

# Tendencje rozwojowe mikrotechnologii wytwarzania.

Niekonwencjonalne metody mikro obróbki

Adam Ruszaj<sup>12</sup>    **Sebastian Skoczypiec<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

<sup>2</sup>Politechnika Krakowska

Wirtotechnologia 2009

- 1 Wprowadzenie
- 2 Zastosowanie lasera w mikrobróbce
- 3 Charakterystyka obróbki elektroerozyjnej
- 4 Charakterystyka mikroobróbki elektrochemicznej (ECMM)
- 5 Wnioski

# 1 Wprowadzenie

## 2 Zastosowanie lasera w mikroobróbce

## 3 Charakterystyka obróbki elektroerozyjnej

## 4 Charakterystyka mikroobróbki elektrochemicznej (ECMM)

## 5 Wnioski

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski

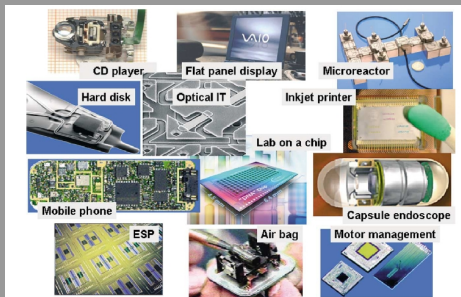


Fig. 1. Microtechnology—a multi-billion dollar market with products for our daily life. (Sources: Bosch, Ehrlfeld, Given Imaging, Hewlett-Packard, IBM, Infineon, Philips, Siemens, Sony, Texas Instruments).

Wytwarzanie elementów mikromechanizmów, prototypowych, elementów dla Mikro-Elektro-Mechanicznych Systemów (MEMS), oprzyrządowania i narzędzi do mikro-skrawania, mikro-odlewania i mikro-obróbki plastycznej to bardzo dynamicznie rozwijający się obszar w ubytkowych i przyrostowych metodach wytwarzania.

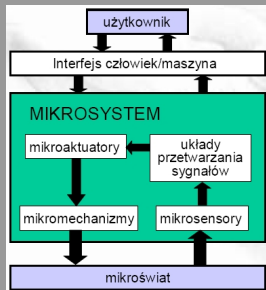


## Termin

***MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems*** zintegrowane obiekty elektroniczno-elektryczno-mechaniczne przetwarzające wielkości mechaniczne, termiczne, chemiczne na sygnały elektryczne i odwrotnie. Gabaryty MEMS zwykle są od kilku mikrometrów do kilku milimetrów.

## Termin

***MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems*** zespół małych, inteligentnych przyrządów, który potrafi nie tylko "myśleć", ale także "wyczuwać", "działać i komunikować się. Może nawet wiedzieć gdzie jest i co się naokoło jego dzieje.



Układ MEMS składa się z:

- mikrosensorów,
- mikroaktuatorów,
- mikroprocesorów.

Mikrosystem przetwarza  
informację i materię.

- **mała inercja** (poruszają i zatrzymują się szybciej, więc idealnie nadają się do precyzyjnego ruchu i szybkiej akcji);
- **mała masa** (mniejsze zniekształcenia cieplne, mniejsze wibracje)
- **małe rozmiary** (są szczególnie dobrze dopasowane do zastosowań biologicznych i kosmicznych);
- mniejsze rozmiary umożliwiają upakowanie większej liczby komponentów funkcjonalnych w jednym urządzeniu;
- **mniejsze zapotrzebowanie na materiały** oznacza niskie koszty produkcji i transportu.

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

Wprowadzenie

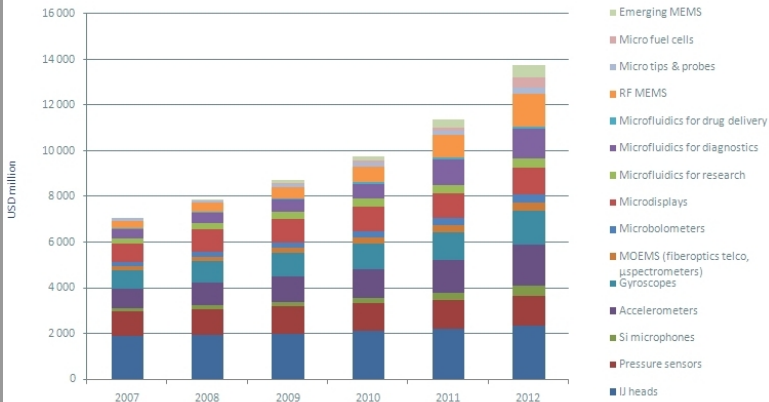
LBM

EDMM

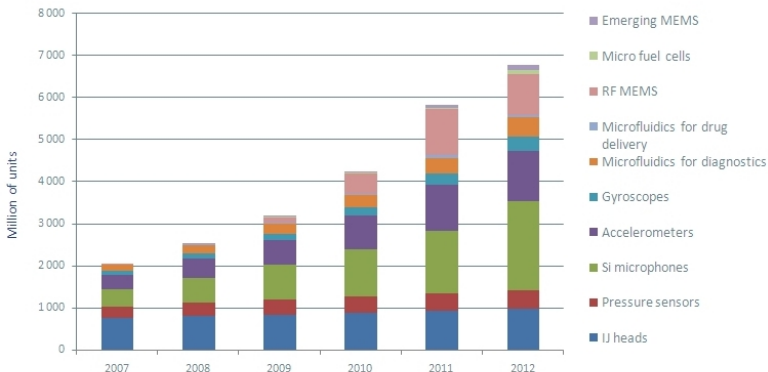
ECMM

Wnioski

## MEMS market forecast 2007 - 2012 in value (USD million)



### MEMS market forecast 2007 - 2012 in volume (million of units)



- Czujniki inercyjne:
  - żyroskopy (detekcja dachowania, nawigacja)
  - akcelerometry (poduszki gazowe, ESP)
  - czujniki szybkości
- Czujniki ciśnienia
  - ciśnienie powietrza w kolektorze dolotowym
  - hamulce, wtrysk paliwa
  - czujniki
- Czujniki media + waga
  - waga pasażera
  - sterowanie klimatyzacją
  - jakość oleju

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszał,  
Sebastian  
Skoczypiec

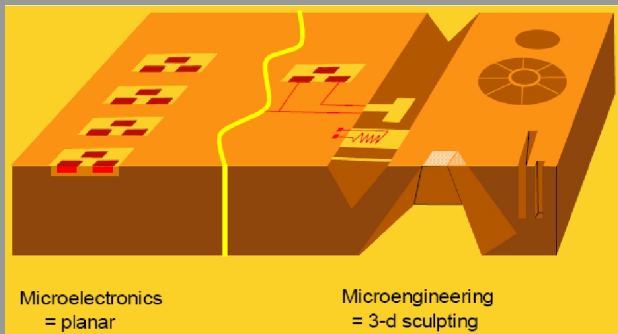
Wprowadzenie

LBM

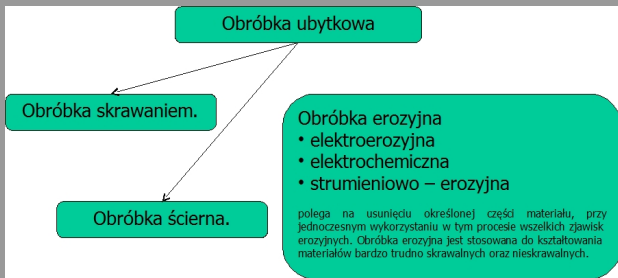
EDMM

ECMM

Wnioski



Schemat przedstawiający różnicę pomiędzy strukturą układów Mikro-Elektronicznych i Mikro-Elektro-Mechanicznych.





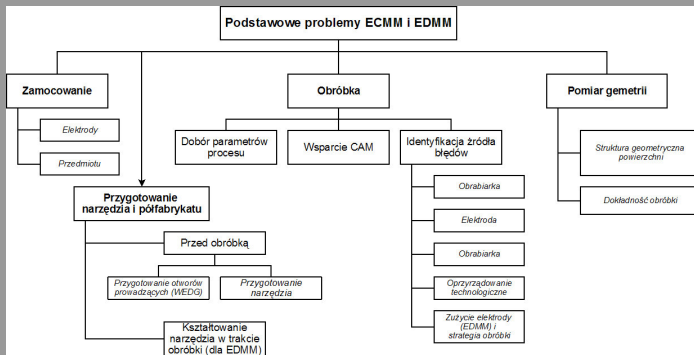
### Produkcja seryjna:

- mikroformowanie,
- mikrododlewanie,
- mikroskrawanie,
- mikroobróbka laserowa.

Wytwarzanie prototypów, krótkie serie, oprzyrządowanie technologiczne, narzędzia:

- mikroskrawanie,
- metody niekonwencjonalne:
  - **mikroobróbka elektroerozyjna,**
  - **mikroobróbka elektrochemiczna,**
  - **mikroobróbka laserowa,**
  - mikróbróbka ultradźwiękowa
- metody przyrostowe.

- Kształtowane powierzchnie mikro-narzędzi są najczęściej powierzchniami krzywoliniowymi wewnętrznymi lub zewnętrznymi.
- Metody niekonwencjonalne: wysoka efektywność techniczno - ekonomiczna przy wytwarzaniu struktur mikrogeometrycznych w elementach maszyn, MEMS, oprzyrządowania i narzędzi oraz na etapie projektowania i testowania nowych mikrosystemów (MEMS) (wykonawstwo prototypów przy możliwie małych nakładach finansowych).



- 1 Wprowadzenie
- 2 Zastosowanie lasera w mikrobróbce**
- 3 Charakterystyka obróbki elektroerozyjnej
- 4 Charakterystyka mikroobróbki elektrochemicznej (ECMM)
- 5 Wnioski

- Lasery femtosekundowe są laserami wysyłającymi impulsy światła spójnego trwające kilka-kilkadziesiąt femtosekund.
- Dzięki temu że energia emitowanego promieniowania skupiona jest w ultrakrótkim impulsie, nawet przy niewielkiej mocy średniej można osiągnąć bardzo dużą moc chwilową.

## Metody ubytkowe:

- ablacja,
- trawienie intensyfikowane laserem,

## Metody przyrostowe

- selektywne spiekanie laserowe
- stereolitografia (*two photon polimerisation*),

# Zjawiska fizyczne w ubytkowej mikroobróbce laserowej

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski

## Termin

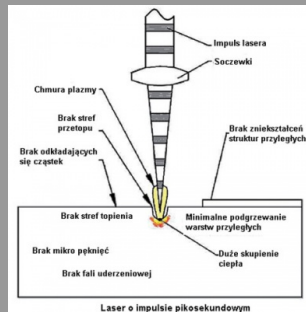
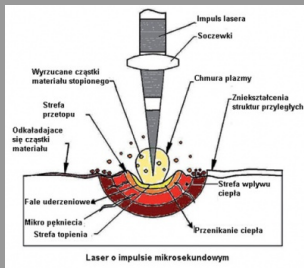
***Ablacja laserowa*** - proces odparowywania (usuwania) materiału z powierzchni ciała stałego do stanu gazowego lub plazmy z pominięciem stanu ciekłego.

## Termin

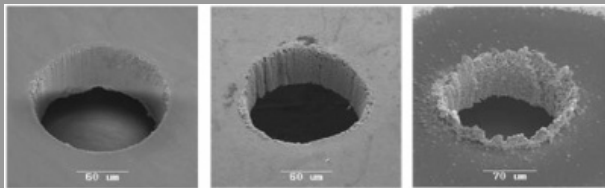
***Trawienie laserowe*** Usuwanie materiału w wyniku trawienia, które jest aktywowane promieniowaniem laserowym.



- Do wywołania ablacji laserowej stosuje się najczęściej lasery krótko impulsowe (femto, piko i (rzadziej) nanosekundowe),
- Czas trwania impulsu jest dużo krótszy niż czas pochłaniania energii przez obrabiany materiał.
- Nie występuje konwekcja cieplna w materiale ani strefa zniszczenia termicznego materiału.
- Dzięki użyciu małej długości fal i krótkotrwałych impulsów, koncentracja i absorpcja energii jest tak wysoka że poddaje się jej praktycznie każdy materiał, wliczając w to wszystkie metale, polimery, materiały ceramiczne, szkło, a nawet diament.



Mechanizm ablacji laserowej dla laserów o impulsie  
(odpowiednio od lewej) mikro- i pikosekundowym



Rezultaty obróbki laserem (odpowiednio od lewej):  
pikosekundowym, nanosekundowym i mikrosekundowym.

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

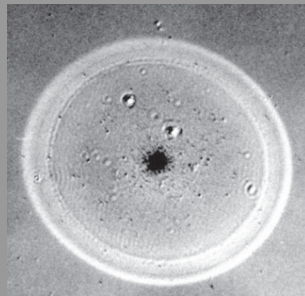
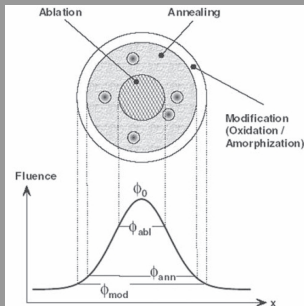
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Przemiany w materiale zachodzące w wyniku oddziaływania pojedynczego impulsu femtosekundowego na krzem ( $800\text{ nm}$ ,  $130\text{ fs}$ ,  $1.5\text{ J/cm}^2$ ). Średnica zewn. pierścienia:  $45\text{ }\mu\text{m}$ .

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

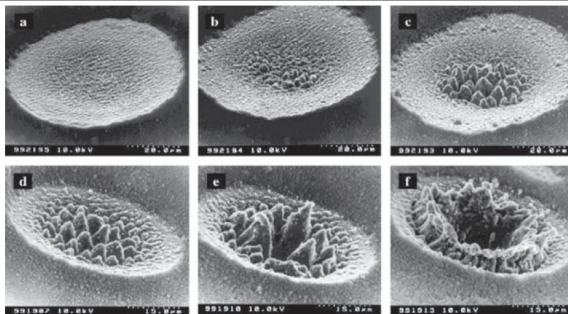
Wprowadzenie

LBM

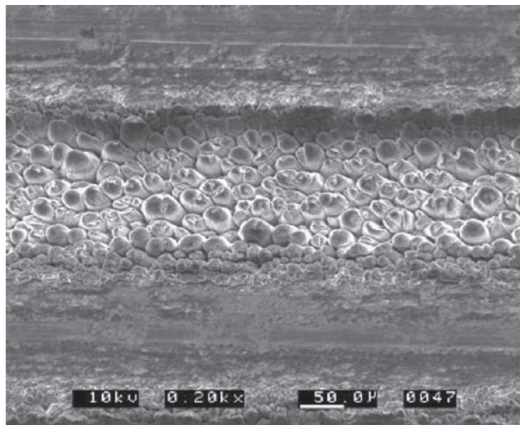
EDMM

ECMM

Wnioski



**Fig. 7.15** SEM micrographs of ablation damage in silicon generated with Ti:sapphire laser pulses in air: (a)  $1.0 \text{ J/cm}^2$ , (b)  $1.3 \text{ J/cm}^2$ , (c)  $1.8 \text{ J/cm}^2$  (wavelength =  $780 \text{ nm}$ , pulse length =  $100 \text{ fs}$ , number of pulses =  $100$ ); (d)  $2.0 \text{ J/cm}^2$ , (e)  $2.8 \text{ J/cm}^2$ , (f)  $4.1 \text{ J/cm}^2$  (wavelength =  $800 \text{ nm}$ , pulse length =  $130 \text{ fs}$ , number of pulses =  $100$ ). (Reprinted from Bonse et al. 2002. With permission. Copyright Springer.)



**Fig. 7.16** SEM micrograph of a groove machined in aluminum using 20 scans of femtosecond Ti:sapphire laser (scan speed = 2 mm/s, pulse duration = 120 fs, energy density = 9 J/cm<sup>2</sup>). (Reprinted from Harzic et al. 2005. With permission. Copyright Springer.)

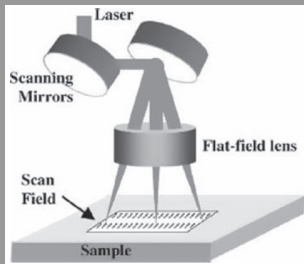
- Rodzaje trawienia laserowego:
  - suche ( $Cl_2$ ,  $Br_2$ )
  - mokre ( $HCl$ ,  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ ,  $NaCl$ , and  $K_2SO_4$ )
- Trawienie jest aktywowane przez absorpcję promieniowania laserowego przez materiał w wyniku jego kontaktu z aktywatorem (odczynnikiem), lub odwrotnie.
- Promieniowanie laserowe wpływa na przebieg reakcji (wzbudzenie molekuł materiału/aktywatora)

- Zastosowanie trawienia zależy od szeregu parametrów takich jak: czas ekspozycji, moc lasera, warunków ogniskowania, długości fali promieniowania, orientacji kryształów trawionego materiału itp.
- Mikroobróbka trawieniem intensyfikowanym laserowo jest obecnie dynamicznie rozwijana i może być zastosowana do wykonywania mikro - elementów z metali, izolatorów i półprzewodników.

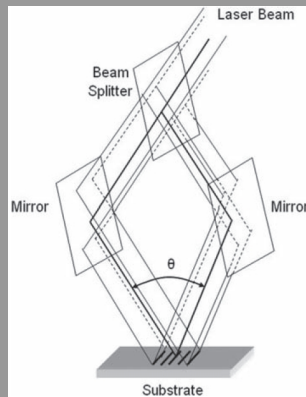


## Sposoby usuwania materiału w mikroobróbce laserowej:

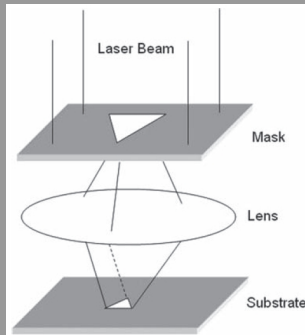
- oddziaływanie bezpośrednie (*direct writing*)
- zastosowanie maski (*mask projection*)
- interferencja.



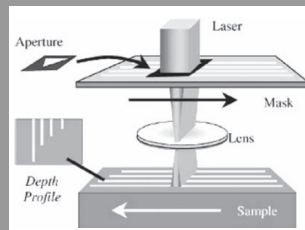
Bezpośrednie oddziaływanie  
lasera



Wykorzystanie zjawiska  
interferencji



Schematic of mask projection technique



Schematic of synchronized overlay scanning

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszaj,  
Sebastian  
Skoczypiec

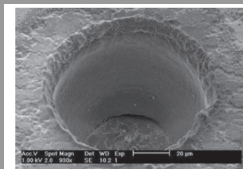
Wprowadzenie

LBM

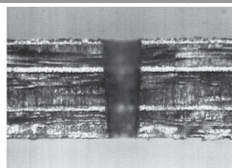
EDMM

ECMM

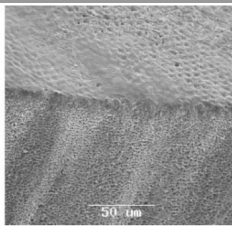
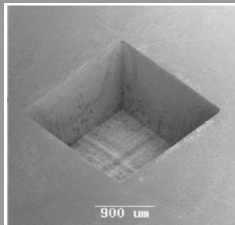
Wnioski



**75 µm Blind Via**  
Cu (18 µm) / Epoxy (60 µm) / Cu (18 µm)



**100 µm Through Via**  
Glass-fiber-reinforced multilayer



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszaj,  
Sebastian  
Skoczypiec

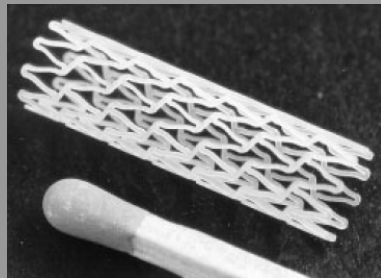
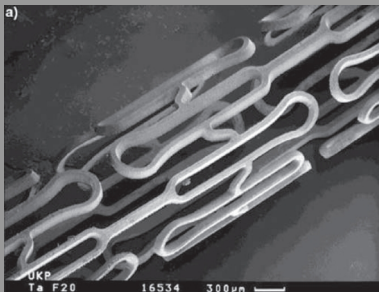
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

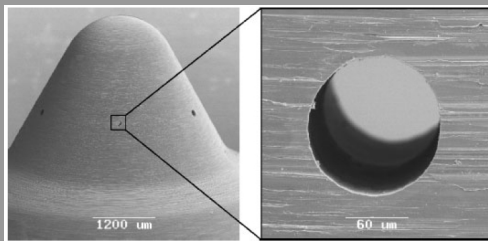
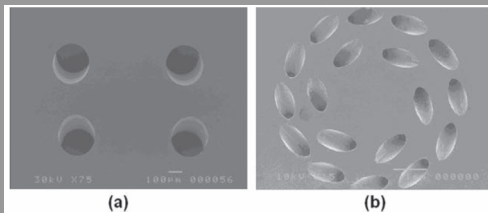
Wprowadzenie

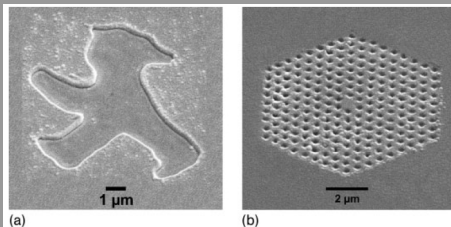
LBM

EDMM

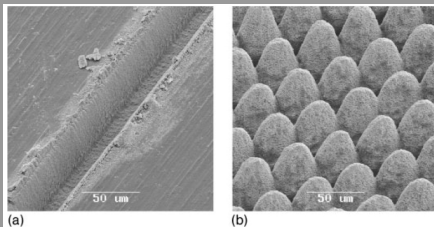
ECMM

Wnioski





**Fig. 12.17** Sub-micron structures from static exposure. (a) Mask exposure of chromium to 150 fs laser pulses. (b) Holes in sapphire from single focused 30 fs pulses.



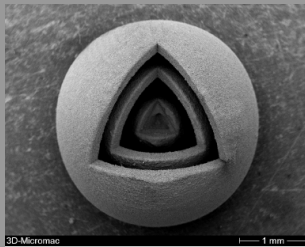
**Fig. 12.18** Microstructures from direct fs laser writing. (a) Groove in steel produced with 150 fs pulses of 100 μJ. (b) Fused silica, structured using 120 fs pulses of 70 μJ.

- grubość warstw:  $1 - 5 \mu m$ ,
- moc lasera do  $20 W$ , średnica plamki:  $20 \mu m$ ,
- rozmiary przestrzeni roboczej  $< 50 mm$ ,
- minimalna grubość ścianek:  $30 \mu m$  (zależy od materiału)
- stosowane materiały: molibden, wolfram, srebrno, stal nierdzewna, ceramika ( $Al_2O_3 - SiO_2$ )

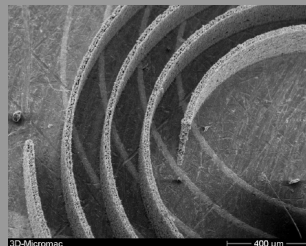




Części ceramiczne spiekane z warst o grubości  $2.5 \mu\text{m}$ .



Materiał: stal nierdzewna, grubość ścianek:  $110 \mu\text{m}$ , średnica:  $3 \text{ mm}$



Grubość ścianek spirali:  $30 \mu\text{m}$

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

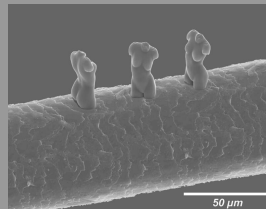
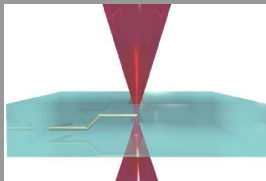
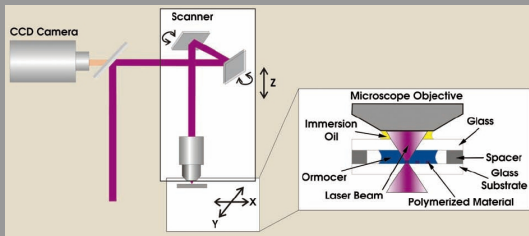
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

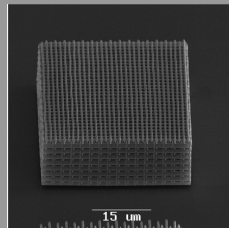
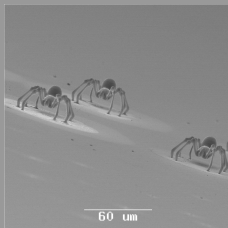
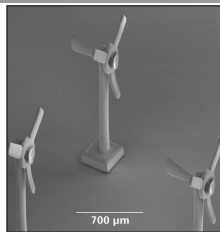
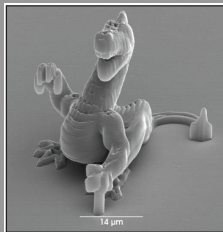
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



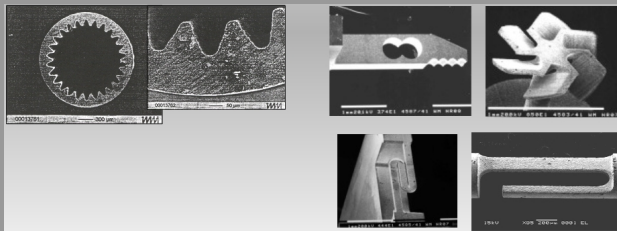
- 1 Wprowadzenie
- 2 Zastosowanie lasera w mikroobróbce
- 3 Charakterystyka obróbki elektroerozyjnej**
- 4 Charakterystyka mikroobróbki elektrochemicznej (ECMM)
- 5 Wnioski

- W obróbce elektroerozyjnej naddatek jest usuwany z przedmiotu obrabianego w wyniku zjawisk towarzyszącym wyładowaniom elektrycznym (parowanie, topienie i rozrywanie materiału) w obszarze pomiędzy przedmiotem obrabianym a elektrodą roboczą.
- W mikro-obróbce elektroerozyjnej (EDMM) jednym z kluczowych zagadnień jest ograniczenie energii pojedynczego wyładowania, co pozwala na wykonywanie mikro-elementów z wysoką dokładnością i dobrą jakością powierzchni. Aby uzyskiwać oczekiwane rezultaty energia pojedynczego wyładowania powinna być rzędu  $10^{-6} - 10^{-7} J$ .

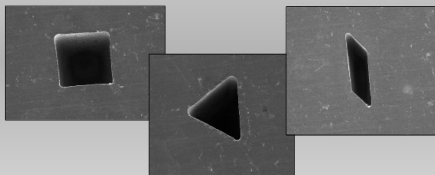
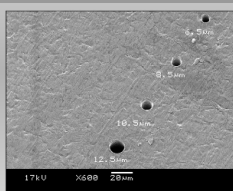
	EDM	EDMM
<b>Oprządkowanie i media</b>		
Generator prądowy	tranzystorowy	RC
Dielektryk	dielektryki na bazie nafty, woda dejonizowana	dielektryki na bazie nafty
Przepłukiwanie szczeliny	wewnętrzne, zewnętrzne	brak
Materiał elektrody	miedź, grafit	wolfram, węgiel wolframu
<b>Parametry procesu</b>		
Amplituda natężenia prądu	0.5 – 400 A	0.1 – 10 mA
Napięcie	40 – 400 V	60 – 120 V
Czas impulsu	$10^{-6} - 10^{-3}$ s	$10^{-9} - 10^{-6}$ s
Zużycie elektrody	< 5%	nawet do 100%

Obecnie w zależności od rodzaju stosowanego narzędzia i kinematyki obróbki, można wyróżnić cztery kierunki rozwoju mikroobróbki elektroerozyjnej:

- **mikrowycinane elektroerozyjne (WEDM)** – odmiana obróbki elektroerozyjnej, w której elektrodą jest cienki drut (nawet do  $20\mu m$ ). Przedmiot obrabiany mocowany jest na stole roboczym, który najczęściej przemieszczany jest w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Ze względu na zużycie elektroerozyjne drut jest przewijany ze szpuli na szpulę z prędkościami  $0.5 \sim 20 \text{ m/min}$ .

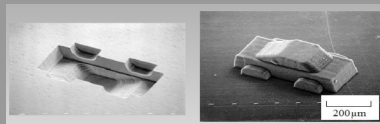
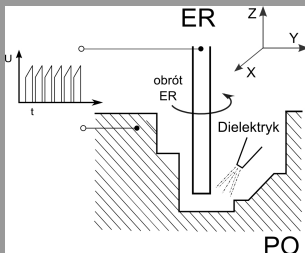


- **mikrodrążenie elektroerozyjne** – w kształtowanie odbywa się analogicznie do drążenia elektrochemicznego - w wyniku odwzorowania kształtu elektrody w przedmiocie obrabianym,
- **mikrowiercenie elektroerozyjne** – zastosowanie EDM do wytwarzania otworów o średnicach nawet do  $5\mu m$ ,





- **obróbka elektroerozyjna elektrodą uniwersalną (3D-EDMM)** - podobnie jak w 3D-EDMM, kształt powierzchni obrabianej jest odwzorowaniem trajektorii elektrody w przestrzeni 3D.



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszaj,  
Sebastian  
Skoczypiec

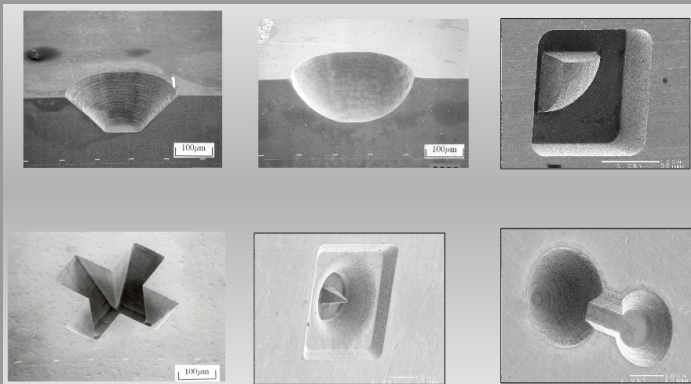
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



- W 3D-EDMM narzędzie charakteryzuje się prostym kształtem – najczęściej jest to pręt/drut o średnicy  $< 0.5mm$ .
- Ze względu na niewielką sztywność elektrody, stosuje się wykonywanie elektrod bezpośrednio na obrabiarce, która wyposażona jest w przystawkę do kształtowania elektrod. Umożliwia to obróbkę elektrodami o średnicach  $< 50\mu m$ , co byłoby niemożliwe w przypadku zastosowania narzędzia o takiej średnicy na całej długości.

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

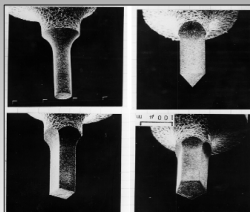
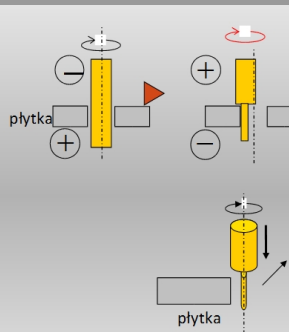
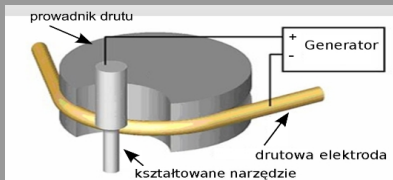
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

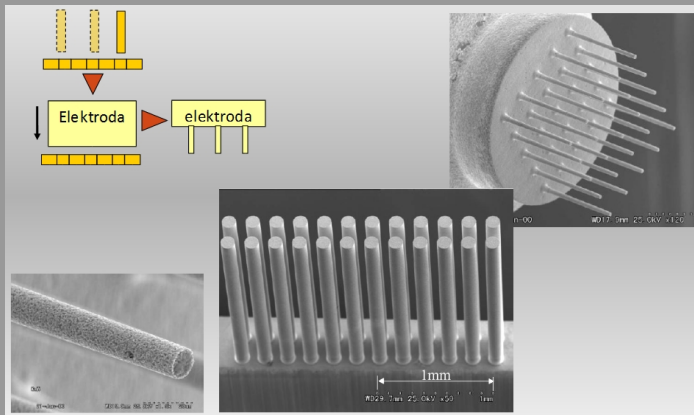
Wprowadzenie

LBM

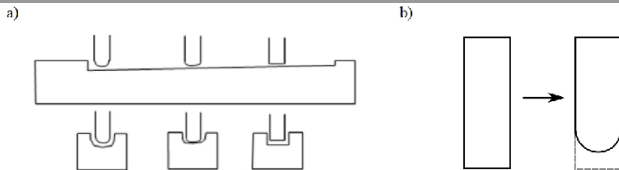
EDMM

ECMM

Wnioski



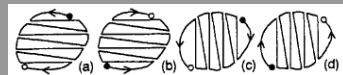
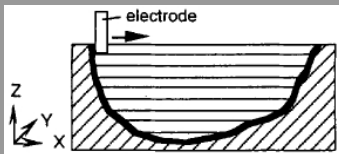
- Istotnym problemem w EDM jest zużycie elektrody, które znacznie wpływa na dokładność obróbki. Zużycie elektrody zależy od wielu czynników związanych z procesem np. napięcia, amplitudą natężenia prądu, materiału elektrody, polaryzacji itp.



Typowe zużycie elektrody w 3D-EDMM: a) wpływ zużycia elektrody na dokładność obróbki – pojedyncze przejście; b) kształt czola elektrody po obróbce.

W 3D-EDMM prosty kształt narzędzia umożliwia stosunkowo prostą kompensację zużycia narzędzia. W większości metod kompensacji stosowane jest:

- usuwanie naddatku warstwami,
- prowadzenie obróbki w taki sposób, aby następowało zużycie jedynie czoła elektrody, co jest związane z odpowiednim doбором grubości usuwanej warstwy, wprowadzenie ruchu względnego elektrody i przedmiotu obrabianego kompensującego skracanie się elektrody.



- ① Wprowadzenie
- ② Zastosowanie lasera w mikroobróbce
- ③ Charakterystyka obróbki elektroerozyjnej
- ④ Charakterystyka mikroobróbki elektrochemicznej (ECMM)
- ⑤ Wnioski



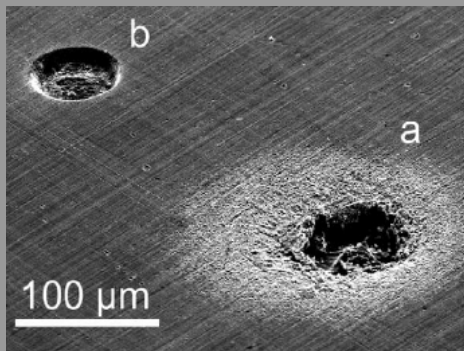
- Materiał jest usuwany w procesie roztwarzania anodowego impulsami prądowymi.
- Materiał usuwany jest bardzo małymi porcjami (atom po atomie), bez mechanicznego oddziaływania na obrabiany materiał, co pozwala na wykonywanie miniaturowych elementów z materiałów przewodzących prąd elektryczny (np. stale, stopy metali nieżelaznych).

## Zalety :

- brak zużycia narzędzia (elektrody roboczej),
- brak oddziaływań mechanicznych i termicznych w strefie obróbki (obróbka nie wprowadza istotnych zmian w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego),
- wysoka wydajność obróbki, która nie zależy od mechanicznych właściwości materiału obrabianego.

## Wady:

- niski stopień lokalizacji procesu (niska dokładność)
- nierównomierność roztwarzania faz strukturalnych materiału , co prowadzi do błędów kształtu.



a -  $t_i = 5 \mu s$ ; b -  $t_i = 10 ns$ .

- zastosowanie bardzo krótkich czasów impulsu ( $t_i < 100 ns$ ):  
wyraźna poprawa lokalizacji procesu roztwarzania.

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

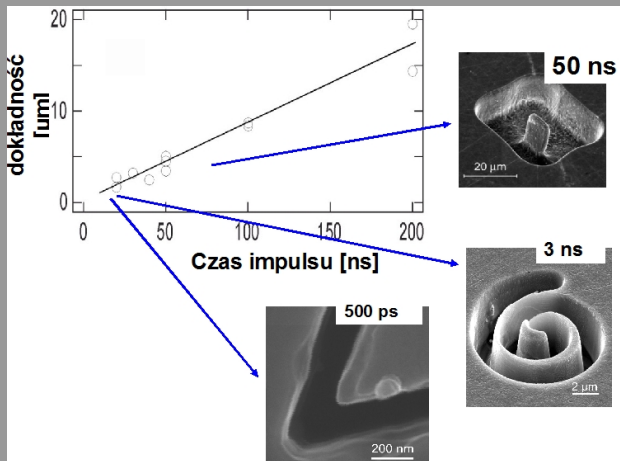
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

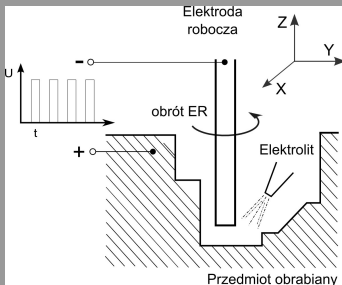
Wprowadzenie

LBM

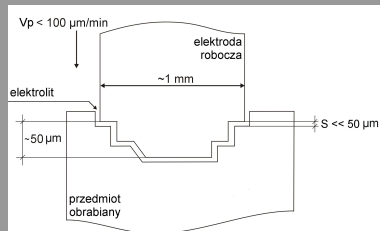
EDMM

ECMM

Wnioski



**Obróbka uniwersalną elektrodą:**  
kształt powierzchni obrabianej jest  
odzworowaniem trajektorii elektrody  
walcowej w przestrzeni 3D (analogicznie  
jak w 3-osiowym frezowaniu).



**Drążenie:** elektroda robocza przesuwają się w kierunku przedmiotu obrabianego, a jego kształt jest wynikiem odzworowania kształtu elektrody w materiale obrabianym.

# Przykłady zastosowań

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

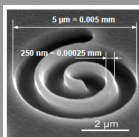
Wprowadzenie

LBM

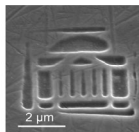
EDMM

ECMM

Wnioski



$\mu$ -PECM: wysoka precyzja  
wykonywania mikrostruktur  
*FHI-Berlin*



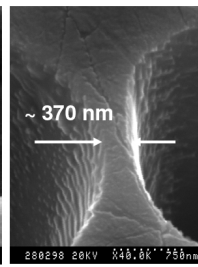
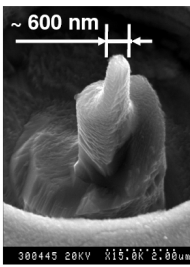
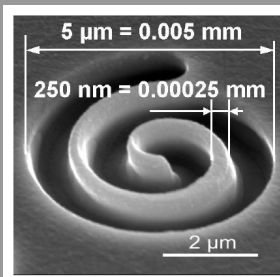
Matryca wykonana  
elektrochemicznie ( $\mu$ -PECM)  
*FHI-Berlin*



Wkładka mikromatrycy (PECM)



Przykład zastosowania PECM w  
produkcji masowej (głowica golarki)  
(Phillips)



Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszaj,  
Sebastian  
Skoczypiec

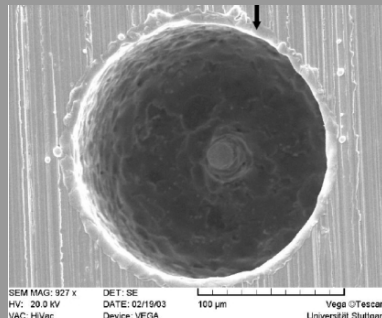
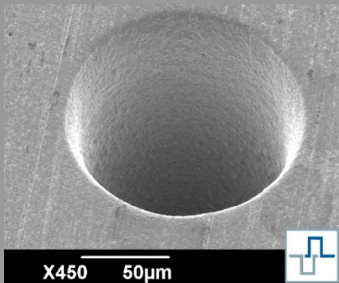
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Porównanie powierzchni otworu wykonanego elektrochemicznie (fot. lewa) i elektroerozyjnie (proces termiczny, fot. prawa).

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczy piec

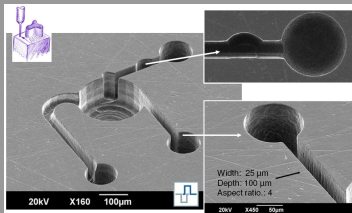
Wprowadzenie

LBM

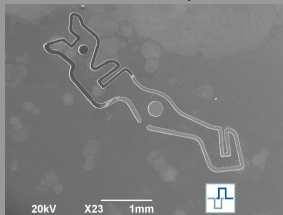
EDMM

ECMM

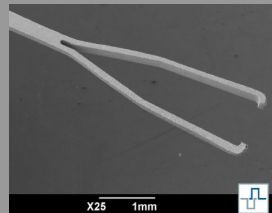
Wnioski



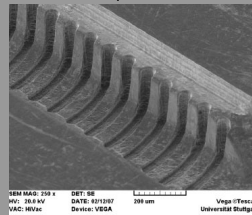
Element mikromechanizmu (fot. ECMTEC)



Prototyp precyzyjnego mechanizmu (fot. ECMTEC)



Mikro – narzędzie stosowane w medycynie (fot. ECMTEC)



Wkładka matrycy (fot. ECMTEC)



# Badania procesu obróbki elektrochemicznej mikroelementów ( $\mu$ - ECM)

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Projekt w ramach 6-go programu ramowego

**Program MNT-Era Net**



Zakres projektu obejmuje:

- wyjaśnienie mechanizmu usuwania materiału dla ECMM,
- modelowaniem matematyczne i symulacje komputerową procesu ECMM,
- budowę prototypu obrabiarki do mikroobróbki elektrochemicznej,
- badania doświadczalne ECMM,
- opracowanie systemu sterowania oraz monitorowania procesu kształtowania elektrochemicznego mikroelementów.

## Jednostki Polskie:



Politechnika Krakowska



IZTW Kraków (koordynacja)



Politechnika  
Warszawska



Marcosta, Tarnów



Polspecial Kraków

## Partnerzy niemieccy:



Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg



ECMTEC GmbH



Zimmer+Kreim GmbH

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

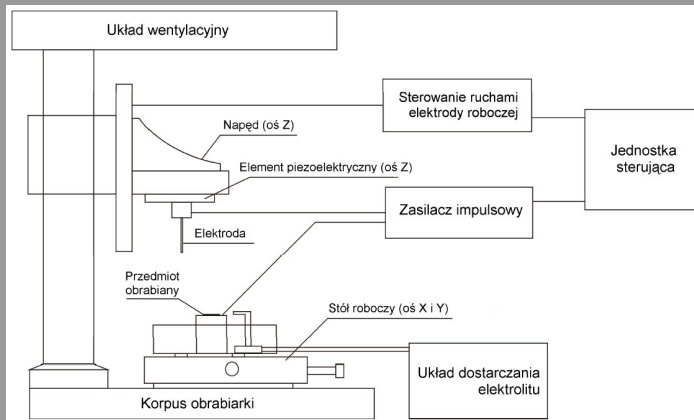
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



# Projekt i prototyp obrabiarki

## Część mechaniczna

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

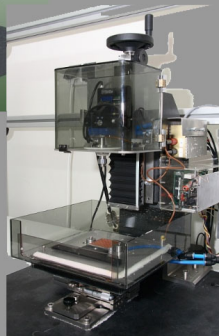
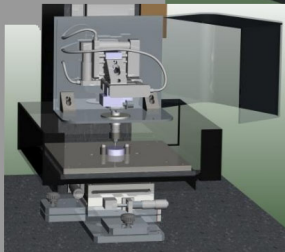
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



# Projekt i prototyp obrabiarki

## Mocowanie próbki i narzędzia

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

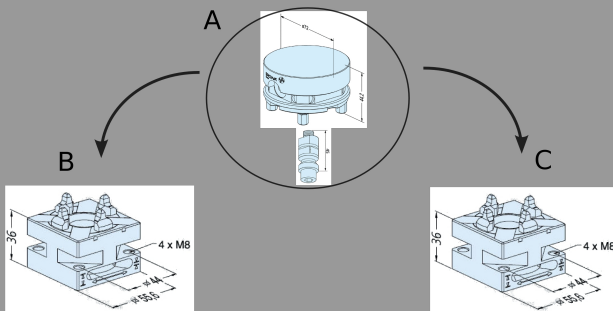
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



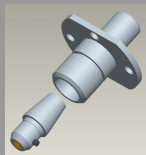
Rozwiązanie systemu mocowania przedmiotu obrabianego: A -  
uchwyt próbki, B - obrabiarka, C - system obserwacyjny

# Projekt i prototyp obrabiarki

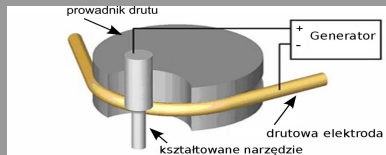
## Mocowanie próbki i narzędzia

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

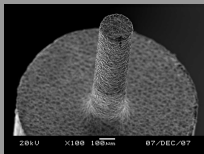
Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec



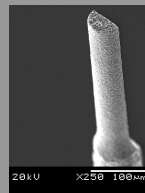
Uchwyt elektrody (system SARIX).



Schemat elektroerozyjnego kształtowania elektrod.



Elektroda walcowa,  $d = 0.2 \text{ mm}$ .



Elektroda walcowa z flanką,  $d = 0.05 \text{ mm}$ .

# Projekt i prototyp obrabiarki

## System obserwacyjny

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

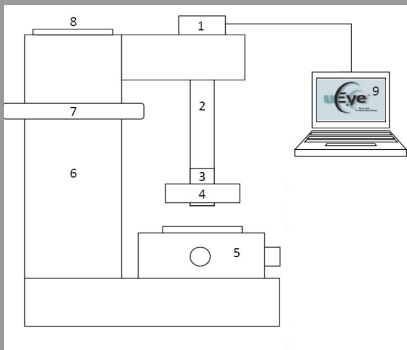
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



- 1 kamera CCD,
- 2 zestaw pierścieni mocujących,
- 3 obiektyw 75mm,
- 4 oświetlenie,
- 5 stół krzyżowy,
- 6 korpus,
- 7 nakrętka kontruująca,
- 8 przesuw w osi Z,
- 9 oprogramowanie,

Schemat systemu obserwacyjnego opartego na kamerze CCD o wysokiej rozdzielczości

# Projekt i prototyp obrabiarki

## Zasilacz impulsowy

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski

- napięcie międzyelektrodowe  $U$ : 6 – 50 V,
- czas impulsu  $t_{on}$ : 0.5 – 10  $\mu s$ ,
- czas przerwy  $t_{off}$ : 3 – 60  $\mu s$ ,
- współczynnik wypełnienia ( $t_{on}/t_{off}$ ): 1/6,
- natężenie prądu: do 3 A.



Zasilacz skonstruowany w IGET, Magdeburg.



- Określenie warunków fizycznych, a w szczególności pola temperatury oraz ciśnienia elektrolitu (niezbędne przy doborze parametrów obróbki).
- Opracowano modele opisujące proces roztwarzania elektrochemicznego (zarówno dla czasów impulsu rzędu mikro i nano sekund).

# Oprogramowanie wspomagające projektowanie obróbki

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszaj,  
Sebastian  
Skoczypiec

Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski

Opracowano pakiet oprogramowania komputerowego umożliwiającego:

- określenie ograniczeń związanych z doбором czasu trwania impulsu napięciowego,
- predykcję kształtu przedmiotu po obróbce dla frezowania elektrochemicznego (pozwala to na dobór/korekcję trajektorii narzędzia)

Oprogramowanie może być wykorzystane na etapie projektowania procesu technologicznego obróbki.

# Oprogramowanie wspomagające projektowanie obróbki

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczywiec

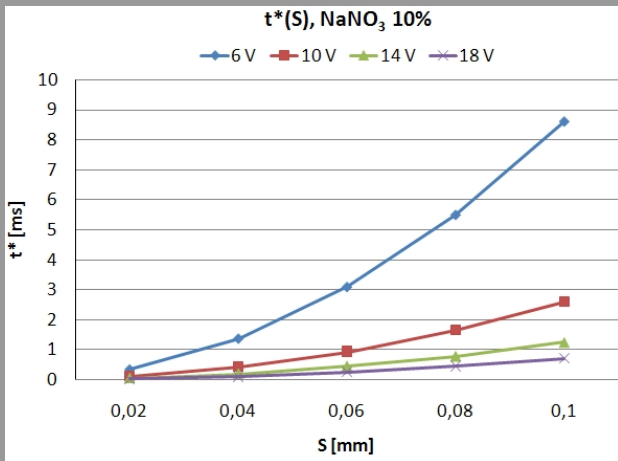
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

Wnioski



Przykładowa zależność czasu krytycznego  $t^*$  od szczeliny międzyelektrodowej.

# Oprogramowanie wspomagające projektowanie obróbki

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszej,  
Sebastian  
Skoczypiec

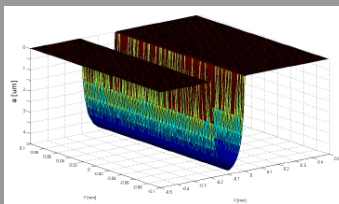
Wprowadzenie

LBM

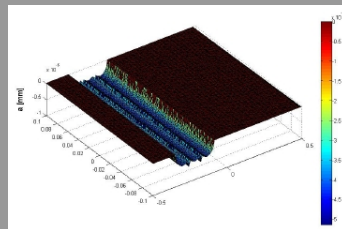
EDMM

ECMM

Wnioski



$U = 5 \text{ V}$ , elektrolit:  $10\% \text{ NaNO}_3$ ,  
 $v_f = 3.2 \text{ mm/min}$ , średnica elektrody:  
0.2 mm.



$U = 5 \text{ V}$ , elektrolit:  $10\% \text{ NaNO}_3$ ,  
 $v_f = 1.2 \text{ mm/min}$ , średnica elektrody:  
0.1 mm.

Tendencje  
rozwojowe  
mikrotech-  
nologii  
wytwarzania.

Adam  
Ruszaj,  
Sebastian  
Skoczypiec

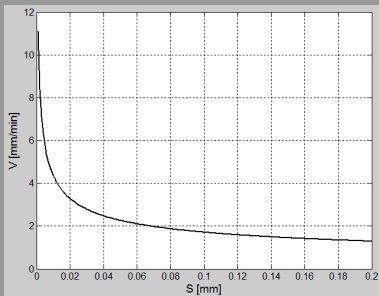
Wprowadzenie

LBM

EDMM

ECMM

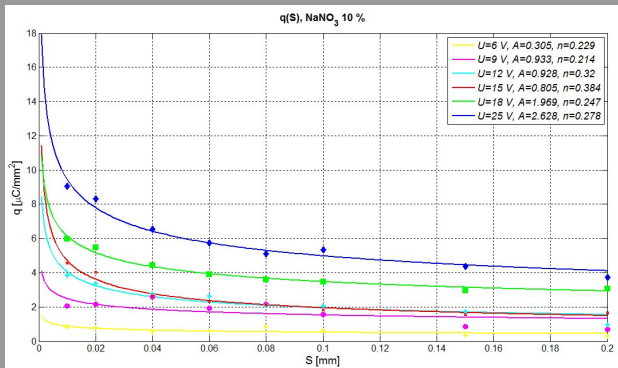
Wnioski



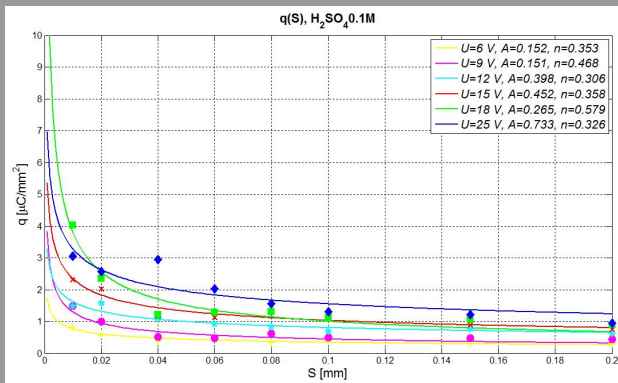
Przykładowa zależność prędkości  
roztwarzania od grubości szczeliny  
międzyelektrodowej.

$$V(S) = \frac{A}{S^n} \implies q(S) = \frac{A}{S^n}$$

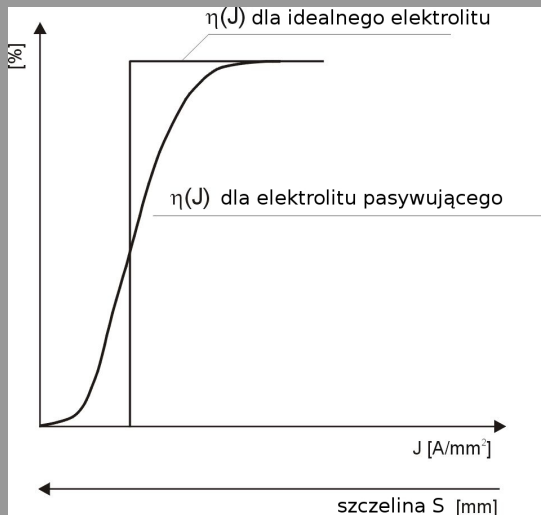
- Dla oceny stopnia lokalizacji roztwarzania elektrochemicznego (od którego zależy dokładność oraz kształt elektrody roboczej) niezbędne jest wyznaczenie zależności średniej prędkości roztwarzania  $V$  od grubości szczeliny międzyelektrodowej.
- Ubytki materiału (masowe, objętościowe) są wprost proporcjonalne do ładunku elektrycznego  
( $dV_{imp} = k_V \cdot q_{imp}$ )



Zestaw charakterystyk  $q(S)$  dla elektrolitu  $10\% \text{NaNO}_3$ ,  
 $t_i = 1 \mu\text{s}$



Zestaw charakterystyk  $q(S)$  dla elektrolitu  $0.1M H_2SO_4$ ,  
 $t_i = 1 \mu s$





- 1 Wprowadzenie
- 2 Zastosowanie lasera w mikroobróbce
- 3 Charakterystyka obróbki elektroerozyjnej
- 4 Charakterystyka mikroobróbki elektrochemicznej (ECMM)
- 5 Wnioski

## Rezultaty projektu:

- Podstawy teoretyczne mikrokształtowania elektrochemicznego.
- Oprogramowanie do symulacji procesu mikrokształtowania elektrochemicznego.
- Prototyp obrabiarki do mikrokształtowania elektrochemicznego.
- Metodyka badań nad lokalizacją roztwarzania elektrochemicznego.
- Wyniki badań doświadczalnych dla wybranych elektrolitów.

## Jednostki Polskie:



Politechnika Krakowska



IZTW Kraków (koordynacja)



Politechnika  
Warszawska



Marcosta, Tarnów



Polspecial Kraków

## Partnerzy niemieccy:



Otto-von-Guericke-Universität  
Magdeburg



ECMTEC GmbH



Zimmer+Kreim GmbH

- Dynamicznie rozwijane
- Zastosowanie w produkcji seryjnej (LBM) i jednostkowej (LBM, EDMM, ECMM)
- Badania nad niekonwencjonalnymi metodami wytwarzania mikroelementów prowadzone są w ośrodkach krajowych (IZTW, PK, PW)

Dziękuję za uwagę i ...  
zapraszam do współpracy.