

Adam RUSZAJ¹
Sebastian SKOCZYPIEC¹
Dominik WYSZYŃSKI¹
Piotr LIPIEC¹

WYBRANE ASPEKTY ZASTOSOWANIA MIKRO I NANOTECHNOLOGII W PROCESACH WYTWARZANIA

Przedstawione zostały wybrane zagadnienia z zakresu mikro i nanotechnologii, które zdaniem autorów są związane z obecnymi lub przyszłymi technikami wytwarzania. Zaprezentowano możliwości integracji nauk technicznych, biologicznych i informatycznych przy udziale najnowszych osiągnięć inżynierii materiałowej. W wyniku tej integracji rysuje się możliwość zbudowania systemów wytwarzania działających na bazie kodów podobnych do kodu genetycznego organizmów żywych. Przedstawione zostały przykłady ważnych, zdaniem autorów, dla rozwoju i integracji, odkryć i rozwiązań technologicznych zmierzających do zmiany dotychczasowej strategii budowania systemów i ich elementów od „top down” do „bottom up”. Z artykułu wynika konieczność tworzenia interdyscyplinarnych zespołów badawczych w celu optymalnego wykorzystania i rozwoju technologii będących rezultatem dotychczasowych badań.

1. WSTĘP

Od wielu lat wciąż uczestniczymy w kolejnych rewolucjach gospodarczych. Pierwsza Rewolucja Przemysłowa, Rewolucja Naukowo - Techniczna, Rewolucja Informacyjna, a w połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku rozpoczęła się trwająca po dziś dzień Rewolucja Informatyczna, która przekształca się w Rewolucję Nanotechnologiczną. W wyniku Rewolucji Informatycznej dysponujemy teraz m.in.: komputerami osobistymi, telefonami komórkowymi, pocztą elektroniczną, Internetem i bezprzewodowymi modemami. Równolegle z Rewolucją Informatyczną rozpoczęła się Rewolucja Biotechnologiczna. Biotechnologia to szereg metod służących modyfikacji roślin i zwierząt w celu „poprawy” produkowanych przez organizmy żywe substancji. Te rewolucyjne wydarzenia mogły zaistnieć dzięki znaczącemu postępowi w naukach fizycznych w ciągu ostatnich 60 lat.

Nanotechnologia to umiejętność tworzenia w przestrzeni 3D struktur (obiektów) z pojedynczych atomów lub cząsteczek w celu wytwarzania nanomateriałów lub nanoobjektów, które mogą znaleźć zastosowanie w makroświecie. Obejmuje ona

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

wytwarzanie fizycznych, chemicznych i biologicznych obiektów o wymiarach od 0,1 do około 100nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) i integracji tych obiektów w mikro i makroobiekty. Powyższe zagadnienia stały się priorytetowym wyzwaniem dla interdyscyplinarnych zespołów naukowców i inżynierów w XXI wieku.

Z kolei inżynierowie z wielu dziedzin od wielu lat dążą do miniaturyzacji wyrobów. Przykładem mogą tu być Mikro Elektro Mechaniczne Systemy (MEMS-y) lub Nano Elektro Mechaniczne Systemy (NEMS-y, które znajdują już zastosowanie we wszystkich gałęziach przemysłu od zbrojeniowego i lotniczego przez medycynę do sprzętu gospodarstwa domowego.

Jak już wspomniano rozwiązywanie problemów w obszarach mikro i nanotechnologii wymaga podejścia interdyscyplinarnego. Dlatego trudno jest jednoznacznie i uniwersalnie zdefiniować pojęcie mikro i nanotechnologii. Są one nieco inaczej postrzegane przez fizyków, chemików, lekarzy, specjalistów od inżynierii materiałowej, inżynierów elektroników czy inżynierów mechaników.

W niniejszym artykule podjęto próbę scharakteryzowania wybranych zagadnień mikro i nanotechnologii z punktu widzenia inżynierii mechanicznej, a w szczególności technologii wytwarzania elementów maszyn czy urządzeń. Może niektóre sformułowania będą nieprecyzyjne dla fizyków, chemików czy informatyków zajmujących się nanotechnologiami molekularnymi. Ale to dobrze, bo to pomoże stworzyć płaszczyznę porozumienia i zrozumienia interdyscyplinarnego w tym najważniejszym obszarze badawczym XXI wieku.

2. CHARAKTERYSTYKA MIKRO- I NANOTECHNOLOGII

Naukowcem, który pierwszy, już w roku 1959, zwrócił uwagę na zagadnienia mikro i nanoskali był amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla profesor Richard Feynman.

W dniu 29 grudnia 1959 w Kalifornijskim Instytucie Technologicznym wygłosił on znany i powszechnie cytowany wykład pod tytułem " There is a plenty room at the bottom - Tam na dole jest dużo miejsca" [1].

W wykładzie tym Feynman przedstawił problem miniaturyzacji obiektów wraz z opisem sposobu ich tworzenia "atom po atomie lub cząsteczka po cząsteczce". Metoda taka zastała nazwana „bottom up”. Feynman zdefiniował również różnicę pomiędzy mikrotechnologią (miniaturyzacją) a nanotechnologią. Zgodnie z jego punktem widzenia o nanotechnologii można mówić wtedy, gdy do opisu zachowania powstałego obiektu konieczne jest omówienie efektów kwantowych. Jest to logiczna i elegancka fizyczna definicja, która wprowadza granicę pomiędzy mikro i nanoświatem.

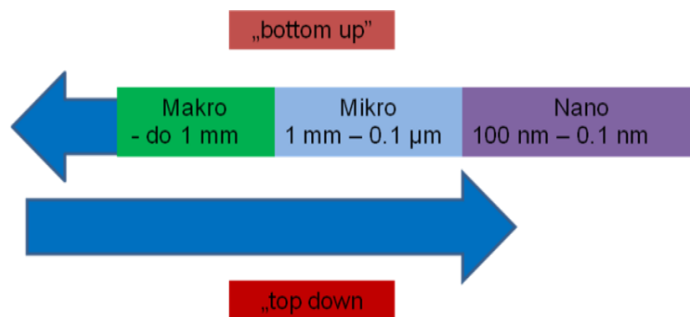
W praktyce przemysłowej technologii wytwarzania zwykle mówi się przede wszystkim o wymiarach obiektów: makroobiekty - o wymiarach powyżej 1mm, mikroobiekty o wymiarach poniżej 1 mm (przynajmniej jeden wymiar) czy nanoobiekty – o wymiarach poniżej 100nm. Jeżeli w wyniku jakiegoś procesu technologicznego wytwarzany jest mikro lub nanoelement, to proces ten uważany jest domyślnie za mikro lub nanotechnologię, niezależnie od tego czy występują tutaj czy też nie efekty (zjawiska)

kwantowe. Ponadto, w praktyce przemysłowej często nazywa się nanotechnologiami procesy wytwarzania precyzyjnego, w wyniku których:

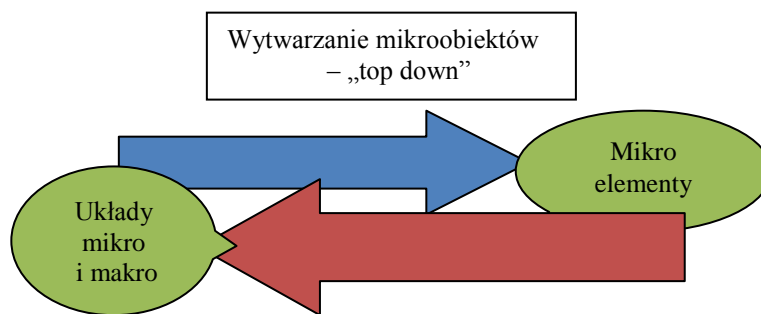
- wytwarzane są elementy z tolerancją wymiarową mniejszą niż 100nm,
- kształtowane są powierzchnie, dla których parametry chropowatości są mniejsze niż 100nm.

W inżynierii mechanicznej miniaturyzacja wiąże się z mikrotechnologiami wytwarzania „top down” - czyli produkcją coraz to mniejszych elementów (obiektów) przy użyciu odpowiednio zmodyfikowanych systemów produkcyjnych stosowanych do wytwarzania makroelementów (rys. 1, 2). Następnie z mikroelementów montowane są większe układy.

Natura wytwarza obiekty stosując podejście „bottom up”; zaczynając od tworzenia nanoobjektów, aby następnie w procesach samoorganizacji i samoreplikacji budować mikro i makrosystemy (rys. 1).



Rys. 1. Granice wymiarowe nano, mikro i makroobjektów w aspekcie strategii wytwarzania „bottom up” i „top down”
Fig. 1. Limits of nano, micro and macroobjects in manufacturing according “bottom up” and “tom down” strategy

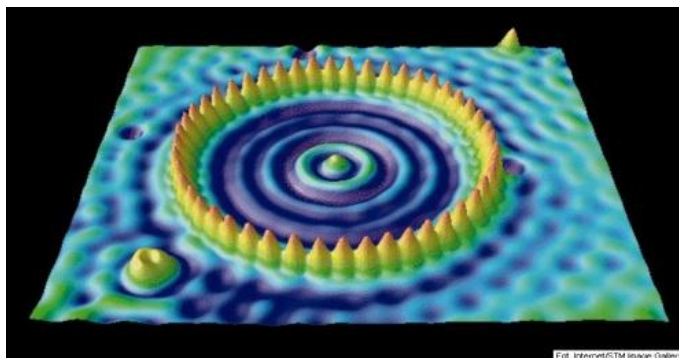


Rys. 2. Schemat budowy obiektów (np. MEMS) w inżynierii produkcji
Fig. 2. Scheme of objects creation (MEMS) in production engineering

Kamieniami milowymi w rozwoju mikro i nanotechnologii były między innymi [22], [8],[9]:

- odkrycie struktury cząsteczkowej DNA (Francis H.C. Crick, James D. Watson i Maurice Wilkins; 1953 r. nagroda Nobla: 1962),
- wynalezienie i zbudowanie (1981) skaningowego mikroskopu tunelowego, dzięki któremu możliwe jest budowanie nanoobjektów przez przemieszczanie

- pojedynczych atomów czy cząsteczek oraz badanie nanostruktur materiałów przewodzących prąd elektryczny (metali). Nagroda Nobla 1986r. (rys. 3),
- wynalezienie i zbudowanie (1985) mikroskopu sił atomowych dzięki któremu możliwe jest badanie nanostruktur materiałów nie przewodzących prądu elektrycznego.



Rys. 3. Przykład zastosowania skaningowego mikroskopu tunelowego do „ułożenia” 48 atomów Fe na kryształ Cu [9]
Fig. 3. Example of STM microscope application for „putting” 48 Fe atoms on Cu crystal [9]

3. MIKRO I NANO TECHNOLOGIE W RÓŻNYCH DZIEDZINACH NAUKI I TECHNIKI

3.1. NANOINFORMATYKA

Jednym z zadań nauk informatycznych jest badanie praw transformacji informacji na granicy pomiędzy materią ożywioną a nieożywioną, czyli np. w kodzie genetycznym DNA. Są to molekularne układy informatyczne w organizmach żywych, będące rozległym polem do badań eksperymentalnych nad prawami rządzącymi kodem genetycznym i transformacją informacji [22],[8],[20]. Nauki informatyczne wprowadzają do świata nauki znacznie bardziej wartościowe zagadnienia niż same komputery i informatyczne metody komputerowe (CAI). Wyjaśnienie różnic pomiędzy informatyką techniczną a biologiczną jest jednym z głównych zadań obecnej cywilizacji. Jednym ze znaczących zagadnień nanoinformatyki jest badanie języków biologicznych struktur białkowych zapisanych w DNA (kwas dezoksyrybonukleinowy).

Wyrazami tych języków są pewne molekuly, które występują w systemach informatycznych organizmów żywych: w przypadku DNA: A(adenina), G (guanina), C (cytozyna) i T (tymina), a w przypadku RNA (kwas rybonukleinowy): U (uracyl) zamiast T (tyminy).

Naukowcy zaczęli tworzyć techniczne systemy informatyczne ponad 60 lat temu, co w konsekwencji doprowadziło do ich znaczącego rozwoju. Biologiczne systemy informatyczne są bezustannie rozwijane przez naturę od miliardów lat (ok. 5 miliardów). Dzięki tym systemom możliwy był rozwój organizmów żywych.

Naśladowanie natury w budowaniu obiektów technicznych jest bardzo istotnym kierunkiem badań. Dzięki temu naukowcy próbują zastąpić technologię „top down” technologią „bottom up”, poprzez tworzenie „układów” z odpowiednich konfiguracji atomów, jednakże realizacja samoreplikacji programów i obiektów analogicznie jak w biologicznym modelu informatycznym jest wciąż nieosiągalna.

Jak już wspomniano największym osiągnięciem wpływającym na rozwój współczesnej informatyki było odkrycie struktury cząsteczkowej DNA. Od tego czasu jednym z podstawowych celów badań współczesnej informatyki jest wyjaśnienie różnic i podobieństw pomiędzy technicznymi i biologicznymi systemami informatycznymi i biologicznymi językami zapisu białek w strukturze DNA [4].

Podstawowymi różnicami pomiędzy wspomnianymi powyżej systemami są:

a) różne jednostki informacji:

- w technologicznych systemach informatycznych jednostką informacji jest bit z dwoma stanami logicznymi (0,1), a jego reprezentacją rzeczywistą jest dwustanowy system elektroniczny,
- w biologicznych systemach informatycznych podstawową jednostką informacji jest nanobit, który nie jest reprezentowany przez stan układu lecz poprzez występowanie w określonym położeniu jednej z czterech molekuł A, G, C, T w przypadku DNA, lub A, G, C, U w przypadku RNA,

b) różne są języki i sposoby programowania:

- w systemach technicznych program jest sekwencją symboli, które definiują stan urządzeń elektronicznych,
- w systemach biologicznych program jest specyficzną konfiguracją (łańcuchem, nitką) molekuł. Wyrazami tego programu są A, G, C, T dla DNA lub A, G, C, U dla RNA,

c) różne są cele zapisu programu:

- w systemach technicznych programy pisane są w celu rozwiązywania zadań matematycznych,
- w systemach biologicznych natura pisze programy w celu zbudowania obiektów biologicznych,

d) różne są sposoby budowania:

- w systemach technicznych budowanie obiektu to składanie wcześniej wytworzonych elementów lub podzespołów,
- w systemach biologicznych natura tworzy swoje obiekty przy użyciu technologii nanomolekularnych zgodnie z zasadą „bottom up”.

Informatyka biologiczna i techniczna są w pewnych obszarach bardzo do siebie zbliżone, jednakże ta pierwsza wciąż reprezentuje nieosiągalny dla drugiej poziom zaawansowania. Bardzo ważnymi problemami informatyki technicznej są programowanie, samoorganizacja i samo powielanie obiektów.

Naukowcy i inżynierowie stawiają sobie pytanie: „Czy kiedykolwiek w przyszłości będzie możliwe przy użyciu komputera osobistego stworzenie jakichkolwiek obiektów we własnym pokoju? Według prof. Stefana Węgrzyna z Instytutu Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN odpowiedź jest następująca [22]: „Będzie to możliwe dzięki dalszemu rozwojowi Nanotechnologii. Informatyka to nie tylko komputery i procedury obliczeniowe,

ale także procesy, które występują w organizmach żywych, dzięki którym organizmy te żyją, rozwijają się i rozmnażają. Najprostszym sposobem rozwiązania wspomnianych powyżej problemów jest stworzenie programów składających się z cząsteczek chemicznych. Następnie komputerowy system operacyjny zamiast przetwarzać abstrakcyjne symbole będzie konwertował molekuly a rezultatem jego pracy nie będą obliczenia lecz użyteczny produkt stworzony w sposób identyczny jak żywy organizm. Tego typu komputery działają obecnie w każdej z komórek naszych organizmów a podstawą ich programów i systemów operacyjnych jest DNA. Jeśli bylibyśmy w stanie zbudować sztuczny system działający według podobnych zasad i bylibyśmy w stanie zaprogramować go tak, aby wytwarzał zamiast białek cząsteczki polimerów i układał te cząsteczki w gotowe wyroby rozwijające się ze sztucznej cytoplazmy.”[5].

Być może, w procesach tych będzie można zastosować w przyszłości także „nanoroboty montażowe” (assemblery), które zgodnie z wizjami futurologów, będą w stanie wyprodukować wszystko co jest potrzebne istotom ludzkim.

Jak już wspomniano powyżej istotnym kierunkiem badań w nanotechnologii jest naśladowanie rozwiązań, występujących w układach biologicznych stworzonych przez naturę. To ona buduje nanoobiekty zdolne do samopowielania. Z tego powodu każda informacja w kodzie DNA zapisana jest dwukrotnie. Dzięki temu rozwiązaniu, z jednego łańcucha tworzone są dwa następne, a tym samym dochodzi do powielenia zapisu informacji.

Jednym z najbardziej wyrafinowanych procesów zachodzących w naturze jest fotosynteza, która gromadzi energię niezbędną do życia na Ziemi. Ten komu uda się skopiować ten proces, rozwiąże problemy energetyczne naszej planety.

3.2. INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

Pole zainteresowań nauki o materiałach jest bardzo rozległe, a nauka o nanomateriałach przeżywa prawdziwy rozkwit. Nanomateriały to wszystkie materiały, których rozmiar struktury wewnętrznej (np. rozmiar ziaren krystalicznych) nie przekracza 100nm. Inżynieria materiałowa tworzy nowe materiały o wspaniałych właściwościach, które jednak można wykorzystać w praktyce dopiero wtedy, gdy inżynieria produkcji opracuje metody ich kształtowania.

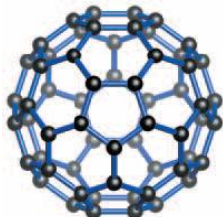
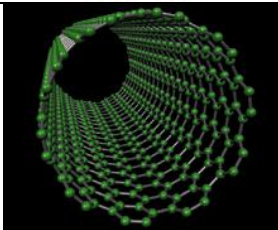
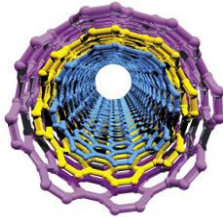
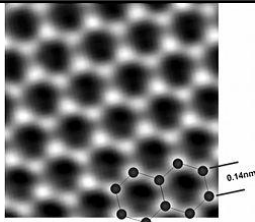
Wielu badaczy definiuje nanotechnologię jako naukę, której głównym obszarem zainteresowania jest tworzenie i wdrażanie (we wszystkich aspektach życia istot ludzkich) nanomateriałów, co stymuluje rozwój takich dziedzin jak: nanoelektronika, nanotechnologia molekularna, nanoinformatyka i nanometrologia (AFM, STM, MFM). Dlaczego osiągnięcia na gruncie nanomateriałów są tak bardzo istotne i obiecujące? Otóż tego typu materiały zazwyczaj mają odmienne właściwości w porównaniu ze zwykłymi materiałami, co daje nowe możliwości ich zastosowania w niemalże każdej z dziedzin inżynierii. Warto podkreślić, że inżynierowie zajmujący się nanomateriałami, mogą w pewnym sensie, podążać tropem natury, która w sposób mistrzowski wykorzystuje technologię bottom up. W ten sposób wykorzystano w praktyce: tzw. „efekt lotosu” - do produkcji łatwo zmywalnej ceramiki sanitarnej, „kleje wytwarzane przez małże” do produkcji specjalnych klejów

stosowanych w przemyśle, a gąbka gębinowa „Koszycek Kwiatowy Wenus” – jest badana jako model idealnego biologicznego światłowodu.

Podstawowymi wadami klasycznych materiałów wykorzystywanych w elektronice jest ich duża masa oraz słabe właściwości mechaniczne. Z tego powodu niezbędna jest ostrożność w posługiwaniu się sprzętem elektronicznym ponieważ bardzo łatwo go uszkodzić. Problem ten może zostać rozwiązany dzięki zastosowaniu wielocząsteczkowych przewodników, półprzewodników polimerowych, które przewodzą prąd elektryczny. Zespół który odkrył te materiały został nagrodzony nagrodą Nobla w roku 2000 [14].

Z punktu widzenia inżynierii mechanicznej, specjalną uwagę przykładą się do wykorzystania osiągnięć inżynierii materiałowej w zakresie wytwarzania specjalnych struktur węglowych. Niektóre z nich opisane zostały w Tabeli I. Mają one specjalne właściwości mechaniczne i elektryczne, które są i będą powodem coraz większego zakresu ich zastosowania. Dla przykładu nanorurki węglowe charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością (znacznie większą niż stal), rozciągliwością, przewodnością cieplną (dwa razy większą niż diament) i zaskakująco dobrymi właściwościami elektrycznymi; szczególnie z punktu widzenia zastosowań w elektronice (podzespoły tranzystorów) – Tabela 2.

Tabela 1. Przykłady struktur węglowych [8],[12],[20-21]
Table 1. Examples of carbon structures [8],[12],[20-21]

<p>Fulereny - struktura przestrzenna w kształcie piłki futbolowej zbudowana z atomów węgla.</p>	
<p>Nanorurka węglowa z pojedynczą ścianką - SWNT; struktura przestrzenna w kształcie pojedynczej zwiniętej siatki, w której węzłach znajdują się atomy węgla.</p>	
<p>Wielościenna nanorurka węglowa – MWNT; struktura przestrzenna w kształcie wielowarstwowej zwiniętej siatki, w której węzłach znajdują się atomy węgla.</p>	
<p>Grafen - płaska struktura węglowa odkryta w roku 2004</p>	

Powyższe struktury węglowe znalazły różnorodne zastosowania np. w produkcji specjalistycznego sprzętu sportowego, polimerowych komórek fotowoltaicznych oraz w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Fulereny być może zostaną wykorzystane na nanokapsułki będące nośnikami leków do chorych komórek organizmu ludzkiego oraz do opracowania leku przeciw AIDS.

Tabela 2. Wybrane właściwości struktur węglowych [8],[12],[20-21]
Table 2. Some properties of carbon structures [8],[12],[20-21]

Właściwości elektryczne	
Konduktancja kwantyzacji	12.9 (kW)^{-1}
Oporność właściwa	$10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$
Maksymalna gęstość prądu	1013 A/m^2
Maksymalna objętościowa gęstość prądu	1 GA/cm^3 (druć miedziany ~ 1000 mniej)
Właściwości cieplne	
Przewodność cieplna	2000 W/(m/K)
Właściwości mechaniczne	
Moduł Younga (SWNT- nanorurki jednościenne),	$\sim 1 \text{ TPa}$
Moduł Younga nanorurki (MWNT- nanorurki wielościenne)	1.28 TPa (70 GPa dla aluminium i 700 GPa dla włókien C),
Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie	$\sim 100 \text{ GPa}$ (stałe wysoko wytrzymałe $\sim 2 \text{ GPa}$)

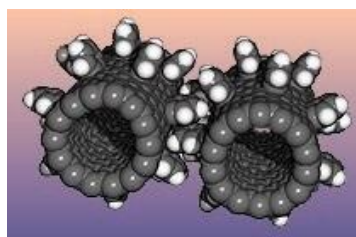
Warto podkreślić, że właściwości fizykochemiczne nanorurek węglowych zależą od ich struktury i czystości. Dlatego modyfikacje ich struktury, poprzez doczepianie do nich różnych chemicznych grup funkcyjnych, może zmieniać ich właściwości chemiczne i fizyczne. Modyfikowane nanorurki są atrakcyjnym materiałem startowym do syntezy nowych nanomateriałów [12]. I tak na przykład:

- materiał uzyskany przez ściskanie nanorurek jest twardszy niż diament a równocześnie sprężysty, ponieważ jest amorficzny,
- nanorurki uformowane na kształt nanotorusa badane są ze względu na zaskakujące właściwości magnetyczne.

Projektowanie nowych nanomateriałów wymaga także modyfikacji ich struktury.

Aby podkreślić znaczenie rozwoju nanomateriałów mówi się, że [12]:

- wiek XIX to wiek pary wodnej,
- wiek XX to wiek krzemu,
- wiek XXI to wiek nanomateriałów.



Rys. 4. Model Nano-przekładni zębatej wykonany z nanorurek (piasta) i cząsteczki benzenu (zęby); białe plamki to atomy wodoru [9]

Fig. 4. Model of Nano-mechanism consists of nanotubes and benzen particles, white spots – H-atoms

Wspomniane powyżej struktury węglowe cieszą się ogromnym zainteresowaniem ze strony projektantów mikro i nano mechanizmów oraz maszyn molekularnych (rys. 4) – być może wyposażonych w bakteryjne nanosilniki protonowe lub Syntazę ATP, która jest jednym z cudów molekularnego świata. Syntaza ATP to enzym, molekularny silnik, pompa jonowa i jeszcze jeden molekularny silnik, wszystko złączone razem w jedną zadziwiającą maszynę.

4. TECHNOLOGIE WYTWARZANIA MIKROSYSTEMÓW

Schemat budowania mikrosystemów (MEMS) został przedstawiony na rys. 2. Według tego schematu najpierw wytwarzane są mikroelementy (metodą top down), a następnie montowane są mikro i makroobiekty. Ponieważ mikrosystemy (MEMS) integrują w sobie elementy mechaniczne i elektroniczne, ich wytwarzanie wymaga zastosowania różnych materiałów i różnych procesów technologicznych.

W produkcji MEMS stosuje się różnorodne materiały, takie jak: Si; SiO₂; Si₃N₄, GaAs, kwarc, diament oraz inne materiały bazujące na pierwiastkach z grupy III i V układu okresowego pierwiastków Mendelejewa; stopy AlN, stopy z pamięcią kształtu, polimery itp. oraz procesy takie jak: epitaksja, utlenianie, naporowywanie, napylenie, CVD, PLCVD, PECVD, żol - żel, osadzanie anodowe, litografia (LIGA), trawienie chemiczne i elektrochemiczne [5],[8],[10].

W wytwarzaniu mikroelementów mechanicznych wykorzystuje się m.in. następujące procesy [2-4],[6],[15-19]:

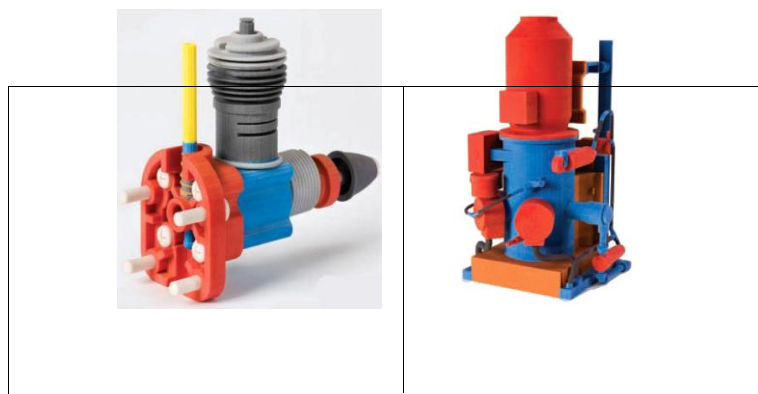
- mechaniczne usuwanie materiału (skrawanie, cięcie, szlifowanie, obróbka ultradźwiękowa),
- usuwanie materiału poprzez stapianie i odparowywanie (obróbka elektroerozyjna EDM - Electrodischarge Machining), obróbka laserowa (LBM - Laser Beam Machining), obróbka strumieniem jonów (IBM – Ion Beam Machining), obróbka strumieniem elektronów (EBM – Electron Beam Machining),
- usuwanie materiału poprzez ablację (obróbka laserowa przy użyciu laserów ekscymerowych i femtosekundowych),
- usuwanie materiału poprzez roztwarzanie (trawienie, fototrawienie, obróbka elektrochemiczna (ECM – Electrochemical Machining),
- obróbka plastyczna (kopiowanie kształtu formy/matrycy),
- krzepnięcie (odlewanie i formowanie wtryskowe),
- laminacja (wszystkie metody przyrostowe – np. SL, SLS, SLA, polimeryzacja dwu fotonowa),
- osadzanie katodowe (galwanoplastyka).

Wśród współczesnych procesów produkcyjnych są również takie, które są już automatycznie realizowane według schematu przedstawionego na rys. 2. Są to procesy stosowane w przemyśle i zwane przyrostowymi metodami wytwarzania (rys. 5). W metodach tych produkty (prototypy, narzędzia, funkcjonalne elementy) budowane są warstwa po warstwie lub w niektórych przypadkach „kropla po kropli”. W świetle inżynierskiej definicji mikroelementu, grubość każdej warstwy musi być znacznie mniejsza

od 1mm aby obiekt można nazywać mikroelementem. Zazwyczaj grubość pojedynczej warstwy w przypadku wytwarzania makroelementów zawiera się w przedziale 20 – 200 μ m, natomiast w przypadku wytwarzania mikro elementów to nawet od 1 - 5 μ m [10],[16,]. W przypadku metod gdzie obiekty budowane są „kropla po kropli” średnica kropli może mieć nawet od kilku do dziesiątych części mikrometra. W niektórych przypadkach urządzenia wykorzystywane do wytwarzania przyrostowego makroelementów nazywane są drukarkami 3D. Mogą być one wykorzystywane przez konstruktorów bezpośrednio do „drukowania” zaprojektowanych elementów lub nawet całych mechanizmów (rys. 6).



Rys. 5. Schemat wytwarzania przy użyciu metod przyrostowych
Fig. 5. Scheme of manufacturing by additive methods



Rys. 6. Model mechanizmu „wydrukowanego” przy użyciu urządzenia “Zprinter 450” produkowanego przez firmę: “Z Corporation”[10]

Fig. 6. Model of mechanism „printed” when using machine-tool manufactured by “ZCorporation” Company

5. PODSUMOWANIE

Mikro i nanotechnologie to główny i bardzo ważny kierunek badań i rozwoju w XXI wieku. Dwie główne strategie budowy obiektów to „bottom up” i „top down”. Pierwsza z nich została wypracowana przez naturę w ciągu ostatnich 4-5 miliardów lat i zastosowana do budowy organizmów żywych. Druga jest typowa dla technologicznych systemów wytwarzania budowanych przez człowieka. Najlepszym sposobem udoskonalenia

technicznych systemów technologicznych jest obserwacja, badanie i naśladowanie osiągnięć natury (Bionika). Jest wielce prawdopodobne, że poprzez udoskonalanie krok po kroku systemów technologicznych dzięki osiągnięciom z zakresu nanomateriałów, nanoinformatyki i nanoelektroniki będzie możliwa zmiana oblicza przemysłu i naszego codziennego życia. Nie stanie się to oczywiście natychmiast. Człowiek jest dumny ze swych osiągnięć, a właściciele firm i posiadłości nie zrezygnują ze swoich wpływów i bogactwa. Zatem pierwszy krok będzie polegał na integracji nanotechnologii ze współczesnymi systemami wytwarzania i sposobem życia. Przedsiębiorstwa, które nie wprowadzą osiągnięć mikro i nanotechnologii będą sukcesywnie eliminowane z rynku. W międzyczasie powinniśmy zastanowić się nad wszystkimi aspektami badania, rozwoju i wdrażania nanotechnologii, aby być przygotowanym mentalnie na nadchodzące zmiany.

LITERATURA

- [1] FEYNMAN R. P., 1960, *There's Plenty of Room at the Bottom*, Engineering and Science, 23/5, 22 – 36.
- [2] <http://www.ecmtec.eu>.
- [3] KOCK M., V. KIRCHNER, R. SCHUSTER, 2003, *Electrochemical micromachining with Ultrashort Voltage Pulses - a Versatile Method with Lithographical Precision*, Electrochimica Acta, 48/20-22, 3213-3219.
- [4] KOZAK J., 2002, *Micro EDM and its applications*. International Conference, Honkong March 20th.
- [5] LEWANDOWSKI K.T., *Nanotechnologia po polsku*; <http://wiadomości.gazeta.pl> (www.gazeta.pl – Agora©SA).
- [6] MALSHE A. P. i inni, 2010, *Tip-based nanomanufacturing by electrical, chemical, mechanical and thermal processes*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59, 628–651.
- [7] MALUF, K N., WILLIAMS, ARTECH HOUSE, 2004, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Second Edition, © ARTECH HOUSE, INC.
- [8] Redakcja naukowa oryginału: KELSALL R. W., HAMLEY I. W., GEOGHEGAN M., 2008, *Nanotechnologie*, Redakcja naukowa przekładu: K. Kurzydłowski, Wydawnictwa Naukowe PWN; Warszawa.
- [9] OCZOŚ K. E., 2003, *Nanotechnologia- wyzwaniem XXI wieku*, Wykład na Szkole Naukowej Obróbek Erozyjnych w Politechnice Warszawskiej.
- [10] OCZOŚ K. E., 2008, *Rola i znaczenie rapid technologii w budowie maszyn i medycynie*, Sympozjum pt. RAPID TECHNOLOGIE WBUDOWIE MASZYN I MEDYCYNIE (POZNAŃ), w ramach Salonu Obrabiarek i Narzędzi; www.poznan.pl.
- [11] OCZOŚ K. E., 2008, *Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*, Mechanik, 4.
- [12] PESZKE J., DŁUGOSZ J., STOBIŃSKI L., HONG– MING L., *Derivatization of Carbon Nanotubes by the ZnO and ZnS nanoparticles*, Nanorurki, fulereny.
- [13] PIRES D. i inni, 2010, *Nanoscale Three-Dimensional Patterning of Molecular Resists by Scanning Probes*, SCIENCE, 328, 732-735.
- [14] PRONŃ A., 2001, *Syntetyczne metale*, Wiedza i Życie, 2.
- [15] RAJURKAR K.P., LEVY G., MALSHE A., SUNDARAM M.M., MCGEOUGH J., HU X., RESNICK R., DESILVA A., 2006, *Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes*, Annals of the CIRP, 55, 2.
- [16] RUSZAJ A., 1999, *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*, Wydawnictwo IOS, Seria Monografie, Kraków.
- [17] RUSZAJ A., SKOCZYPIEC S., CZEKAJ J., MILLER T., DZIEDZIC J., 2007, *Surface micro and nanofinishing using pulse electrochemical machining process assisted by electrode ultrasonic vibrations*, Proceedings of the 15th International Symposium on Electromachining – ISEM XV, April 23 – 27, Pittsburg, Pennsylvania – USA, 309 – 314.
- [18] SCHULZE H-P., RUSZAJ A., GMELIN T., KOZAK J., KARBOWSKI K., BORKENHAGEN D., LEONE M., SKOCZYPIEC S., *Study of the Process Accuracy of the Electrochemical Micro Machining using Ultra Nanosecond and Short Microsecond Pulses*, Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, China – Shanghai.

- [19] SKOCZYPIEC S., RUSZAJ A., KOZAK J., 2010, *The conception of EC/EDMM sequential process for micro-tools manufacturing*, Proceedings of 5th International Conference on Advances in Production Engineering APE'2010, Warsaw University of Technology.
- [20] *Springer Handbook of Nanotechnology*, 2007, Bhushan Editor, 2nd Edition.
- [21] STĘPNIOWSKI W., 2008, *Węglowa Rewolucja*, Wiedza i Życie; 10, (Nanorurki, fulereny).
- [22] WĘGRZYN S., ZNAMIROWSKI L., 2008, *Zarys nanonauki i informatycznych molekularnych nanotechnologii*, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice.

SOME ASPECTS OF MICRO- AND NANO-TECHNOLOGIES APPLICATION
IN MANUFACTURING PROCESSES

Selected aspects of micro-and nanotechnology, which according to the authors are associated with current or future manufacturing techniques were described. Possibilities of integration of technical, biological and information sciences involving the latest achievements of material science were presented. As a result of this integration the ability to build production systems operating on the basis of codes similar to the genetic code of living organisms is expected. Examples of important, according to the authors, for development and integration of discoveries and technological solutions aimed at changing current strategy of systems' and their components building from the "top down" to the "bottom up". The article reveals a need to create interdisciplinary research teams to optimize the use and development of technologies that are the result of prior studies.