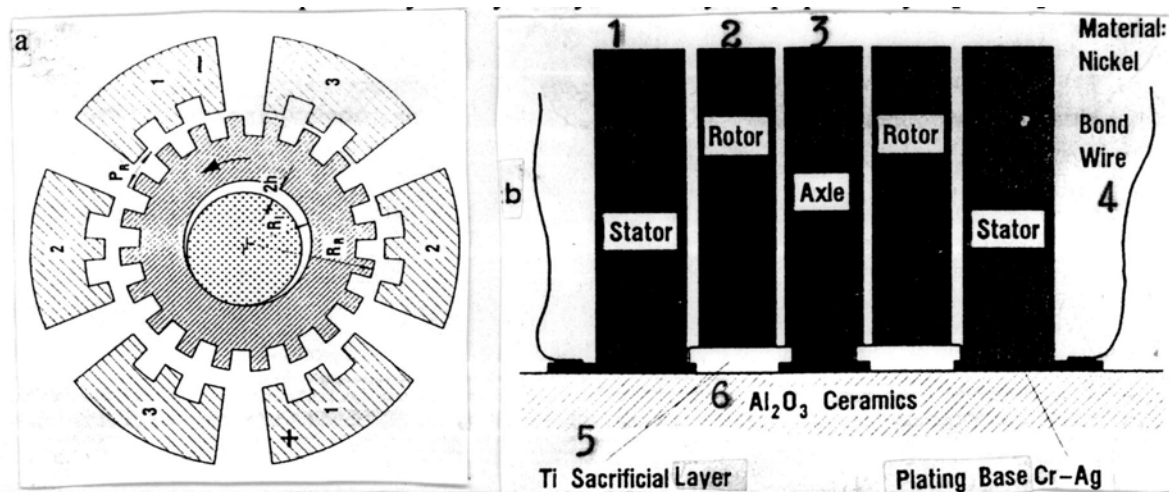
Uwzględniając definicję przełożenia i zależność na ww. z (1) otrzymamy

$$n = R_o / (R_w - R_o) \quad (2)$$

Przełożenie ma dodatnią wartość (kierunek obrotu wirnika jest taki sam jak kierunek wirowania pola elektrycznego wzbudzenia) i zależy od różnicy promienia otworu łożyskowego wirnika i osi nieruchomej. Wirnik może wirować szybciej niż pole wzbudzenia, z taką samą prędkością lub wolniej. Gdy  $R_o = R_w$  przełożenie dąży do nieskończoności co odpowiada sytuacji braku obrotu wirnika ( $\omega = 0$ ), który ślizga się po osi.

W łożyskowaniu wirnika rzeczywistych MS występuje toczenie ze ślizganiem, co powoduje, że wartość przełożenia  $n$  jest zawsze nieco większa od wartości  $n$  przy występowaniu tylko czystego toczenia się wirnika po nieruchomej osi. Wtedy oczywiście warunek (2) nie jest spełniony. Wirnik częściowo ślizga się po osi, a charakterystyki MS zależą wtedy od momentu napędowego pojawiającego się na wirniku, kąta wzbudzenia i momentu tarcia w łożyskowaniu. Oczywiście przełożenie MS zależy także od zużycia w łożysku poprzecznym gdyż z powodu zużycia wzrasta luz w łożyskowaniu wirnika na

nieruchomej osi. Znając zmienność przełożenia w czasie pracy MS można określić zmienność luzu i w ten sposób wyznaczyć zużycie w łożysku poprzecznym [20-22].



Rys.3. Ułożyskowanie wirnika w mikrosilniku elektrostatycznym skokowym wykonanym z niklu przy zastosowaniu technologii LIGA. Zasilanie trójfazowe: po spolaryzowaniu pary biegunów stojana oznaczonych numerem 3 spolaryzowana jest para oznaczona numerem 1 itd. Typowe wymiary mikrosilnika w  $\mu\text{m}$ :  $R_R=125$ , najmniejsza szczelina między biegunami =4, wysokość mikrosilnika =120,  $(R_j/R_R=0,25-0,75$  (najmniejszy możliwy do uzyskania luz w łożysku walcowym = 5),  $pR -30$ , stosunek grubości bieguna (zęba) do odległości między biegunami =0.36, liczba biegunów wirnika =26. a - schemat obtaczania się wirnika po nieruchomej osi, b - przekrój osiowy mikrosilnika przed wytrawieniem warstwy protektorowej o grubości 3  $\mu\text{m}$  z tytanu: 1 - stojan, 2 - wirnik, 3 - oś nieruchoma, 4 - przewód zasilania, podłoże zasilania (przewodzące) Cr-Ag, 5 - warstwa protektorowa (przed wytrawieniem i uwolnieniem wirnika), 6 - podłoże ceramiczne nie przewodzące z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , c i d - możliwe warianty konstrukcyjne łożyska (łożyska przyzmatyczne zamiast walcowego): c - frezowane i polerowane z miedzi (minimalny luz 3-4  $\mu\text{m}$ ), d - wykonane technologią LIGA z niklu - minimalny luz 2,5  $\mu\text{m}$ ).

## TARCIE I ZUŻYCIE

Poślizg wirnika na osi powoduje dysypację energii traconą w ten sposób zamiast napędzać wirnik. Zmniejszenie poślizgu ma więc istotny wpływ na pracę MS. Dla zmniejszenia poślizgu zawsze znaczenie ma tarcie w łożysku poprzecznym. Przy czystym ślizganiu (zamiast toczenia) wirnika na osi, które możliwe jest przy braku tarcia w łożysku, przełożenie  $n$  dąży do nieskończoności (wirnik nie wiruje). Poślizg zależy od różnicy momentu napędowego i momentu tarcia w ułożyskowaniu może być wyznaczony przez pomiar przełożenia MS [20, 23, 24]. Obserwowanie zmienności przełożenia pozwala scharakteryzować pracę MS harmonicznego typu wobble.

Analizy teoretyczne i badania doświadczalne ruchu wirnika w mikrosilnikach wykazują że tarcie elementów o siebie decyduje w oporach ruchu znacznie przewyższając opory viskozyczne i wynikające z bezwładności wirnika [2,4, 16, 24]. Współczynnik tarcia kinetycznego w łożyskach MS wyznaczony metodami analityczno-doświadczalnymi wynosi przy tarcia elementu krzemowego o krzemowy 0.25-0.40 a przy tarcia elementu krzemowego o warstwę azotku krzemu ocenia się na 0.20-0.35 [2, 4, 22, 24]. Współczynnik tarcia kinetycznego, jak wynika z tych badań, nie zależy od powierzchni styku mikroelementów. Tarcie statyczne przewyższa znacznie tarcie kinetyczne a siła tarcia wzrasta przy wzroście czasu kontaktu nieruchomych elementów. Straty energii z powodu tarcia w łożyskach dochodzą do 40%. Podobne wyniki uzyskano dla turbinek a także przy badaniu modelowych par trących przy użyciu makroskopowych lub mikroskopowych elementów trących [2, 9]. Straty tarcia przy pracy w atmosferze azotu są mniejsze niż przy pracy w atmosferze powietrza. Siły tarcia nie wynikają z ciężaru wirnika lecz z sił elektrostatycznych i w typowych MS wynoszą ok. 0.04 i 0.15  $\mu\text{N}$  odpowiednio w łożysku poprzecznym i wzdłużnym.

Badania tarcia w łożysku mikroturbin wykazały że współczynniki tarcia dla skojarzeń krzem-krzem można ocenić na 0.25-0.35 [9]. Trwałość łożysk mikroturbin z krzemu ocenia się na milion obrotów a z niklu na 85 milionów obrotów [S, 9].

Zużycie występujące w łożyskach MS, mikroturbin, kół zębatach i innych elementów obrotowych wywiera duży wpływ na działanie mikrosystemów. Badania tarcia i zużycia prowadzi się zarówno w rzeczywistych mikrosystemach jak i przy użyciu par modelowych [2, 5, 9, 21, 22, 24]. Badania tarcia i zużycia w łożyskach elektrostatycznych MS harmonicznym (typu wobble ,rys. 1 c, d) przeprowadzone in situ metodą ciągłego śledzenia zmian przelożenia wykazały że tarcie kinetyczne nie zależy od konturowej powierzchni styku a trwałość łożyska nie jest wyznaczona tylko przez zużycie jego elementów lecz często przez wzrost momentu tarcia powyżej momentu napędowego na wirniku. Zużycie mierzone in situ poprzez śledzenie zmian przelożenia (a więc luzu w łożysku poprzecznym) jest zwykle znaczne gdyż przelożenie zmienia się w typowych MS o 22% (od 90 przy rozpoczęciu pracy do 70 po zużyciu łożyska). Daje to przyrost luzu dochodzący do 60 nm po 100 milionach obrotów (co odpowiada ok. 11 km drogi tarcia) [2, 21, 22].

Zużycie wpływa na trwałość MS przynajmniej w dwojaki sposób. Nadmierne zużycie łożysk prowadzi do utraty zdolności do pracy MS gdyż w szczególności w przypadku bardzo dużego zużycia łożyska poprzecznego pojawiają się nieznaczne siły promieniowe (z powodu zbliżenia biegunów stojana i wirnika i utraty symetrii) powodujące z kolei większe siły tarcia i większe zużycie itd. Wystąpienie zużycia powoduje też pojawienie się w strefie tarcia elementów łożyska produktów zużycia mogących powodować przyspieszone zużycie ścierne, zakleszczenie się wirnika na osi w przypadku migracji produktów zużycia do szczeliny między biegunami wirnika i ich akumulacji zwarcie elektryczne. Synergia tarcia i zużycia w łożyskach MS jest szczególnie wyraźna i niebezpieczna. Trwałość MS, zależna przede wszystkim od tarcia i zużycia w łożyskach, w warunkach laboratoryjnych, w atmosferze powietrza, nie przekracza obecnie 10 dni ciągłej pracy

Zmniejszenie tarcia i zużycia w mikrołożyskach jest podstawowym problemem, którego rozwiązanie gwarantuje osiągnięcie dobrych charakterystyk pracy, niezawodności i trwałości mikromechanizmów. Prosty ideowo sposobem jest wyeliminowanie bezpośredniego styku współpracujących mikroelementów (lewitacja). Dobór postaci konstrukcyjnej elementów, zastosowanie odpowiedniego smarowania, dobór właściwych materiałów, stanu powierzchni trących i innych cech konstrukcyjnych mikroelementów umożliwia kontrolowanie właściwości mikrowęzłów tarcia.

Lewitację mikroelementów, rozumianą w przypadku mikrosystemów jako uzyskanie kontrolowanego ruchu mikroelementu bez występowania bezpośredniego styku z elementem nieruchomym, uzyskuje się w MEMS zwykle tylko doraźnie, krótkotrwale różnymi sposobami. Lewitację wirnika MS można uzyskać w kontrolowanym polu elektrycznym

lub poprzez wdmuchiwanie (zewnątrzne lub samoczynne) gazu (powietrza) między stojan (podłoże) i wirnik (mikrołożysko gazostatyczne lub gazodynamiczne). Zmniejszenie tarcia i zużycia w mikrosystemach można uzyskać poprzez racjonalne dobieranie postaci i cech konstrukcyjnych elementów trących. Lepsze efekty przeciwtarciowe uzyskuje się, jak już wspomniano wyżej, przy zastosowaniu łożysk przyrzątecznych zamiast tradycyjnych walcowych (rys. 3) [5]. Wiąże się to w dużym stopniu z możliwością ukrycia się w narożach i zagłębieniach powierzchni trących produktów zużycia i w związku z tym - brakiem ich negatywnego wpływu na proces tarcia.

## PODSUMOWANIE

Dynamiczny rozwój mikrosystemów ograniczony jest problemami łożyskowania elementów ruchomych. Konstrukcja łożyskowania ma duży wpływ na straty energii, niezawodność i trwałość MEMS. Racjonalny dobór postaci i cech konstrukcyjnych mikrowęzłów tarcia wymaga nie tylko znajomości procesów trybologicznych lecz także technologii wytwarzania mikrosystemów. Dobór właściwych cech konstrukcyjnych umożliwi zminimalizowanie oddziaływań powierzchniowych, elektrostatycznych i innych mających decydujący wpływ na zachowanie się mikrowęzłów tarcia.

## BIBLIOGRAFI

- [1] Mrugalski Z., Rymuza Z.: Mikrotechnika - MEMS. Pomiary Automatyka Kontrola 1993, nr 6, 133-137
- [2] Mehregany M., Tai C.: Surface micromachined mechanisms and micromotors. Journal of Micromechanics and Microengineering 1991, 1, 73-85
- [3] Wallrabe U., Bley P., Krevet B. i in.: Design rules and test of electrostatic micromotors made by the LIGA process. Journal of Micromechanics and Microengineering 1994, 4, 40-45
- [4] Tavrow L. S., Bart S.F., Lang J.H.: Operational characteristics of microfabricated electric motors. Sensors and Actuators 1992, A35, 33-44
- [5] Wallrabe U.: Entwicklung, Optimierung und Test von elektrostatischen Mikromotoren nach dem LIGA Verfahren. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1992
- [6] Guckel H., Christenson T., Skrobis K.: Metal micromechanisms via deep x-ray lithography, electroplating and assembly. Journal of Micromechanics and Microengineering 1992, 2, 225-228
- [7] Fuhr G.R., Hagedorn R., Muller T. i in.: Dielectric induction micromotors: field levitation and torque-frequency characteristics. Sensors and Actuators 1992, A32, 525-530
- [8] Rymuza Z.: Mikromechanizmy. Pomiary Automatyka Kontrola 1995, w druku
- [9] Gabriel V., Behi F., Mahadevan R.: In situ friction and wear measurements in integrated polysilicon mechanisms. Sensors and Actuators 1990, A21-23, 184-188
- [10] Mathieson D., Robertson B.J., Beerschwinger U. i in.: Micro torque measurements for a prototype turbine. Journal of Micromechanics and Microengineering 1994, 4, 129139
- [11] Paratte L., Lorenz H., Luthier R. i in.: Miniature gear reduction unit driven by a silicon electrostatic wobble motor. Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, An Investigation of Microstructures, Sensors, Actuators, Machines and Robotic Systems (Oiso 1994), New York, IEEE 1994, 119-123
- [12] Markert J., Rauch M., Breng U. i in.: Elektrostatischer Mikroaktor. Feinwerktechnik und Messtechnik 1993, 101(5), 193-196

- [13] Schafer A., Rauch M.: Mikromechanisches Schneidenlager. *Feinwerktechnik und Messtechnik* 1992, 100(12), 567-570
- [14] Pister K.S.J., Judy M.W., Burgett S.R., Fearing R.S.: Microfabricated hinges. *Sensors and Actuators* 1992, A33, 249-256
- [15] Fricke J., Obermeier E.: Cantilever beam accelerometer based on surface micromachining technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 1993, 3, 190-192
- [16] Fan L. S., Tai C., Muller R. S.: IC-processed electrostatic micromotors. *Sensors and Actuators* 1989, 20, 41-47
- [17] Mehregany M., Senturia S.D., Lang J.H., Nagarkar P.: Micromotor fabrication. *IEEE Transactions on Electron Devices* 1992, 39, 2060-2069
- [18] Trimmer W., Jebens R.: Harmonic electrostatic motors. *Sensors and Actuators* 1989, 20, 17-24
- [19] Jacobsen S.C., Price R.H., Wood J.E. in: A design overview of an eccentric-motion electrostatic microactuator. *Sensors and Actuators* 1989, 20, 1-16
- [20] Phillips S.M., Mehregany M.: Effect of rotor slip on the gear ratio of harmonic side-drive micromotors. *Sensors and Actuators* 1993, A36, 249-254
- [21] Mehregany M., Senturia S.D., Lang J.H.: Measurement of wear in polysilicon micromotors. *IEEE Transactions on Electron Devices* 1992, 39, 1136-1143
- [22] Mehregany M., Senturia S.D., Lang J.H.: Friction and wear in microfabricated harmonic side-drive motors. *Technical Digest: IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, SA June 1990, 17-22*
- [23] Mehregany M., Phillips S.M., Hsu E.T., Lang J.H.: Operation of harmonic side-drive micromotors studied through gear ratio measurements. *Technical Digest 6th Int. Conference Solid State Sensors and Actuators, Transducers '91, San Francisco, CAUSA, June 24-28, 1991, 59-62*
- [24] Dhuler V.R., Mehregany M., Phillips S.M.: An experimental technique and a model for studying the operation of harmonic side-drive micromotors. *IEEE Transactions on Electron Devices* 1993, 40, 1977-1984

## MICROBEARINGS

### SUMMARY

Design and tribological behaviour of plain bearings embodied in microelectromechanical systems (MEMS), e.g. in micromotors, having micrometer sized elements are discussed.

*Recenzja: prof. dr hab. inż. Jan Burcan*