

Metody przyrostowe w mikrotechnologiach wytwarzania

Additive methods in micro and nano manufacturing technologies

ADAM RUSZAJ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.5-6.43>

Koncepcję i strategię mikro- i nanotechnologii przedstawił R.P. Feynman w 1959 r. Wprowadzenie ich do praktyki nastąpiło po opracowaniu i wdrożeniu skaningowego mikroskopu tunelowego (1981 r.) oraz mikroskopu sił atomowych (1985 r.). Dalszy rozwój mikro- i nanotechnologii zaowocował opracowaniem i zastosowaniem mikro- i nanoelektromechanicznych systemów (MEMS, NEMS), których produkcja rośnie od lat 90. o ok. 17÷20% rocznie. Wytwarzanie mikro- i nanoelementów występujących w tych układach jest trudne technologicznie z uwagi na niewielkie wymiary oraz często złożoną strukturę zewnętrzną i wewnętrzną. W takich przypadkach racjonalne może być zastosowanie metod wytwarzania przyrostowego. W artykule przedstawiono możliwości wytwarzania przyrostowego, głównie w mikrotechnologiach.

SŁOWA KLUCZOWE: wytwarzanie przyrostowe, mikrotechnologie, nanotechnologie, MEMS, NEMS

In 1959 R.P. Feynman has presented the concept and strategy of micro- and nanotechnology development. Their introduction to the practice took place after working out the scanning tunneling microscopy (1981) and atomic force microscopy (1985). In the further development of micro- and nanotechnology the micro and nano electromechanical systems (MEMS, NEMS) have been worked. MEMS and NEMS are widely applied in majority of modern equipment and the production of the equipment increases about 17÷20% per year since 1990s. MEMS and NEMS manufacture usually is a difficult technological problem because of small dimensions and complex outside and inside structures. In such cases the application of additive manufacturing processes can be very promising. In the paper the possibilities of additive manufacturing processes applications, mainly in microtechnologies, is presented.

KEYWORDS: additive manufacturing, microtechnologies, nanotechnologies, MEMS, NEMS

Wprowadzenie

29 grudnia 1959 r. w Kalifornijskim Instytucie Technologicznym amerykański fizyk, późniejszy laureat nagrody Nobla (1965 r.), Richard P. Feynman (1918–1988) podczas dorocznego posiedzenia Stowarzyszenia Amerykańskich Fizyków wygłosił wykład „There is a plenty room at the bottom” („Tam na dole jest dużo miejsca”) [1]. Zaprezentował w nim m.in. technologiczną wizję przyrostowego budowania nanoobjektów (atom po atomie lub cząsteczka po cząsteczce) – *bottom up*, czyli „z dołu w górę”, oraz wizję ekstremalnej miniaturyzacji obiektów – *top down*, czyli „z góry na dół”.

Dalszy rozwój mikro- i nanotechnologii zaowocował opracowaniem, zastosowaniem i dynamicznym rozwojem

systemów mikro- i nanoelektromechanicznych (MEMS, NEMS). Ich produkcja rośnie od lat 90. o ok. 17÷20% rocznie. Wytwarzanie nano- i mikroelementów występujących w tych układach (zwłaszcza w członach wykonawczych) jest ważnym, ale równocześnie bardzo trudnym technologicznie zadaniem.

Równoległe z mikro- i nanotechnologiami rozwija się bionika, czyli nauka badająca procesy, struktury i materiały występujące w przyrodzie, w celu istotnego udoskonalenia rozwiązań konstrukcyjnych elementów maszyn i urządzeń. Wprowadzanie bionicznych zmian w elementach zwykle znacząco utrudnia ich wykonanie tradycyjnymi metodami ubytkowymi czy metodami formowania. Takie złożone struktury bioniczne najlepiej wytwarzać metodami przyrostowymi.

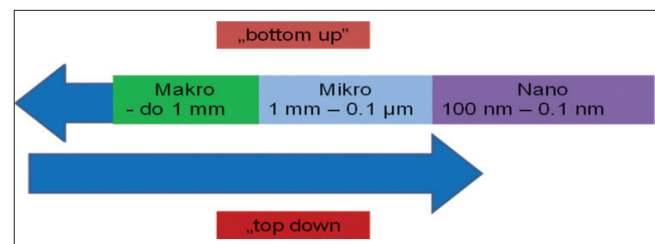
Termin „bionika” został po raz pierwszy użyty na konferencji „Living prototypes of artificial organs”, która odbyła się w Dayton w 1960 r., czyli w niespełna rok po opublikowaniu koncepcji R.P. Feynmana. Innymi słowy, od lat 60. XX w. można zaobserwować dynamiczny równoległy rozwój mikro- i nanotechnologii oraz bioniki. Na podstawie publikacji z tego zakresu można zdefiniować te pojęcia w obszarze inżynierii produkcji [1–4].

Nanotechnologia to umiejętność budowania nanoobjektów (nanoelementów) i nanomateriałów z pojedynczych atomów, cząstek i zespołów cząstek oraz integracji wytworzonych nanoelementów lub nanostruktur w większe systemy: mikro-, mezo- i makroukłady.

W inżynierii produkcji nanotechnologia obejmuje produkcję i zastosowanie elementów, których przynajmniej jeden wymiar zawiera się w przedziale 0,1÷100 nm (1D), a także ich integrację w większe systemy: mikro-, mezo- i makroukłady.

Mikrotechnologia to umiejętność wytwarzania mikroelementów, których przynajmniej jeden wymiar zawiera się w przedziale 0,1÷1000 μm (1D), oraz ich integracji w większe systemy: mezo- i makroukłady.

Koncepcje technologiczne sformułowane przez R.P. Feynmana – *bottom up* oraz *top down* – zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Granice wymiarowe nano-, mikro- i makroobjektów w aspekcie strategii wytwarzania – *bottom up* i *top down* [1, 3]

* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl, aruszaj@pwsz-ns.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0002-1809-3271> – Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej oraz Instytut Techniczny PWSZ w Nowym Sączu

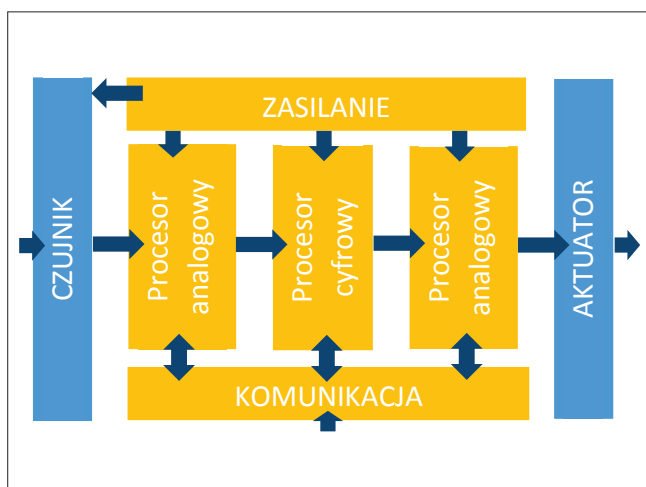
Jak wspomniano, dzięki wdrożeniu koncepcji R.P. Feynmana w Laboratorium Badawczym IBM w Zurichu zbudowano skaningowy mikroskop tunelowy (1981 r.) oraz mikroskop sił atomowych (1985 r.). W przypadku materiałów przewodzących prąd elektryczny współczesny skaningowy mikroskop tunelowy (STM) pozwala na:

- obrazowanie struktury atomowej i profilu powierzchni skanowanej z minimalną rozdzielczością od $0,1 \div 0,2$ nm,
- „budowanie” struktur z pojedynczych atomów – odpowiednio duże napięcie przyłożone do sondy mikroskopu tunelowego wyrwa atom z powierzchni próbki i umożliwia umieszczenie go w dowolnym miejscu.

Współczesny mikroskop sił atomowych (AFM) firmy Digital Instruments (USA) umożliwia obrazowanie struktury atomowej i profilu (zarysu) powierzchni skanowanej materiałów przewodzących prąd elektryczny i nieprzewodzących prądu, z rozdzielczością $0,1 \div 10$ nm.

Zastosowanie w badaniach mikroskopów STM i AFM zintensyfikowało rozwój mikro- i nanotechnologii wytwarzania, a jednym z istotnych jego kierunków jest doskonalenie systemów mikro- i nanoelektromechanicznych (MEMS i NEMS).

Strukturę tych systemów przedstawiono na rys. 2. Podstawowymi elementami MEMS i NEMS są czujniki, które identyfikują stan procesu/obiektu, oraz człony wykonawcze (aktuatory), które fizycznie sterują procesem/obiekt. Elementy aktuatorów są wytwarzane z wykorzystaniem nano- i mikrotechnologii; w najprostszym przypadku elementami podstawowymi są mikro- czy nanoelementy (np.: otwory, cylindry, tuleje, koła zębate i przekładnie).



Rys. 2. Schemat blokowy systemów MEMS i NEMS [3]

Z uwagi na obszerność zagadnienia w artykule scharakteryzowano przede wszystkim możliwości zastosowania metod przyrostowych w mikrotechnologiach.

Charakterystyka metod wytwarzania mikroelementów

Mikroelementy – czyli obiekty, których jeden (1D), dwa (2D) lub trzy (3D) wymiary mieszczą się w przedziale od 100 nm do 1 mm – znajdują zastosowanie w wielu urządzeniach, ale najczęściej pisze się o ich wykorzystaniu w członach wykonawczych MEMS. W wytwarzaniu mikroelementów stosuje się zarówno metody ubytkowe, przyrostowe, jak i metody formowania, w których nie zmienia się objętości czy masy elementu, ale nadaje mu odpowiedni kształt. Z uwagi na wciąż rosnący rynek MEMS (~17÷20% rocznie) konieczne jest opracowa-

nie racjonalnych technologii produkcji masowej. Duże znaczenie mają tutaj procesy formowania, czyli obróbki plastycznej, oraz procesy odlewania pod ciśnieniem mikroelementów, głównie z tworzyw sztucznych (*injection moulding*). Obecnie stosuje się również wiele procesów ubytkowych wykorzystujących różne zjawiska do kształtowania mikroelementów, m.in.:

- **mechaniczne oddziaływanie takich narzędzi, jak wiertła, frezy, tłoczniaki, matryce czy struga wodno-ścierna:** obróbka skrawaniem, obróbka plastyczna; we wszystkich tych przypadkach ograniczeniem kształtów i wymiarów wytwarzanych mikroelementów oraz mikrostruktur są siły mechaniczne występujące w procesie; siły te wynikają z właściwości obrabianego materiału i muszą być tak dobrane, aby nie uszkodzić przedmiotu obrabianego ani narzędzia [5–7];

- **topienie i parowanie czy ablację:** obróbka elektroerozyjna (EDM), laserowa (LBM) czy elektronowa (EBM); w tych metodach obrabiany materiał jest usuwany w wyniku topienia i parowania, a w przypadku obróbki femtosekundowymi impulsami laserowymi – nawet ablacji, czyli przejścia materiału bezpośrednio ze stanu stałego w stan gazowy [7–9];

- **roztwarzanie elektrochemiczne:** obróbka elektrochemiczna ubytkowa (ECM) [10, 11]; w obróbce elektrochemicznej materiał jest usuwany najmniejszymi porcjami, atom po atomie; z tego względu przy optymalnie dobranych warunkach obróbki można uzyskać bardzo dobre właściwości powierzchni obrabianego metalu czy stali; z uwagi na brak sił mechanicznych działających na przedmiot obrabiany i narzędzie proces znajduje szerokie zastosowanie w mikro- i nanowytwarzaniu.

W metodach formowania – czyli nadawania kształtu bez zmiany masy i objętości – istotną rolę, zwłaszcza w produkcji masowej, odgrywają (obok obróbki plastycznej) procesy odlewania oraz wytwarzania metodą wtrysku (*injection moulding*) [7, 12, 13]. W mikroodlewaniu i mikrowtrysku (*micro-injection moulding*) największym problemem jest wytwarzanie mikroform. W obróbce plastycznej kształt materiału uzyskuje się w wyniku mechanicznego oddziaływania na materiał takich narzędzi, jak tłoczniaki czy matryce. We wszystkich przypadkach obróbki plastycznej osiągnięcie pożądanych kształtów i wymiarów wytwarzanych elementów, a zwłaszcza mikroelementów czy mikrostruktur, ograniczają siły mechaniczne występujące w procesie. Siły te wynikają z właściwości obrabianego materiału i muszą być tak dobrane, aby nie uszkodzić przedmiotu obrabianego ani narzędzia [5–7].

Największe możliwości wytwarzania mikroelementów o złożonym kształcie i złożonej strukturze wewnętrznej dają procesy wytwarzania przyrostowego. Dlatego w dalszej części artykułu scharakteryzowano wybrane procesy wytwarzania przyrostowego w aspekcie mikrotechnologii wytwarzania.

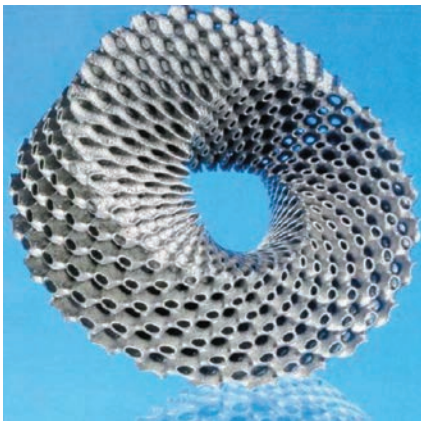
Wybrane mikrotechnologie wytwarzania przyrostowego

Metody przyrostowe – z uwagi na specyfikę budowania elementów – są najbardziej uniwersalne i w największym stopniu nadają się do wytwarzania finezyjnych kształtów czy struktur. Cenne są zwłaszcza możliwości wykonywania elementów cienkościennych o złożonej strukturze wewnętrznej. Ograniczenia wynikają przede wszystkim z rodzaju materiału wyjściowego i specyfiki procesów dodawania materiału, takich jak: wycinanie i spajanie (sklejanie, lutowanie czy nawet spawanie), fotolitografia,

spiekanie i stapianie proszków dowolnych materiałów czy wyłoczne osadzanie uplastycznionego materiału (tworzywa sztucznego).

Analiza stosowanych w produkcji procesów wytwarzania przyrostowego w aspekcie zaproponowanych definicji prowadzi do wniosku, że są one mikrotechnologiami (dodawanie mikroelementów 1D, 2D i 3D), a w przypadku procesu polimeryzacji dwufotonowej (2pp) osiągnięto granicę nanotechnologii, ponieważ porcje dodawanego materiału mają wymiary nawet 100÷200 nm. Stąd wynika, że polimeryzacja 2pp jest kolejnym stadium rozwoju procesu stereolitografii.

Dobrym przykładem możliwości obecnych procesów wytwarzania przyrostowego jest model wstęgi Mobiusa przedstawiony na rys. 3 [14–17].



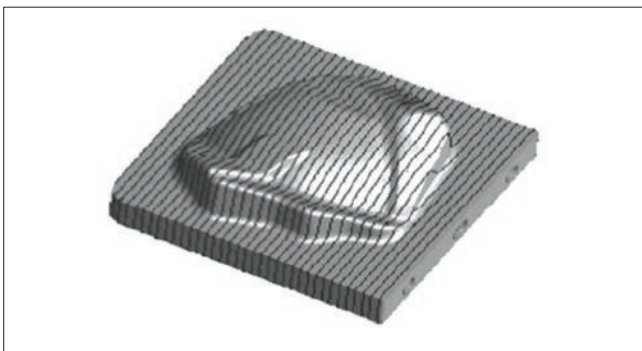
Rys. 3. Element w kształcie wstęgi Mobiusa wykonany metodą SLM na urządzeniu SLM realizer 250 firmy MCP-HEK Tooling [14]

Wytwarzanie przez spajanie warstw (laminated object manufacturing – LOM)

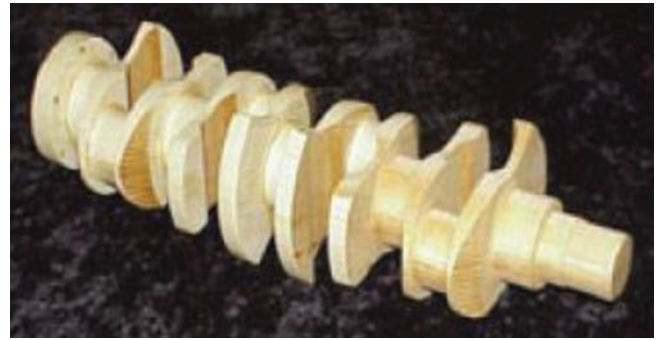
LOM polega na wytwarzaniu elementów przez wycinanie kolejnych warstw papieru, folii metalowej, folii z tworzyw sztucznych, tkanin itp. oraz ich spajaniu (klejeniu, spawaniu, lutowaniu itp.). Ich grubość zmienia się zwykle w przedziale od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów [15–17].

Proces LOM ma szerokie zastosowanie w:

- wizualizacji projektowanych obiektów w celu wstępnej oceny ich funkcjonalności bądź estetyki (m.in. w architekturze, przemyśle maszynowym czy przemyśle samochodowym),
- wytwarzaniu rdzeni do procesów odlewniczych (z papieru, tworzyw sztucznych) – w odlewaniu metodą wypalanych modeli,
- wytwarzaniu z folii czy blach metalowych narzędzi do formowania, np. form odlewniczych, tłoczników do wytwarzania karoserii samochodów i form wtryskowych (np. w firmie Toyota).



Rys. 4. Kształtowe narzędzie wykonane metodą LOM [16]



Rys. 5. Element (rdzeń odlewniczy) wykonany metodą LOM [17]

Z tej krótkiej charakterystyki procesu LOM widać, jak imponujący jest zakres jego zastosowania. Ponadto każda naklejana warstwa jest mikroelementem 1D – czyli zgodnie ze sformułowanymi na wstępie definicjami proces LOM jest zaawansowaną mikrotechnologią. Ale czy tą metodą można wytwarzać mikroelementy?

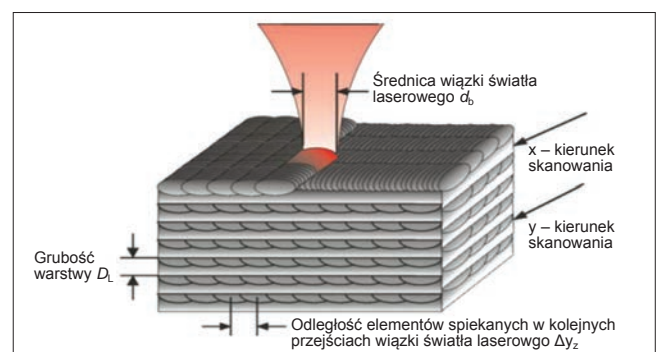
Tak, przede wszystkim mikroelementy 1D o grubości nieprzekraczającej 1 mm, ukształtowane w wyniku sklejenia warstw o grubości np. setnych części milimetra. Odpowiedni system laserowy do wycinania pozwala również na wytwarzanie mikroelementów 2D i 3D.

Selektywne spiekanie (stapianie) laserowe (SLS, SLM) proszków dowolnych materiałów

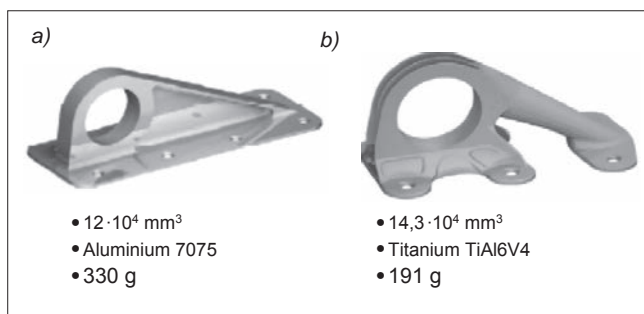
SLS to proces łączenia ziaren proszków dowolnych materiałów w wyniku zjawisk zachodzących na granicach ziaren (spiekania, spiekania z przetopieniem). Współczesne systemy do realizacji procesu SLS umożliwiają uzyskanie warstwy spiekanej (czyli stapianej) o minimalnej grubości od kilku do kilkunastu mikrometrów, a jak wynika z rys. 6, każda warstwa jest zbudowana z mikroelementów 2D.

W procesie SLS można stosować proszki metali, stopów, materiałów ceramicznych oraz tworzyw sztucznych, np.: poliamidów (PA), polistyrenu (PS) czy poliwęglanów (PC). Spiekanie metali realizuje się w atmosferze bez tlenu czy powietrza (w azocie, argonie, próżni). Często stosowane materiały to: molibden, wolfram, srebro, stal nierdzewna oraz ceramika ($Al_2O_3-SiO_2$). Ziarna proszków mają wymiary od nanometrów do dziesiątek mikrometrów.

Do spiekania stosuje się lasery o mocy do 20 W i średnicy plamki ok. 20 μm . Można osiągnąć warstwy o grubości od 1 do 5 μm ; minimalna grubość uzyskiwanych ścianek to 30 μm [16]. Ponieważ przedmiot jest budowany z mikroelementów (1D lub 2D), procesy SLS czy SLM umożliwiają wytwarzanie mikro-, mezo- i makroelementów. Na podstawie przedstawionych na wstępie definicji procesy SLS i SLM można zaliczyć do mikrotechnologii.



Rys. 6. Schemat procesu SLS proszków [17]



Rys. 7. Przykłady korpusów hamulców: a) konwencjonalnego oraz b) bionicznego. Kształt korpusu bionicznego może być uzyskany tylko metodami przyrostowymi [18]

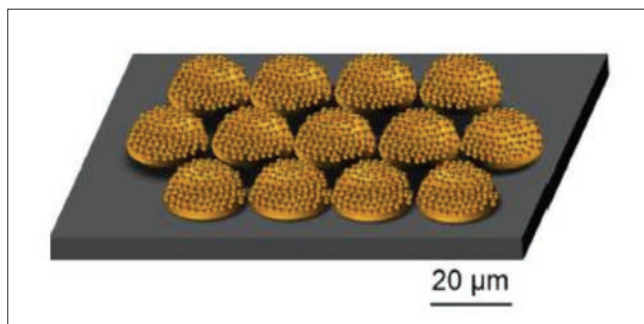
Stereolitografia (SL)

W stereolitografii wykorzystuje się zjawisko fotopolimeryzacji (zmiany stanu ciekłego na stały) cienkiej warstwy ciekłego monomeru pod wpływem światła nadfioletowego o odpowiedniej długości fali, emitowanego zwykle przez laser. Grubość nakładanej warstwy w warunkach mikrowytwarzania wynosi $1 \pm 20 \mu\text{m}$, a w procesie dwufotonowej polimeryzacji (2pp) dodawane elementy 3D mogą mieć minimalny wymiar 100 nm, czyli osiągają granice wymiarowe nanotechnologii [7, 16, 21].

W klasycznej stereolitografii grubość warstwy ustala się przez dobór średniego czasu napromieniowania dla danego rodzaju fotoinicjatora i jego stężenia. Im dłuższy czas napromieniowania, tym grubsza jest utworzona warstwa. Przykład zastosowania klasycznej stereolitografii w wytwarzaniu elementów bionicznych przedstawiono na rys. 8.

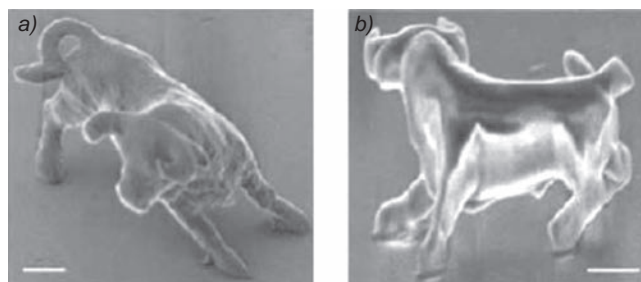
Materiałami wyjściowymi do wytwarzania metodą stereolitografii mogą być: kwas akrylowy, kwas metakrylowy oraz ich pochodne (takie jak: nityle, amidy i estry), żywice epoksydowe oraz żywice winylowe.

Proces dwufotonowej fotopolimeryzacji (2pp) został opracowany przez Maruo i Kawata w celu zlikwidowania ograniczeń w rozdzielczości struktur tworzonych w procesie mikro-SL [7, 16, 17, 20]. Do jego realizacji konieczne są lasery femtosekundowe. Impuls energii z takiego lasera wystarczy do wytworzenia gęstości fotonów wymaganej do polimeryzacji. W procesie 2pp fotoinicjator potrzebuje dwóch fotonów, aby zainicjować fotopolimeryzację. Moc lasera powinna być tak dobrana, aby graniczna moc niezbędna do zainicjowania fotopolimeryzacji została przekroczona tylko w środku plamki laserowej. Dzięki temu – chociaż wymiary plamki światła laserowego są rzędu mikrometrów – obszar zachodzącej polimeryzacji może być znacznie mniejszy, co nawet dziesięciokrotnie poprawia rozdzielczość tworzonych struktur w porównaniu



Rys. 8. Element optyczny w kształcie powiększonego oka komara. Na powierzchni występuje wiele prawie sferycznych kształtów (*hemispherical forms*), które generują takie funkcje, jak: hydrofobowość, przeciwo-blaskowość, odporność na zbrudzenia [19]

z klasyczną stereolitografią. Zastosowanie lasera femtosekundowego umożliwia uzyskanie przestrzennej rozdzielczości wymiarowej w zakresie $100 \pm 200 \text{ nm}$. Proces 2pp znajduje zastosowanie w wytwarzaniu mikrowirników, mikrooscylatorów, kryształów fotonicznych czy pamięci optycznych.

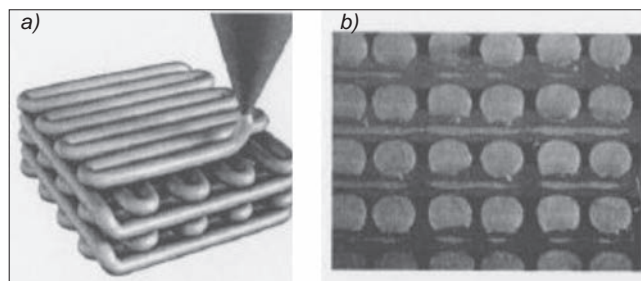


Rys. 9. Modele byka wykonane w procesie 2pp. Odcinek na rysunku ma wymiar $1 \mu\text{m}$ [16]

Firma Nanoscribe Company GmbH opracowała komercyjny system litografii 3D oparty na polimeryzacji 2pp: Photonic Professional GT. System realizuje mikrodrukowanie 3D oraz bezmaskową litografię z rozdzielczością ok. $100 \pm 200 \text{ nm}$ [23].

Process fused deposition modelling (FDM)

W metodzie tej włókno tworzywa sztucznego zostaje uplastycznione w specjalnej dyszy i nałożone na powierzchnie kształtowanego elementu (rys. 10). Metoda FDM znalazła szerokie zastosowanie w wytwarzaniu modeli doświadczalnych i prototypów podczas projektowania różnych urządzeń.



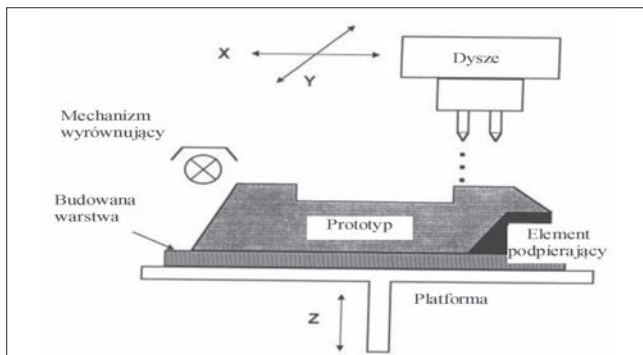
Rys. 10. Schemat powstawania przedmiotu przez dodawanie uplastycznionych włókien (mikroelementów 2D) – proces FDM (a) oraz przekrój mikrostruktury części wykonanej metodą FDM (b) [7, 17]

Coraz szersze zastosowanie znajduje FDM w inżynierii biomedycznej do wytwarzania wszelkiego rodzaju protez (w ortopedii i stomatologii), modeli i prototypów tkanek oraz elementów specjalnej aparatury, np. do dostarczania i rozprowadzania lekarstw [7].

Druk 3D (3D printing – 3DP)

Budowanie elementów przez nakładanie materiału kropla po kropli realizuje się co najmniej dwoma dyszami: jedna służy do nakładania materiału przedmiotu, a druga – do nakładania materiału podporowego. Dysze dozują kropla po kropli nakładany materiał, a kropla to zwykle mikroelement (3D) [7, 16]. Zasadę tego procesu wyjaśniono na rys. 11.

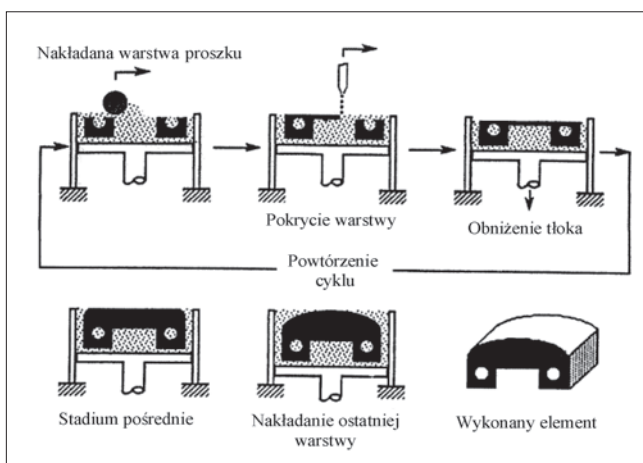
Proces umożliwia budowanie mikroelementów z warstw o grubości $16 \mu\text{m}$, z rozdzielczością $42 \mu\text{m}$. Znajduje on zastosowanie w wytwarzaniu biżuterii, części medycznych



Rys. 11. Schemat wyjaśniający zasadę budowania modelu przez dodanie kropli materiału – każda kropla to mikroelement 3D [7, 16, 17, 21]

(np. elementów aparatów słuchowych), w zrobotyzowanych technologiach operacyjnych typu endoskopia czy laparoscopia (uzupełnianie braków materiałowych w tkankach, organach wewnętrznych itp.) oraz w stomatologii (np. wytwarzaniu zębów) [7].

Interesującą odmianą druku 3D jest budowanie elementu przez spajanie proszków kroplami lepiszcza [7, 16, 22]. Warstwę proszku przygotowuje się analogicznie jak w procesie SLS, a następnie kropla po kropli nakłada się lepiszcze w miejscach, w których ziarna mają być połączone [7, 22]. Tak ukształtowany element może być poddany dalszej obróbce cieplnej (rys. 12).



Rys. 12. Zasada wytwarzania elementów przez spajanie ziaren proszku kroplami kleju [23]; minimalna grubość warstwy proszku ~45 μm

Proces umożliwia budowanie elementów o złożonych strukturach wewnętrznych (z pustymi wnętrzami lub z przestrzeniami wypełnionymi lekkimi materiałami). Ten sposób pozwala na zmniejszenie masy elementów, co ma szczególne znaczenie w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Dodatkowo stosunkowo duża rozdzielczość oraz fakt, że po spiekaniu element może być polerowany ($R_a < 1 \mu\text{m}$), rozszerzają możliwości zastosowania tej metody w stomatologii i medycynie oraz produkcji biżuterii [7, 16, 22].

Podsumowanie

Wprowadzone na wstępie definicje nano- i mikrotechnologii są w ścisłym związku z wynikami badań procesów zachodzących w przyrodzie. Dlatego od lat 60. ubiegłego wieku obserwujemy równoległy rozwój mikro- i nanotechnologii oraz bioniki. Warto podkreślić, że procesy rozwoju organizmów żywych w przyrodzie są nanotechnologiami przyrostowymi, zapewniającymi niezwykłą efektywność i różnorodność powstających organizmów.

Na podstawie obserwacji rozwoju przyrostowych technik wytwarzania można stwierdzić, że ich udział w procesach produkcyjnych dynamicznie wzrasta. Z przedstawionych w artykule rozważań wynika również, że w takich procesach, jak LOM, SLS, SLA, FDM czy 3DP elementy (mezo czy makro) są budowane z mikroelementów (1D, 2D lub 3D $\ll 1 \text{ mm}$). Czyli są to powszechnie stosowane w przemyśle mikrotechnologii.

LITERATURA

- [1] Feynman R.P. "There's plenty of room at the bottom". *Engineering and Science*. 23, 5 (1960): 22–36.
- [2] Samek A. „Bionika. Wiedza przyrodnicza dla inżynierów”. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2010.
- [3] Ruszaj A., Skoczypiec S., Wyszyński D., Lipiec P. „Wybrane aspekty zastosowania mikro- i nanotechnologii w procesach wytwarzania”. *Inżynieria Maszyn*. 4 (2011): 7–18.
- [4] Węgrzyn S. Znamirowski L. „Zarys nanonauki i informatycznych molekularnych nanotechnologii”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2008.
- [5] Brinksmeier E., Mutlugunes Y., Klocke F., et al. "Ultra-Precision Grinding". *Cirp Annals – Manufacturing Technology*. 59 (2010): 652–671.
- [6] Dornfeld D., Min S., Takeuchi Y. "Recent Advances in Mechanical Micromachining". *Cirp Annals – Manufacturing Technology*. 55, 2 (2006): 745–768.
- [7] Fassi I., Shipley D. "Micro-manufacturing Technologies and Their Applications; A theoretical and Practical Guide". Springer International Publishing; Switzerland, 2017.
- [8] Shashi P., Subrata K. "Experimental investigations and analytical model of multi-pass CO₂ laser processing on PMMA". *Precision Engineering*. 49 (2017): 220–234, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.010>.
- [9] Fiorucci M.P., Lopez A.J., Ramil A. "Multi-scale characterization on topographic modification on metallic biomaterial induced by nanosecond Nd:YVO₄ laser structuring". *Precision Engineering*. 5 (2018): 163–168, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.03.009>.
- [10] Koyano T., Kunieda M. "Ultra-short pulse ECM Rusing electrostatic induction feeding method". *Procedia CIRP*. 6 (2013): 390–384, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.066>.
- [11] Ruszaj A., Cygnar M., Grabowski M. "The State of the Art in Electrochemical Machining Process Modeling and Applications". *AIP Conference Proceedings 2017*. 020029 (2018), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5056292>.
- [12] Dong X., Chen F., Chen S., Yang Liu, et al. "Microstructure and microhardness of hot Extruded 7075 aluminium alloy micro gear". *Journal of Materials Processing Technology*. 219 (2015): 199–208, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.022>.
- [13] Su Yo-C, Shah J., Lin L. "Implementation and analysis of polymeric microstructures replication by micro-injection molding". *J Micromech Microengineering*. 14 (2014): 415–422.
- [14] Ocoś K.E. „Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów”. *Mechanik*. 4 (2008): 241–247.
- [15] Thompson M.K., et al. "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 65 (2016): 737–760, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [16] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. "Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing". Springer Science + Busines Media, 2010.
- [17] Poprawe R. "Tailored Light 2. Laser Application Technology". Springer, 2011.
- [18] Emmelmann C., Sander P., Kranz J., Wycisk E. "Laser additive manufacturing and bionic: Redefining lightweight design". *Physics Procedia*. 12 (2011): 364–368, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.046>.
- [19] Suzuki Y., Suzuki K., Michihata M., Takamasu K., Takahashi S. "One-shot stereolithography for biomimetic micro hemisphere covered with relief structure". *Precision Engineering*. 54 (2018): 353–360, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.07.004>.
- [20] Wrzyszczyński A. „Dwufotonowe inicjatory polimeryzacji”. *Polimery*. 3, LV (2010): 167–171.
- [21] Gatto A., Iuliano L., Settineri L. "Particles' formation and deposition in the sanders RP process". *Proceedings of the 7th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*. Aachen, Germany: AGIT Technology Centre (1998): 211–226.
- [22] Jee H. J., Sachs E. "Visually simulated surface texture models for 3D printing". *Proceedings of the 7th Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*. Aachen, Germany: AGIT Technology Centre (1998): 49–62.
- [23] www.nanoscribe.com.