

Jadwiga HOROSZKIEWICZ¹
Adam RUSZAJ¹
Sebastian SKOCZYPIEC¹

MATERIAŁY I PROCESY STOSOWANE W WYTWARZANIU ELEMENTÓW MEMS

W artykule przedstawiono zarys problematyki związanej z mikro – elektro – mechanicznymi systemami, a w szczególności podano informacje dotyczące stosowanych materiałów i technologii do ich wytwarzania. Obszar zainteresowań tematyką MEMS jest bardzo duży. Układy MEMS znajdują zastosowanie we wszystkich dziedzinach życia. Proces ich projektowania jest interdyscyplinarny i wymaga zastosowania specjalistycznych aplikacji. Podstawowym materiałem stosowanym w wytwarzaniu układów MEMS jest krzem. Obecnie identyfikowanych jest ponad 200 technologii stosowanych w wytwarzaniu MEMS, a wiele innych jest jeszcze na etapie badań laboratoryjnych.

1. WPROWADZENIE

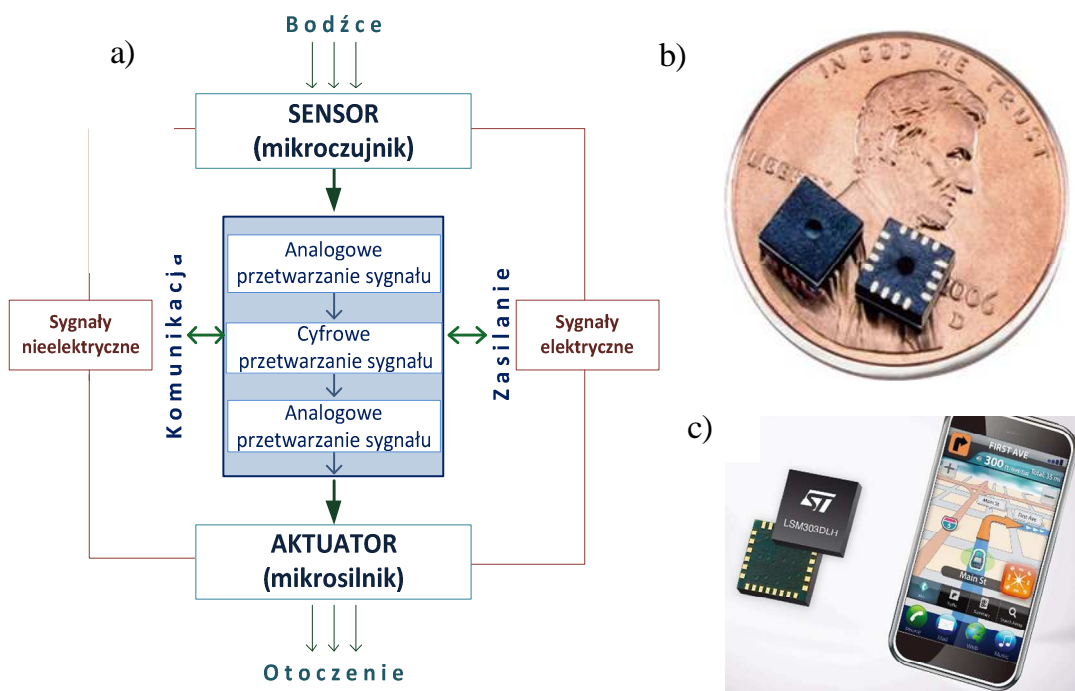
Dążenie do miniaturyzacji, czyli dążenie do zmniejszania rozmiarów urządzeń przy jednoczesnym zachowaniu ich pełnej użyteczności i funkcjonalności, jest obecnie wiodącym trendem w technologii. Postępująca miniaturyzacja najlepiej widoczna jest na przykładzie elektroniki (układy scalone, półprzewodniki). Istotna jest miniaturyzacja urządzeń w technologii krzemowej, m.in. układów MEMS – zintegrowanych układów mikro – elektro – mechanicznych. W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano zwiększony poziom zapotrzebowania na urządzenia tego typu. Wiele nowych możliwości i korzyści, jakie niesie za sobą stosowanie MEMS sprawia, że ich rynek należy do najprężniej rozwijających się i dochodowych dziedzin technologicznych [1–3]. Parafrazując znany cytat Shakespeare'a, możemy powiedzieć: *to MEMS or not to MEMS*.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Mikrosystemy przetwarzają i analizują informację z otaczającego go środowiska, a ich zintegrowane elementy wykonawcze (aktuatory) realizują zadania stosownie do

¹ Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

pozyskiwanej informacji (rys. 1a). Połączenie mikroelementów elektronicznych i mechanicznych tworzy wyjątkowe właściwości układów MEMS, które niosą ze sobą szereg korzyści. Układy MEMS charakteryzują się małymi wymiarami niewielką inercją, dużą odpornością na odkształcenia cieplne, są odporne na drgania, zużywają mało energii. Po to jednak, aby wykorzystać zalety MEMS należy rozwiązać wiele problemów konstrukcyjnych, technologicznych i produkcyjnych związanych z jakością i kosztami produkcji [3]. Identyfikuje się obecnie od 200 do 300 technologii stosowanych w wytwarzaniu układów MEMS. Jednym z ważnych zagadnień w technologiach elementów MEMS jest właściwy dobór materiałów i sposobów ich kształtowania. W niniejszym artykule skoncentrowano się przede wszystkim na scharakteryzowaniu materiałów i technologii, mniej znanych specjalistom od technik wytwarzania prowadzących prace badawcze w zakresie inżynierii mechanicznej. Umożliwi to lepsze wzajemne zrozumienie specjalistów z innych dziedzin, a tym samym współpracę w zespołach interdyscyplinarnych zajmujących się rozwojem MEMS. Przykładowe układy MEMS pokazano na rysunku 1b, 1c.



Rys. 1. Schemat działania MEMS [16] (a), prototyp napędu cyfrowego firmy TRW [wardsauto.com] (b), akcelerator MEMS [19] (c)

Fig 1. Idea of MEMS acting [16] (a), prototype of digital device by TRW company [wardsauto.com] (b), MEMS accelerometer [19] (c)

3. MATERIAŁY STOSOWANE W TECHNOLOGIACH MEMS

MEMS produkowane są z materiałów o specjalnych właściwościach, które łączymy z właściwościami elektronicznymi, efektem Dopplera, zjawiskami piezorezystywności,

piezoelektryczności czy termoelektryczności. Interakcje pomiędzy parametrami fizycznymi z elektrycznością, mechanicznymi naprężeniami, temperaturą, gradientem temperatury i stałymi dielektrycznymi są wykorzystywane w MEMS. Materiałem podstawowym w produkcji MEMS jest krzem (Si).

Krzem posiada dużą wytrzymałość, wartość modułu sprężystości – 190 Gpa, jest zbliżona do stali. Krzem odznacza się dużą przewodnością cieplną oraz małym współczynnikiem rozszerzalności. Dobrze znane są jego właściwości elektroniczne, jest czuły na naprężenia, zmiany napięcia, różnicę temperatury i zewnętrzne oddziaływania otoczenia [1]. Stosowane są również takie materiały jak tlenek krzemu (SiO_2), azotek krzemu (Si_3N_4), węgiel krzemu (SiC), kwarc, szkło, diament, arsenek galu (GaAs) i inne materiały, np. pierwiastki z grupy III i IV układu okresowego (składniki półprzewodników), azotek aluminium (AlN), tlenek aluminium (Al_2O_3), polimery (PMMA) oraz materiały z pamięcią kształtu (stopy Ti-Ni) oraz metale. Z metali (np. Ag, Al, Au, Cu, Ir, Ni, Ti itp.) wykonywane są np. elementy aktuatorów lub warstwy o specjalnych właściwościach [1].

Krzem ma silnie anizotropowe właściwości. W cienkich warstwach krzemu nie występują zjawiska zmęczeniowe. Struktury mikrosystemów wytwarzane są za pomocą głębokiej mikroobróbki krzemu, stosuje się głównie głębokie anizotropowe mokre trawienie krzemu [1]. Półfabrykat dla MEMS wykonuje się z krzemu monokrystalicznego, jest on wytwarzany metodą Czochralskiego, polegającą na powolnym wyciąganiu trzpienia z zamocowanym na nim kryształem Si – zarodkiem z tygla ze stopionym (czystym) krzemem. Zwiększający średnicę monokryształ osiągnąć może średnicę do 300mm i długość kilku metrów. Ostudzony wał jest cięty na cienkie płytki (500, 750 lub 1000 μm), a jego powierzchnia polerowana. Proces wg metody Czochralskiego jest powolny, ale tworzy regularny walec o określonych parametrach geometrycznych [1].

4. TECHNOLOGIE STOSOWANE W WYTWARZANIU MEMS

Wytwarzanie MEMS związane jest z technologiami mikroobróbki krzemu i innych wyżej wymienionych materiałów, powszechnie stosowanych w elektronice. Technologie krzemowe umożliwiają budowanie poszczególnych warstw, łączenie kilku warstw i ich integrację z innymi elementami MEMS. Czujniki MEMS wytwarzane są na podłożu krzemowym w wielu operacjach. Urządzenia MEMS wykonywane są często za pomocą technologii mikroelektronicznych, stosowanych do wytwarzania półprzewodników i układów scalonych. Przyjmuje się, że istnieją dwie grupy technologii – mikroobróbka powierzchniowa i mikroobróbka objętościowa. *Mikroobróbka powierzchniowa* polega na usuwaniu (wytrawianiu) lub dodawaniu warstw (osadzanie) materiału. *Mikroobróbka objętościowa* polega na usuwaniu pewnej ilości materiału (usuwanie warstw odbywa się głębiej, niż ma to miejsce w obróbce powierzchniowej). W rezultacie otrzymuje się strukturę trójwymiarową. Tak głębokie usuwanie materiału może odbywać się anizotropowo (w określonym kierunku) lub izotropowo. MEMS wytwarzane są za pomocą zmodyfikowanych i zaawansowanych technologii związanych z obróbką krzemu, głównie metodą wytlaczania, platerowania. Wytwarza się je głównie w operacjach mikroobróbki powierzchni krzemu, litografii, elektroosadzania – powlekania galwanicznego, formowania

tworzyw sztucznych, czy też obróbki elektroerozyjnej i elektrochemicznej. Do produkcji seryjnej mikroelementów wykorzystuje się również procesy mikroodlewania, mikroskrawania, mikroformowanie i mikroobróbki laserowej [2].

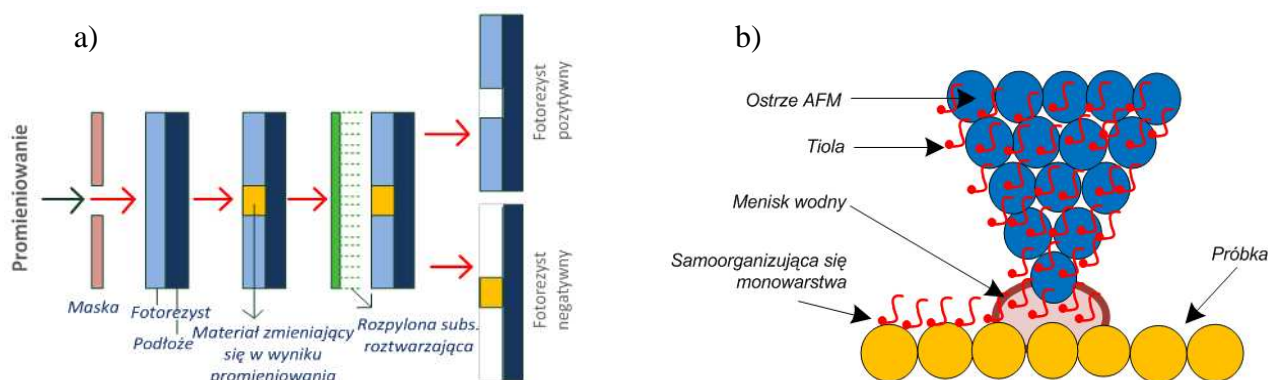
W wytwarzaniu elementów MEMS stosuje się *metody osadzania warstwowego*, takie jak: PVD (Physical Vapour Deposition), CVD (Chemical Vapour Deposition), LPCVD (Low Pressure CVD), PECVD (Plasma Enhanced CVD), napyłanie, naporowywanie, Electroplating. Stosowane są również procesy *trawienia* (suche, mokre, wspomagane plazmą – RIE, DRIE, mokre chemiczne). Wśród pozostałych metod wytwarzania można wymienić: Micromilling, μ EDM (Micro-Electrodischarge-Machining), LBM (Laser Beam Machining) oraz nie mające polskich odpowiedników techniki bondingu – fusion, anodic, flip – chip bonding, LIGA, Microcasting [2-3],[5].

Szczególne miejsce w technologiach MEMS zajmują metody litograficzne. Do najczęściej stosowanych metod litograficznych zaliczyć można litografię konwencjonalną, litografię wiązką elektronową i nanolitografię, litografię rentgenowską, jonolitografię i litografię miękką [2],[5-6].

Litografia konwencjonalna (rys. 2a), jest jedną z najczęściej wykorzystywanych metod do wytwarzania struktur, szczególnie w przemyśle elektronicznym (układy scalone). Zasadniczo proces składa się z 2 etapów: zaprojektowania i wykonania maski, na której znajduje się warstwa światłoczułej emulsji, a następnie użycia maski do wytworzenia kopii. Wzór projektowany jest z wykorzystaniem oprogramowania CAD, następnie jest wytrawiony w masce (metal, np. chrom), która zostaje nałożona na przezroczystą szklaną lub kwarcową płytkę.

Cały proces tworzenia mikrowytworu obejmuje kilka etapów litografii z wykorzystaniem różnych masek. Wiązka promieniowania UV przechodzi przez maskę, dalej przez ogniskującą soczewkę obrazującą maskę na fotoczułej warstwie polimeru (fotorezystu) umieszczonej zazwyczaj na krzemowej płytce. Tam gdzie docierają promienie UV warstwy materiału są usuwane odczynnikami chemicznymi w procesie trawienia (mokrego i suchego), tym samym uwidacznia się płytka krzemowa, na której odwzorowany zostaje nieznacznie pomniejszony wzór maski. Warstwa światłoczuła jest często używana jako maska tymczasowa przy trawieniu podstawowej warstwy, wówczas gdy wzorec może być przeniesiony na tą warstwę. Fotomaska może być używana również jako szablon dla materiału ze złożonym wzorem po procesie litografii. Podczas używania kilku wzorów fotomasek na różnych etapach litografii, maski muszą mieć jednolitą strukturę i muszą zostać dopasowane do siebie. Pierwszy przeniesiony wzorec na płytkę zawiera zwykle zestaw znaków wyrównujących, które posiadają funkcje decydujące o wysokiej precyzji wykonywanych operacji - wykorzystywane są jako punkty odniesienia przy pozycjonowaniu kolejnych wzorów. Każda nowopowstająca warstwa powinna mieć funkcję wyrównania w odniesieniu do reszty warstw np. *fotorezyst pozytywowo* – odwzorowanie identyczne maski, *fotorezyst negatywowo* – odwzorowanie odwrotne maski (negatyw wzoru z maski) [2].

Wyróżnia się również *litografię rentgenowską* (tzw. głęboka litografia), która ze względu na mniejszą długość fali promieniowania, charakteryzuje się większą w stosunku do litografii konwencjonalnej rozdzielczością ($\sim 0.5\mu\text{m}$) i możliwością wytwarzania elementów o wymiarach do 1mm.



Rys. 2. Schemat litografii konwencjonalnej (a), schemat dip pen nanolithography (b)
 Fig. 2. Scheme of conventional lithography (a), scheme of dip pen nanolithography (b)

W litografii wiązką elektronową – elektronolitografia EBL wykorzystuje się wiązkę elektronów. Przebieg procesu zbliżony jest do fotolitografii. Proces elektronolitografii nie wymaga wykorzystania maski, wiązka elektronów zostaje skierowana bezpośrednio na materiał obrabiany. W stosunku do tradycyjnej litografii, elektronolitografia umożliwia osiągnięcie dużej rozdzielczości wzorów (ok. 1nm). Za pomocą elektrolitografii można tworzyć maski do procesu fotolitografii. Energia wiązki elektronów wynosi ok. 20keV (10 ÷ 50keV). Wiązka może być sterowana polem magnetycznym (dokładność ok. 1nm) lub elektrycznym (sterowanie szybsze, ale mniej dokładne). Sam proces elektronolitografii umożliwia osiągnięcie dokładności ok. 5nm, jednak proces zalicza się do małowydajnych.

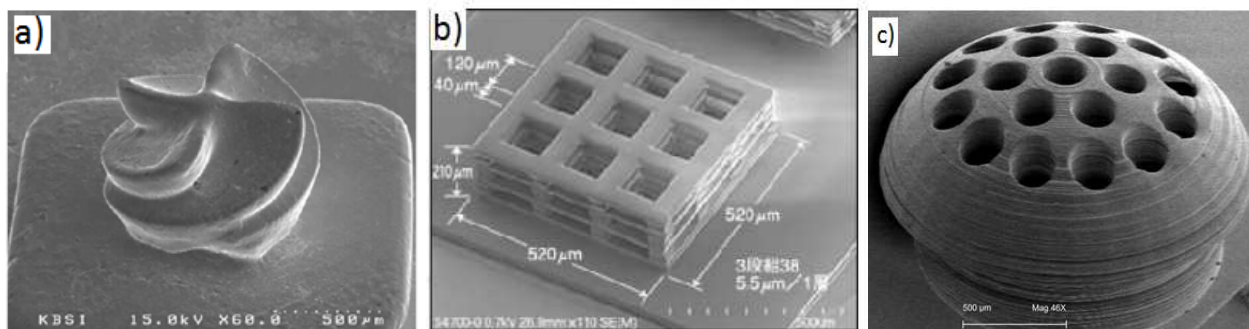
Nanolitografia to technika lokalnego utleniania elektrochemicznego materiału obrabianego za pomocą sondy mikroskopu AFM – ultra cienkiej warstwy tytanu na podłożu krzemowym. W procesie tym ostrze mikroskopu AFM pełni funkcję długopisu nanoszącego stałe lub płynne wzory na powierzchnię obiektów obrabianych. Jednym z rodzajów nanolitografii jest dip pen nanolithography (rys. 2 b).

W wytwarzaniu MEMS coraz większe znaczenie zyskują metody niekonwencjonalne, do których zaliczyć można m.in. mikroobróbkę elektroerozyjną - EDMM (drażnienie, wycinanie, frezowanie), mikroobróbkę elektrochemiczną – ECMM (drażnienie, wycinanie, frezowanie), ECMM strumieniowa (narzędziem jest strumień elektrolitu) oraz metody hybrydowe np.: obróbka elektrochemiczno–elektroerozyjna, ECMM wspomaganą laserowo, ECMM i EDMM wspomaganą ultradźwiękami oraz mikroobróbka laserowa [4],[8-11],[14].

5. TECHNOLOGIE WSPOMAGAJĄCE WYTWARZANIE MEMS

Do technologii wspomagających wytwarzanie MEMS zaliczyć można wszystkie procesy wytwarzania mikroelementów: elementy aktuatorów, mikronarzędzia do procesów mikroformowania (mikroodlewanie, mikroobróbka plastyczna itp.). Nazwano je technologiami wspomagającymi, ponieważ w stosunku do wyżej wymienionych posiadają nieco mniejszy zakres zastosowania w technologiach MEMS. Należą tutaj zarówno metody obróbki skrawaniem jak i metody erozyjne (niekonwencjonalne): drażnienie, wycinanie

i frezowanie elektroerozyjne, drażenie, wycinanie i frezowanie elektrochemiczne, metody strumieniowe (np. LBM), metody hybrydowe oraz metody przyrostowe. Metody te zostały opisane w dostępnej literaturze [6],[9-14] i dlatego w niniejszym artykule podane zostaną tylko przykłady elementów wykonanych tymi metodami: (rys. 3)



Rys. 3. Aplikacje technologii wspomagających: a) mikroodlewanie - koło zębate [17], b) struktura wykonana metodą stereolitografii [20], c) przedmiot wykonany frezowaniem [21]

Fig. 3. Application of supporting technologies: a) microcasting – tooth wheel [17], b) structure manufactured by stereolithography [20], c) part manufactured by milling [21] (c)

6. ZASTOSOWANIE MEMS

Obszar zastosowań układów MEMS jest bardzo duży. MEMS znajdują zastosowanie niemal wszędzie: w *technice i elektronice* (układy pomiaru ciśnienia i przyspieszenia, analizatory drgań i lepkości, podzespoły mikrofalowe, np. detektory, katody i rezonatory, mikroreaktory, chromatografy gazowe i cieczowe, żyroskopy, manipulatory komórkowe, drukarki, itd.), w *medycynie i farmacji* (stenty, protezy zmysłów, np. oka, sondy neurologiczne, czujniki biomedyczne, regeneratory nerwów, urządzenia do chirurgii nieinwazyjnej, kolonoskopy i endoskopy, mikrodializatory, narzędzia chirurgiczne, bioroboty, dozowniki płynów i leków, analizatory DNA, głównie różnych czynników chorobotwórczych (patogenów), do wykrywania komórek rakowych, *inteligentne* pigułki, dozowniki insuliny, wykrywanie w pocie człowieka obecności narkotyków, pomiar wilgotności w nosie i gardle pacjenta i przeznaskórnikowej utraty wody), *przemysł zbrojeniowy* (kontrola przepływu gazów w samolotach (odrzutowcach), namierzanie *nieprzyjaciela* i rozpoznawania *przyjaciela* – *FriendorFoe*, pomiary bezwładnościowe i nawigacja, budowa zapalników i bezpieczników, podsłuchy), oraz *przemysł telefonów komórkowych, sprzęt gospodarstwa domowego* (pralki, odkurzacze, zmywarki, odbiorniki radiowe i telewizyjne), *przemysł samochodowy* (czujniki przyspieszenia, poduszki powietrzne, GPS) i *przemysł lotniczy*. Wykorzystanie nowoczesnych technologii prowadzi do zwiększenia jakości eksploatacyjnej i rynkowej produktów. Układy MEMS wykorzystuje się również w nowoczesnych systemach do *wykrywania niesprawności i diagnostyki maszyn i urządzeń* [2-3],[5].

7. PODSUMOWANIE

Oczekuje się, że układy MEMS są niezawodne, a ich *praca jest długotrwała i stabilna*. Wytrzymałość mikrokonstrukcji krzemowych zwiększa się wraz z polepszeniem właściwości warstwy wierzchniej. Krzem jest idealnym materiałem do konstrukcji, posiada wysoką wytrzymałość i nie występuje w nim histereza mechaniczna. Jest lekki, ma doskonałe właściwości elementów wibracyjnych, a dodatkowo odznacza się powtarzalnością technologiczną parametrów mechanicznych i elektrycznych. Uzyskanie wielowarstwowości i przestrzenności krzemowych układów MEMS związane jest z głęboką mikroobróbką przestrzenną krzemu i mikromechanicznym łączeniem poszczególnych warstw materiałów. Rozwój układów MEMS to proces wieloetapowy, integrujący osiągnięcia nauki w wielu dziedzinach i wykorzystujący specjalne oprogramowanie typu *TCAD* (Technology CAD). Przyszłość MEMS uzależniona jest od przystosowania mikro i nanowytwarzania do warunków produkcji masowej. Działanie systemów MEMS wiąże się z niekonwencjonalnym wykorzystaniem praw fizyki, które w doskonały sposób zostają wkomponowane w działanie urządzeń MEMS [3],[5],[13].

LITERATURA

- [1] DZIUBAN J. A., 2004, *Technologia i zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych i krzemowo – szklanych w technice mikrosystemów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [2] JACKSON M. J. and al., 2006, *Microfabrication and Nanomanufacturing*, Taylor&Francis.
- [3] KREITH F, MAHAJAN R. i inni, 2006, *MEMS Applications*, Taylor&Francis.
- [4] NOWAKOWSKI A., KRZYWDA T., ZACHOROWSKI J., 2011, *Mikrowycinarka elektroerozyjna MW50*. *Mechanik*, 7, 570–577.
- [5] NADIM M., KIRT W., 2004, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, II wydanie, Artech Hause, Inc.
- [6] RUSZAJ A., 1999, *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*, Wydawnictwo IOS Kraków.
- [7] ZOSKI C. G., 2007, *Handbook of Electrochemistry, Print Book*.
- [8] KOZAK J., RAJURKAR K. P., RUSZAJ A., SŁAWIŃSKI R. J., 1998, *Wyglądanie powierzchni o złożonym kształcie przez obróbkę elektrochemiczną elektrodą sferyczną ze sterowaniem numerycznym (ECM-CNC)*, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 22, 53–74.
- [9] RUSZAJ A., SKOCZYPIEC S., LIPIEC P., 2006, *Rozwój technologii i obrabiarek do mikro-ECM*, *Inżynieria Maszyn*, 11/4, 66–73.
- [10] SKOCZYPIEC S., RUSZAJ A., GRABOWSKI M., 2010, *Elektrochemiczna intensyfikacja procesu mikroskrawania*, *Inżynieria Maszyn*, 15/3, 92–101.
- [11] RUSZAJ A., 2005, *Wybrane zagadnienia mikroobróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej*, *Inżynieria Maszyn*, 10/3, 129–137.
- [12] RUSZAJ A. SKOCZYPIEC S. CHUCHRO M., 2009, *Elektrochemiczne i elektrochemiczno-hybrydowe metody obróbki wykończeniowej powierzchni swobodnych*, *Inżynieria Maszyn*, 14/1, 41–49.
- [13] RUSZAJ A., GAWLIK J., SKOCZYPIEC S., 2009, *Stan badań i kierunki rozwoju wybranych niekonwencjonalnych procesów wytwarzania*, *Inżynieria Maszyn*, 14/1, 7–19.
- [14] SKOCZYPIEC S., KOZAK J., RUSZAJ A., 2009, *Wybrane problemy technologii elektrochemicznej i elektroerozyjnej mikro-narzędzi*, *Inżynieria Maszyn*, 14/1, 20–30.
- [15] SKOCZYPIEC S., RUSZAJ A., GRABOWSKI M., 2010, *Niekonwencjonalne metody wytwarzania mikro narzędzi*, *Mechanik*, 5–6, 436–442.
- [16] KOZAK J., 2006, *Technika mikrosystemów i wybrane metody*, *Świat Obrabiarek*, 1/4-5, 9–15.

- [17] SUNGIL CHUNG, YONGGWAN IM, JAEYOUNG CHOI, HAEDO JEONG, 2004, *Microreplication techniques using soft lithography*, *Microelektronik Engineering*, 75, 194–200.
- [18] KOCK M., KLAMMROTH V., CAGON L., Fritz – Haber – Institut der Max – Planck – Gesellschaft, Germany.
- [19] www.elektronikab2b.pl.
- [20] www.y-micro.com.
- [21] www.jauvtismp.com.

MATERIALS AND PROCESSES FOR MANUFACTURING OF THE MEMS COMPONENTS

The paper presents the outline of problems connected with MEMS manufacturing, especially data related to materials and technologies applied in practice. Area of MEMS is interested very wide. MEMS have been applied almost in each branch of our life. Process of MEMS design is interdisciplinary and needs a sophisticated applications. The main material in MEMS manufacturing is silicon (Si). Nowadays over 200 special technologies are applied in MEMS manufacturing; many of other is in the stage of laboratory investigations. They are presented in this paper.