

## THE MATERIALS ENGINEERING CONTRIBUTION IN MICROBEARING LUBRICATION

Oliwia Łupicka, Krzysztof Wierzcholski

Technical University of Koszalin  
Institute of Mechatronics, Nanotechnology and Vacuum Technique  
Raclawicka Street 15-17, 75-620 Koszalin, Poland  
tel.: +48 94 34 78 221  
e-mail: krzysztof.wierzcholski@wp.pl, oliwia.lupicka@wp.pl

### Abstract

*In microbearings where the gap is very thin e.g. much smaller than one micrometer, the materials properties of the thin superficial layer have the important influence on the oil dynamic viscosity and hence on the microbearing operating parameters such as microbearing carrying capacities, friction forces, friction coefficients and wear. Therefore very important meaning has the application of a novel method of depositing thin organic and inorganic layer (superficial layer) onto a metal substrate utilizing electro-spraying (electrostatic atomization) method.*

*Microbearings assure the greater stability of work. The lubricant factor, introduced between friction elements, delays the dry contact and prevents to seizing between co-operative rotary surfaces and gives better effects of sealing up and hydrodynamic stiffness. Microbearings are used in microturbines, micromechanisms, microengines, mechanical medical devices, e.g. manipulators and microsurgical cutting tools. The diminution sizes of devices cause more and more wide their usage in ophthalmology, laryngology, neurology, vascular and orthopaedic surgery. The essential part in microbearings has the top-layer on friction surfaces microelements which are metal layers - polymer layers, ceramic layers and layers with addition carbon in form of nanopipes.*

**Keywords:** microbearing, superficial layer, nano-level

## WKŁAD INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ W SMAROWANIU MIKROŁOŻYSK

### Streszczenie

*W mikrołożyskach, gdzie szczelina jest bardzo cienka, dużo mniejsza od jednego mikrometra, właściwości materiałowe cienkiej warstwy wierzchniej mają decydujący wpływ na lepkość dynamiczną oleju. Wpływają również na takie parametry eksploatacyjne mikrołożyska jak nośność mikrołożyska, siły tarcia, współczynniki tarcia oraz zużycie. Dlatego bardzo duże znaczenie ma zastosowanie nowych metod nakładania cienkich nieorganicznych lub organicznych powłok metodą natryskiwania. Nowe osiągnięcia w tym zakresie dotyczą zastosowań technologii nanoszenia warstw wierzchnich w odniesieniu do współpracujących powierzchni w mikrołożyskach.*

*Mikrołożyska zapewniają większą stabilność pracy. Czynnik smarujący, wprowadzany pomiędzy elementy trące, opóźnia suchy kontakt i zapobiega zatarciom pomiędzy współpracującymi obrotowymi powierzchniami oraz daje lepsze efekty uszczelniania i sztywności hydrodynamicznej. Mikrołożyska są wykorzystywane w mikro turbinach, mikromechanizmach, mikrosilnikach, mechanicznych urządzeniach medycznych, np. manipulatorach i mikrochirurgicznych narzędziach tnących MEMS. Zmniejszenie wymiarów urządzeń powoduje coraz szersze ich stosowanie w okulistyce, laryngologii, neurologii, chirurgii naczyniowej i ortopedycznej.*

**Słowa kluczowe:** mikrołożyska, warstwa wierzchnia, nanoskala

### 1. Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój nanotechnologii oraz systemów mikroelektromechanicznych (Microelectromechanical Systems - MEMS) zaczyna odgrywać kluczową rolę w ważnych obszarach naszego życia, np. transporcie, komunikacji, zautomatyzowanej produkcji przemysłowej, opiece zdrowotnej, obronie systemów oraz szerokim zasięgu produktów konsumenckich[3].

Systemy mikro-elektromechaniczne (MEMS) są zintegrowanymi urządzeniami elektryczno-elektroniczno-mechanicznymi, o wielkości od kilku do kilkuset mikrometrów, mogącymi przetwarzać różne wielkości mechaniczne (np. ciśnienie, przyspieszenie) na wielkości elektryczne (np. napięcie, natężenie prądu) i odwrotnie. Są wytwarzane na masową skalę za pomocą technologii podobnych do tych, jakie są stosowane przy produkcji elektronicznych układów scalonych (np. tranzystorów). Dotychczas, opracowano około stu mikroukładów z myślą o różnych specjalnych zastosowaniach. Można wśród nich wyróżnić [3]: czujniki ciśnieniowe, czujniki bezwładnościowe, optyczne i bezprzewodowe urządzenia komunikacyjne. W porównaniu z makroskopowymi odpowiednikami, systemy MEMS posiadają wiele korzystnych cech, w tym m.in. bardzo małe wymiary i masę, charakteryzują się małym rozproszeniem energii oraz zwiększoną szybkością i precyzją działania.

Jednym z elementów systemu MEMS są hydrodynamiczne mikrołożyska ślizgowe, które znajdują zastosowanie m.in. w komputerowych twardych dyskach HDD [21]. Mikrołożyska są elementem mechatronicznym, powstałym w wyniku wspólnych badań takich dziedzin nauki jak: mechanika i elektronika przy wykorzystaniu zaawansowanych programów informatycznych (Rys. 1).



Rys. 1. Schemat obszaru badawczego mechatroniki z uwzględnieniem mikrołożysk  
 Fig. 1. Diagram of research area of mechatronics with microbearing regard

Mikrołożyska zapewniają większą stabilność pracy. Czynnik smarujący, wprowadzany pomiędzy elementy trące, opóźnia suchy kontakt i zapobiega zatarciom pomiędzy współpracującymi obrotowymi powierzchniami oraz daje lepsze efekty uszczelniania i sztywności hydrodynamicznej. Mikrołożyska wykorzystywane są w mikroturbinach, mikromechanizmach, mikrosiłnikach, mechanicznych urządzeniach medycznych np. manipulatorach i mikrochirurgicznych narzędziach tnących MEMS [8]. Zmniejszenie wymiarów urządzeń powoduje m.in. coraz szersze stosowanie tego typu urządzeń medycznych m.in. w okulistyce, laryngologii, neurologii, chirurgii naczyniowej i ortopedycznej.

Projektowanie oraz wytwarzanie samosmarujących warstw wierzchnich w mikro- i nanoelementach oraz mikroukładach jest nowym wyzwaniem dla inżynierów materiałoznawców. Z danych literaturowych [7] wynika, że około 85% awarii urządzeń mechanicznych występuje z powodu uszkodzenia warstwy wierzchniej poszczególnych elementów np. powierzchni łożysk. Konieczne jest zatem staranne nadawanie odpowiednich właściwości warstwom wierzchnim elementów trących, tak by przeciwdziałać niszczącemu wpływowi warunków środowiska na materiał, z którego są wykonane węzły tarcia ślizgowego.

## 2. Aktualnie wytwarzane warstwy wierzchnie na powierzchniach trących mikrołożysk – analiza zagadnienia

Idealna warstwa wierzchnia stosowana w mikrołożyskach ślizgowych powinna charakteryzować się m.in.: wysoką wytrzymałością na naciski, niską wytrzymałością na ścinanie struktur materiałowych, wysoką twardością, wysoką adhezją, dużym współczynnikiem sprężystości

Younga, dużą odpornością na wysokie temperatury oraz minimalnym współczynnikiem tarcia pary trącej. Wymienione właściwości warstwy wierzchniej są niezbędne do prawidłowej pracy łożyska.

Aktualnie wytwarzane warstwy wierzchnie na powierzchniach trących mikroelementów np. mikrołożysk, można podzielić na dwie grupy. Są to:

- warstwy metalowe oraz
- warstwy niemetalowe, w których dodatkowo można wyróżnić:
  - warstwy polimerowe,
  - warstwy ceramiczne.

Aby móc zaproponować właściwy materiał do wykonania warstwy wierzchniej mikrołożyska, autorzy przedstawili poniżej przegląd obecnie stosowanych materiałów i warstw łożyskowych.

## 2.1. Warstwy metalowe

Materiały łożyskowe i warstwy metalowe zajmują poczesne miejsce wśród materiałów stosowanych do wytwarzania systemów mikro- i nanoelektromechanicznych MEMS/NEMS. Cienkie warstwy metali stosowane są w licznych przypadkach, np. jako trawione maski w trakcie wytwarzania mikroelementów i mikrouządzeń [3, 4] lub jako warstwy osłonowe zabezpieczające mikrołożyska przed zatarciem. Warstwy te, są nanoszone metodami CVD i PVD.

Typowymi warstwami stosowanymi w mikrołożyskach są warstwy otrzymane na bazie Ti [18], Cr [22], Al i Au. Niestety pierwsze z tych warstw charakteryzuje duża kruchość co powoduje, że przy dużych naciskach pękają. W pracy [8] zastosowano stop o składzie Au/Sn (80/20), który charakteryzował się przede wszystkim bardzo dobrą adhezją oraz temperaturą topnienia wynoszącą ok. 370°C.

Do wytwarzania elementów systemów MEMS wykorzystywanych w mikrooptyce, mikrorobotyce, mikroturbinach, etc. stosowany na ogół Si i Ni. W badaniach prezentowanych w pracy [6] porównano powłokę Ni o grubości 5µm oraz warstwę stopu Ni-W o grubości 5-7µm wytworzone metodą osadzania elektrolitycznego (galwanicznie). Stop Ni<sub>8,4%</sub>-W uzyskany metodą elektrochemiczną charakteryzował się dwa razy większą twardością 567 HV przy obciążeniu 50 g, w porównaniu do twardości powłoki Ni wynoszącej 277 HV. Z kolei szerokość śladu zużycia wynosiła odpowiednio 1,05 mm dla Ni i 0,64 mm dla warstwy stopu Ni-8,4%-W. Współczynnik tarcia dla powłoki Ni i stalowej przeciwpróbki wynosił 0,87, natomiast dla stopu Ni-8,4%-W wynosił 0,82. W przypadku wielowarstwowej powłoki Ni-P-W i stalowej przeciwpróbki współczynnik tarcia kształtuje się na poziomie 0,7-1,2 [9]. Zastosowanie do wytwarzania systemów mikroelektromechanicznych znalazły nie tylko metale i proste stopy, ale również stopy złożone np. TiAl<sub>6</sub>V<sub>4</sub> [3].

Ze względu na dużą przewodność elektryczną, jako materiały osłonowe, powszechnie stosowane jest złoto i srebro. Są one również przydatne jako materiały elektromechaniczne, np. przełączniki w systemach MEMS o częstotliwości radiowej. Stopy Ni-Ti z pamięcią kształtu w postaci cienkich filmów są wykorzystywane w urządzeniach mikroprzepływowych, takich jak mikrozawory i mikropompy [3].

## 2.2. Warstwy niemetalowe

Warstwy niemetalowe stanowią drugą grupę warstw stosowanych w mikrołożyskach oraz systemach MEMS/NEMS. Wśród nich wyróżnia się warstwy polimerowe oraz warstwy ceramiczne.

### *Warstwy polimerowe*

Udział materiałów polimerowych w technice od wielu lat systematycznie wzrasta. Materiały te, a zwłaszcza kompozyty powstałe na ich podstawie, znalazły zastosowanie w wielu oryginalnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, w których zastosowanie innych materiałów byłoby trudne lub wręcz niemożliwe. Wynika to zarówno ze względów użytkowych, jak i ekonomicznych. Przykładem mogą być węzły ślizgowe (łożyska, uszczelnienia, przeguby), w których smarowanie jest

niedostateczne lub całkowicie niemożliwe. Panewki z materiałów polimerowych znajdują szerokie zastosowanie ze względu na korzystne właściwości ślizgowe, takie jak: niski współczynnik tarcia suchego, odporność na ścieranie, tłumienie drgań, cichobieżność, odporność na korozję, mała gęstość i łatwość kształtowania [20]. Panewki wytwarza się z polimerów nie wymagających smarowania, co jest szczególnie atrakcyjną cechą w przypadku ich stosowania tam, gdzie istnieje konieczność zapewnienia odpowiedniej czystości, np. przemysł farmaceutyczny, spożywczy, papierniczy. Wadami łożysk polimerowych są przede wszystkim ograniczona zdolność przenoszenia obciążeń, mała przewodność cieplna, duża rozszerzalność oraz duża degradowalność warstw polimerowych, a także zmiana wymiarów wskutek zmian warunków otoczenia (np. pęcznienie pod wpływem wchłaniania wody). Materiały polimerowe cechują się również stosunkowo niską temperaturą pracy, tylko w niektórych przypadkach przekraczającą 100°C (maksymalnie 250°C dla PTFE), co w przypadku ich stosowania na panewki łożysk istotnie ogranicza maksymalne dopuszczalne prędkości ślizgania [10]. Zalecanymi materiałami w tego typu zastosowaniach są między innymi politetrafluoroetylen (PTFE) oraz jego kompozyty. Niemodyfikowany PTFE charakteryzuje się dobrymi właściwościami ślizgowymi, ale także niską wytrzymałością mechaniczną i odpornością na zużycie. Dlatego PTFE stosuje się zwykle jako polimer bazowy lub wypełniacz do tworzenia kompozytów. Niektóre z tych właściwości poprawiają się (wzrasta odporność na zużycie oraz wytrzymałość na pełzanie), z kolei inne mogą ulec pogorszeniu (wzrasta wartość współczynnika tarcia, maleje odporność chemiczna). O wielkości zmian decyduje zarówno rodzaj wypełniacza, jak i jego ilość w kompozycie. Materiały kompozytowe stanowią obecnie jedną z coraz częściej stosowanych grup materiałów w zastosowaniach trybologicznych [20]. Poza PTFE, na panewki łożysk ślizgowych stosowane są również polistyren (PS), poliamidy (PA6, PA11, PA66), poliacetal (POM), DE20076, DE100KM, DE12017, Nylon-66, ZY103HSL [2], a także PET i PET/PTFE, które zostały szczegółowo zbadane i opisane [15, 16].

Obiecujące wyniki otrzymali autorzy pracy [2], którzy badali warstwy polimerowe w różnych warunkach kontaktu ciernego. Statyczny współczynnik tarcia zmienia się w zależności od rodzaju środka smarnego oraz obciążenia. Najlepsze wyniki otrzymano dla tarcia suchego niezależnie od rodzaju stosowanej przeciwpróbki dla wszystkich badanych materiałów.

Z kolei w pracy [12] opisano proces rozruchu w mikrołożysku ślizgowym polimerowym o czopie i panewce wykonanych z polimeru. Przy użyciu mikroskopu sił atomowych (AFM) badano model geometryczny obszaru współpracy trybologicznej dwóch rzeczywistych powierzchni polimerowych oraz model fizyczny ścinania z uwzględnieniem siły stycznej (tarcia). Opisano program symulacyjny i przedstawiono wyniki obliczeń porównując je z wynikami badań tarcia w fazie rozruchu oraz hamowania takich łożysk.

#### *Warstwy ceramiczne*

Kolejną grupą są warstwy ceramiczne, do których zalicza się m.in. diamond-like carbon (DLC). Są one twarde, hydrofobowe, wykazują relatywnie niską energię powierzchni oraz mogą być modyfikowane w celu poprawienia ich przewodnictwa elektrycznego. Inne własności tj. stabilność termiczna, obojętność chemiczna, sprawiają, że warstwy te nadają się doskonale do procesu wytwarzania mikromechanizmów [1, 13]. W pracy [11] opisano mechaniczne własności SiC, DLC, które są idealnymi tribo-materiałami stosowanymi w systemach MEMS. Z kolei badania przedstawione w [5] dowodzą, że Si nie jest odpowiednim materiałem konstrukcyjnym do stosowania w zminiaturyzowanych ruchomych mechanizmach (np. mikrołożyska, koła zębate) pracujących w próżni.

Innym powszechnie stosowanym materiałem jest krzem tworzący wiele słabo przewodzących związków z metalami. Krzemki nakłada się metodami PVD i CVD. Jednym z zastosowań jest pokrywanie polisilikonu bramkowego, co prowadzi do ponad czterokrotnego zmniejszenia jego rezystancji [14]. Najczęściej używanymi krzemkami są:  $WSi_2$ ,  $TaSi_2$  i  $MoSi_2$ .

Autorzy [17] przeprowadzili badania na stali 100Cr6 oraz na  $Al_2O_3$ . Na powierzchni trącej, wytworzono za pomocą lasera różne struktury m.in. w postaci rowków, odseparowanych dołków lub

w postaci szachownicy. Zrealizowane badania tribologiczne wykazały, że teksturowanie powierzchni obniża współczynnik tarcia o ok. 30% w porównaniu do powierzchni polerowanej.

W pracy [23] stosowano mieszane smarowanie za pomocą mieszaniny smarującej z MoS<sub>2</sub> i oleju. Dla tego rodzaju smarowania w temperaturze 20°C uzyskano współczynnik tarcia o wartości 0,06, zaś dla mieszaniny WS<sub>2</sub> i oleju współczynnik tarcia wynosił 0,08.

### **3. Metody otrzymywania warstw**

Opisane powyżej warstwy nanoszone są metodami PVD i CVD. Nakładanie warstwy metalowej w procesie PVD obejmuje naporowywanie, nakładanie plazmowe i napyłanie katodowe. Naporowywanie i nakładanie plazmowe wykorzystywane jest do produkcji układów małej i średniej skali integracji. Napyłanie katodowe charakteryzuje się :

- dużą szybkością nakładania warstwy,
- możliwością nakładania złożonych stopów,
- możliwością nakładania metali o wysokiej temperaturze topnienia,
- dobrą jakością na całej powierzchni dużych płyt krzemowych.

Proces CVD stosuje się do nakładania Al, Cu, WSi<sub>2</sub>, TiN i W, jednak jedynie dla WSi<sub>2</sub> i W jest dobrze opracowany i powszechnie używany [14].

### **4. Podsumowanie i wnioski**

Stosowanie warstw wierzchnich w mikrołożyskach rozszerza obszar badawczy. Elementy tribologiczne w tak małej skali, z jaką mamy do czynienia w mikrołożyskach, implikują nowe problemy związane z tarciem, które nie występowały w skali makro. Są to: problemy związane z wpływem sił adhezji i kohezji, a także sił kapilarnych na lepkość oleju, a nawet problemy oddziaływań sił Van der Waals'a w skali nano na proces smarowania. W takich stanach występuje zmiana lepkości czynnika smarującego po grubości warstwy granicznej. Takie zmiany w przypadku klasycznego smarowania łożysk w skali makro nie występowały. Ponadto, zmiany lepkości po grubości warstwy granicznej powodują zmiany ciśnienia po grubości filmu olejowego. Warto zauważyć, że stała wartość ciśnienia po grubości filmu olejowego jest podstawowym założeniem hydrodynamicznej teorii smarowania w skali makro. Powszechnie wiadomo, że lepkość oddziałuje w istotnym zakresie na zmiany wartości współczynnika tarcia, a także na własności materiałowe warstwy wierzchniej współpracującej z warstwą graniczną czynnika smarującego. W mikrołożyskach własności materiałowe warstwy wierzchniej wpływają na lepkość dynamiczną warstwy granicznej oleju.

Materiałami dotychczas stosowanymi do produkcji makrołożysk były najczęściej stopy łożyskowe cyny i ołowiu, jednakże w ostatnich latach coraz częściej są one zastępowane stopami na osnowie cyny, stopami na osnowie miedzi (brązy cynowe, ołowiane i cynowo-ołowiane) oraz stopami na osnowie aluminium. Grubość nanoszonej warstwy zawiera się w przedzie od kilku do kilkudziesięciu μm. Nowością są łożyska wykonane w całości z materiałów polimerowych np. PTFE, jednak „żywość” tych łożysk, ze względu na niską twardość oraz niską odporność na zużycie, jest krótsza niż tradycyjnych łożysk metalowych.

W przypadku pokryć elementów mikrołożysk stosowane są przeważnie warstwy metalowe (na bazie Ti, Cr, Al., Ni oraz Au), warstwy ceramiczne (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, DLC, SiC) oraz rzadziej polimerowe.

Zdaniem autorów duże możliwości wiążą się z zastosowaniem warstw węglowych, określanymi mianem DCL. Warstwy te, charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia, zaś domieszkowanie ich metalami może powodować znaczną poprawę ich adhezji do podłoża. W dostępnej literaturze, występują co prawda opracowania związane z tego typu warstwami, jednak zaledwie kilka prac dotyczy zastosowań warstw DLC do wytwarzania mikrołożysk.

Inna propozycja warstwy wierzchniej stosowanej na mikrołożyska, dotyczy powłoki składającej się z PTFE z dodatkiem węgla w postaci nanorurek.

Dynamiczny postęp w dziedzinie nanotechnologii z pewnością przyniesie w najbliższej przyszłości nowe interesujące zastosowania materiałów metalowych i niemetalowych do wytwarzania systemów MEMS/NEMS.

## Literatura

- [1] Beerschwinger, U., Reuben, R. L., Yang, S. J., *Frictional study of micromotor bearings*, Sensors and Actuators A 63, pp. 229-241, 1997.
- [2] Benabdallah, Habib, S., *Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions*, Tribology International 40, pp. 64-73, 2007.
- [3] Bhushan, B., *Springer Handbook of Nano-technology*, 2004.
- [4] Bhushan, B., *Nanotribology and nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS materials and devices*, Microelectronic Engineering 84, pp. 387-412, 2007.
- [5] Gardos, M. N., Gabelich, S. A., *Atmospheric effects of friction, friction noise and wear with silicon and diamond, Part II, SEM tribometry of silicon in vacuum and hydrogen*, Tribology Letters 6, pp. 87-102, 1999.
- [6] Haseeb, A. S. M. A., Albers, U., Bade, K., *Friction and wear characteristics of electrodeposited nanocrystalline nickel-tungsten alloy films*, Wear 264, pp. 106-112, 2008.
- [7] Hebda, M., Wachal, A., *Trybologia*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
- [8] Horváth, I., Panayotatos, P., Lu, Y., *A Si MEMS microbearing with integrated safety sensors for surgical applications*, Microelectronics Journal 32, pp. 1-9, 2001.
- [9] Jie, X.H., Chen, Y.D., Xie, G.R., *Friction and wear behavior of brush plated Ni-W(D) layer in oil lubrication sliding against a mild steel*, Tribology 22, pp. 180-183, 2002.
- [10] Kostrzewa, S., Kowalczyk, S., Roźniatowski, K., *Materiały stosowane w łożyskach ślizgowych – stan obecny i tendencje rozwojowe*, Inżynieria Materiałowa, 5, s. 840-846, 2007.
- [11] Krauss, A.R., Auciello, O., Gruen, D.M., Jayatissa, A., Sumant, A., Tucek, J., Mancini, D.C., Moldovan, N., Erdemir, A., Ersoy, D., Gardos, M.N., Busmann, H.G., Meyer, E.M., Ding, M.Q., *Ultrananocrystalline diamond thin films for MEMS and moving mechanical assembly device*, Diamond and Related Materials 10, pp. 1952-1961, 2001.
- [12] Kwacz, M. ; Rymuza, Z. ; Kusznierevicz, Z., *Prognozowanie oporów tarcia w fazie rozruchu w mikrołożysku ślizgowym polimerowym*, Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie, Nr 1, s. 299-313, 2002.
- [13] Maboudian, R., *Surface processes in MEMS technology*, Surface Science Reports 30, pp. 207-269, 1998.
- [14] Orlikowski, M., *Technologie przyrządów półprzewodnikowych*, Materiały Wykładowe, Politechnika Łódzka, 2009.
- [15] Rymuza, Z., Kusznierevicz, Z., SolarSKia, T., Kwacz, M., Chizhik, S.A., Goldade, A.V., *Static friction and adhesion in polymer-polymer microbearings*, Wear 238, pp. 56-69, 2000.
- [16] Samyn, P., Quintelier, J., Ost, W., De Baets, P., Schoukens, G., *Sliding behaviour of pure polyester and polyester-PTFE filled bulk composites in overload conditions*, Polymer Testing 24, pp. 588-603, 2005.
- [17] Schreck, S., Zum Gahr, K.-H.: *Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties*, Applied Surface Science 247, pp. 616-622, 2005.
- [18] Stiharu, I., Bhat, R., Hong, H., *A friction model of microbearings with thin metallic compliant coatings*, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 317-329, 2003.
- [19] Tirtal, A., Baek, E. R., Choi, C. J., Lee, H. M., *Fabrication of Micro-Bearing Pattern with High Aspect Ratio Utilizing SU-8 Photoresist*, 2008, <http://seminar.fmipa.itb.ac.id/icmns2008/viewpaper.php?id=174>.
- [20] Wieleba, W., *Analiza procesów trybologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE ze stalą*, Prace naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

Politechniki Wrocławskiej, Monografie, Nr 30, 2002.

- [21] Wierzcholski, K., *A new concept of the changes of memory capacity of fluid dynamics HDD micro-bearings*, Tribologia, 220, Vol. 39, Nr 4, 2008.
- [22] Wilson, G. M., Smith, J. F., Sullivan, J. L., *A DOE nano-tribological study of thin amorphous carbon-based films*, Tribology International, 42, pp. 220-228, 2009.
- [23] Wiśniewska-Weinert, H., Leshchynsky, V., Kędzia, Ł., Ozwoniarek, J., Ignatiev, M., Kovalev, E., *Development of nanostructuring technique to produce pm - parts with improved tribological properties*, Int. Journal of Applied Mechanics and Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 529-533, 2006.

