

Przegląd nowoczesnych technologii druku 3D obiektów metalowych

A review of the newest 3D printing technology for metal objects

JAROSŁAW TATARCZAK
ZBIGNIEW KRZYSIAK
WALDEMAR SAMOCIUK
ZDZISŁAW KALINIEWICZ
LESZEK KRZYWONOS*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.89>

Artykuł zawiera przegląd najnowszych technologii druku 3D obiektów z metalu. Technologie te sklasyfikowano ze względu na sposób podawania oraz łączenia materiału. Wskazano wady i zalety poszczególnych rozwiązań podawania materiału metalowego. Przedstawiono skrótowy opis technologii druku 3D z użyciem materiału metalowego oraz zestawiono producentów oferujących urządzenia do danej technologii.

SŁOWA KLUCZOWE: druk 3D, obiekty metalowe, technika przyrostowa

The article presents the newest technologies of the 3D printing of metal objects. The technologies were classified on account of the way of laying and joining material. The research results are indicated the advantages and the disadvantages of the various methods of joining metal material. There is presented a brief description of the technology of the 3D printing which using a metal material, and lists of manufacturers who offering the device in the technology.

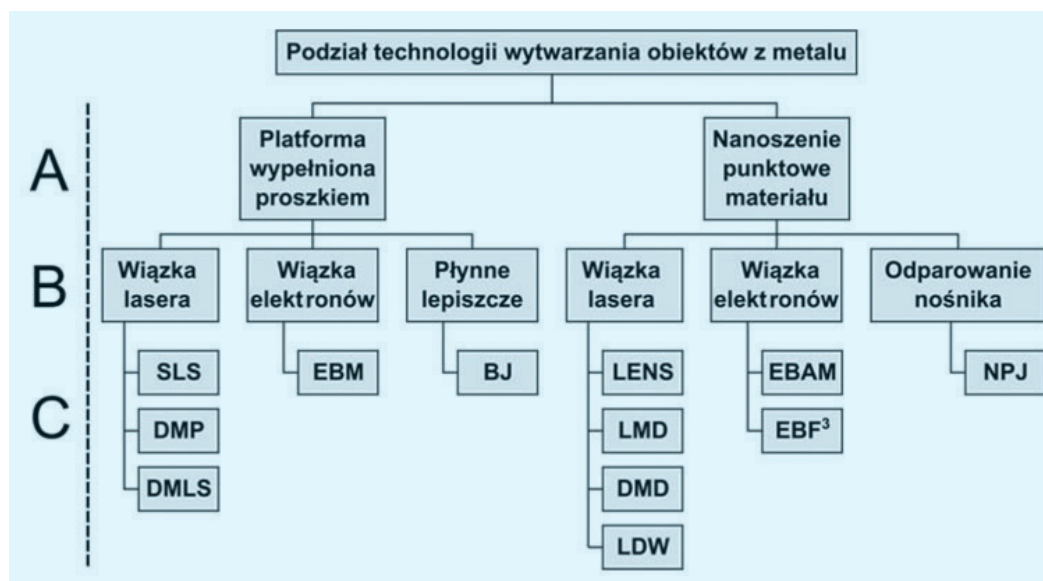
KEYWORDS: 3D printing, metal objects, additive technique

Druk trójwymiarowy (3D), należący do przyrostowych technik wytwarzania, jest wykorzystywany już od ponad 30 lat. Pionierem w tej dziedzinie jest Charles Hull, który w 1984 r. opracował technologię zwaną stereolitografią. Polega ona na utwardzaniu fotonopolimerów za pomocą wiązki promieni ultrafioletowych. W kolejnych latach nastąpił wzrost zainteresowania tematyką druku przestrzenne-

go. Przełomowe było ostatnie dziesięciolecie, kiedy druk 3D został „uwolniony” od obowiązywania pierwszych praw patentowych, które właśnie wygasły. Dodatkowo projekt RepRap (*replicating rapid prototyper*) spopularyzował technikę druku przestrzennego za sprawą możliwości jego wykorzystywania – na zasadach wolnego dostępu do schematów urządzenia czy oprogramowania. Obecnie techniki przyrostowe znajdują się w obszarze zainteresowania wielu branż przemysłu. Potrzeby są jednak skierowane na zastosowanie technik 3D do tworzenia obiektów metalowych.

Podział technologii

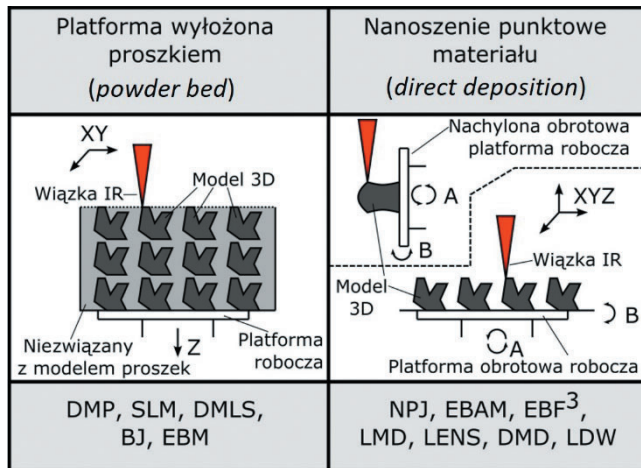
Technika przyrostowego wykonywania metalowych obiektów uwzględnia: formę materiału roboczego oraz sposób jego łączenia i podawania. Dobór poszczególnych rozwiązań określa rodzaj technologii, w jakiej urządzenie będzie pracowało. Obecnie wyróżnia się wiele technologii druku 3D obiektów metalowych, a każda ma wyjątkowe cechy. Wybór najlepszej technologii zależy przede wszystkim od potrzeb wykonawcy i zamawiającego obiektu 3D z metalu. Te wymagania to najczęściej: krótki czas i niski koszt wytworzenia, odpowiednie właściwości mechaniczne materiału, wysoka dokładność (wierne odwzorowanie) czy druk skomplikowanych geometrycznie modeli. Na rys. 1 przedstawiono autorski podział technologii druku 3D obiektów metalowych.



Rys. 1. Klasyfikacja technologii druku 3D obiektów metalowych (A – sposób podawania materiału, B – sposób łączenia materiału, C – skrótowa nazwa technologii)

* Mgr inż. Jarosław Tatarczak (jaroslaw.tatarczak@up.lublin.pl), dr hab. inż. Zbigniew Krzysiak (zbigniew.krzysiak@wp.pl), dr inż. Waldemar Samociuk (waldemar.samociuk@up.lublin.pl) – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie; dr hab. inż. Zdzisław Kaliniewicz, prof. UWM (zdzislaw.kaliniewicz@uwm.edu.pl) – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie; dr inż. Leszek Krzywonos (l.krzywonos@pollub.pl) – Politechnika Lubelska

Głównym kryterium podziału jest sposób podawania materiału: z użyciem platformy wypełnionej (oraz regularnie wyrównywanej) proszkiem (*powder bed*) lub bezpośrednio punktowe nanoszenie (*direct deposition*) [1]. Bezpośrednie punktowe nanoszenie – typowe dla procesów spiekania, topienia czy napawania – gwarantuje, że wewnątrz zamkniętej bryły nie znajdują się pozostałości nieutwardzonego proszku. System podawania materiału poprzez równe wyłożenie proszku na platformie roboczej ma natomiast tę przewagę, że model nie musi mieć wygenerowanych wsporników. Dodatkowo ta metoda daje możliwość wykonywania modeli piętrowo, tzn. w wyższych partiach komory roboczej. Na rys. 2 przedstawiono porównanie opisanych sposobów podawania materiału.



Rys. 2. Porównanie sposobów podawania materiału (poniżej schematów poszczególnym sposobom przyporządkowano odpowiednie technologie)

Kolejnym kryterium podziału jest sposób łączenia materiału. Niemal wszystkie technologie wymagają wysokiej temperatury, powodującej spiekanie lub stapianie materiału. W metodach wykorzystujących wiązki lasera czy elektronów konieczne jest użycie urządzenia pracującego w gazoszczelnej (lub próżniowej) komorze [2]. Sposób łączenia materiału wpływa na powstanie nowej gałęzi klasyfikującej.

Szczegółowy opis technologii

Technikę wytwarzania przyrostowego cechuje duża różnorodność metod, sposobów czy form wykonywania metalowych obiektów [1]. Dodatkowo wielu producentów – aby podkreślić unikatowość swojego rozwiązania technicznego – tworzy nowe nazwy. Zazwyczaj są one kilkuletnimi skrótami od nazwy metody.

Poniżej zestawiono często pojawiające się skróty stosowane w odniesieniu do różnych metod druku 3D obiektów metalowych:

- **SLS** (*selective laser sintering*) – selektywne spiekanie laserowe (proszków różnych materiałów). W tej metodzie nie następuje pełne stopienie proszku, lecz łączenie przez nadtopianie. Efektem takiego sposobu łączenia jest powstanie porów, które mogą niekorzystnie wpływać na szczelność czy wytrzymałość modelu [3].
- **DMP** (*direct metal printing*) – bezpośredni druk metalem. Ten skrót jest stosowany przez firmę 3DSystems do opisu całej linii urządzeń do wytwarzania przyrostowego metalowych obiektów [2].
- **SLM** (*selective laser melting*) – selektywne stapianie laserowe (proszków różnych metali). Najczęściej wykorzystywane są proszki stali nierdzewnej. W odróżnieniu

od SLS proszek jest przetapiany przez wiązkę lasera, co zapewnia szczelność modelu (brak porów) [1, 4].

- **DMLS** (*direct metal laser sintering*) – bezpośrednie spiekanie (proszków) metalu laserem. Metoda bazuje na tej samej zasadzie co SLS, jednak jest przeznaczona wyłącznie do spiekania proszków różnych metali [4, 5].

- **BJ** (*binder jetting*) – strumieniowe natryskiwanie lepiszczem. W metodzie jako materiał roboczy wykorzystuje się proszek (np. ceramikę, plastik, metal), na którym osadza się lepiszcze. Metalowe obiekty mogą wymagać procesu infiltracji w celu podniesienia gęstości i tym samym wytrzymałości wydruku [3].

- **NPJ** (*nanoparticle jetting*) – strumieniowe natryskiwanie nanocząsteczek. W tej metodzie jako materiał roboczy stosuje się mieszkankę nanocząsteczek różnych metali oraz ciekłego nośnika. Razem tworzą one zawiesinę, która na modelu jest osadzana w formie kropelek. W komorze roboczej urządzenia drukującego panuje temperatura 300°C, zapewniająca natychmiastowe odparowanie ciekłego nośnika tuż po osadzeniu na modelu. Metoda umożliwia wytwarzanie pojedynczych warstw o wysokości 2 µm. Patent na to rozwiązanie ma izraelska firma Xjet [2].

- **EBM** (*electron beam melting*) – stapianie wiązką elektronów. Jest to jedna z metod wykorzystujących najbardziej zaawansowane technicznie urządzenia do wytwarzania przyrostowego. Druk w metodzie EBM wymaga stworzenia warunków próżniowych w komorze roboczej. Metoda pozwala na wykonywanie modeli o wysokiej jakości (wysokiej gęstości) i bardzo dobrych parametrach wytrzymałościowych [1, 4, 6].

- **EBAM** (*electron beam additive manufacturing*) – wytwarzanie przyrostowe wiązką elektronów. Podobnie jak EBM metoda ta wykorzystuje wiązkę elektronów do stopienia materiału i wymaga stworzenia warunków próżniowych. W tym wypadku materiał w formie drutu jest podawany bezpośrednio w miejsce, gdzie ma zostać stopiony [2].

- **EBF3** (*electron-beam freeform fabrication*) – wytwarzanie dowolnych form wiązką elektronową. Metoda ta została opracowana przez NASA do druku modeli warunkach zerowej grawitacji. Sama koncepcja wytwarzania powstała w 2001 r. [7].

- **LC** (*laser cladding*) – laserowe napawanie. Metoda ta polega na miejscowym nanoszeniu materiału – w postaci proszku lub drutu – i spiekaniu/topieniu go laserem. Jest wykorzystywana do tworzenia nowych obiektów oraz naprawy/regeneracji uszkodzonych bądź zużytych elementów maszyn, np. przez naniesienie dodatkowej warstwy w miejscu ubytku [7]. Takie skróty, jak LMD, LENS, DMD i LDMD odnoszą się – w mniejszym lub większym stopniu – do metody LC [1] [9].

- **LDW** (*laser deposition welding*) – laserowe osadzanie przez spawanie. Skrót odnosi się głównie do metod związanych z naprawą lub modyfikacją istniejących obiektów. Jednym z producentów urządzeń przeznaczonych do tej metody jest firma DMG MORI [2].

- **LMD** (*laser metal deposition*) – laserowe osadzanie metalu. Metoda jest specyficznym rozwiązaniem napawania laserem LC. Może polegać na napawaniu proszkiem bądź materiałem w formie drutu i jest wtedy oznaczana jako LMD-p (od: *powder*, proszek) i LMD-w (od *wire*, drut) [1].

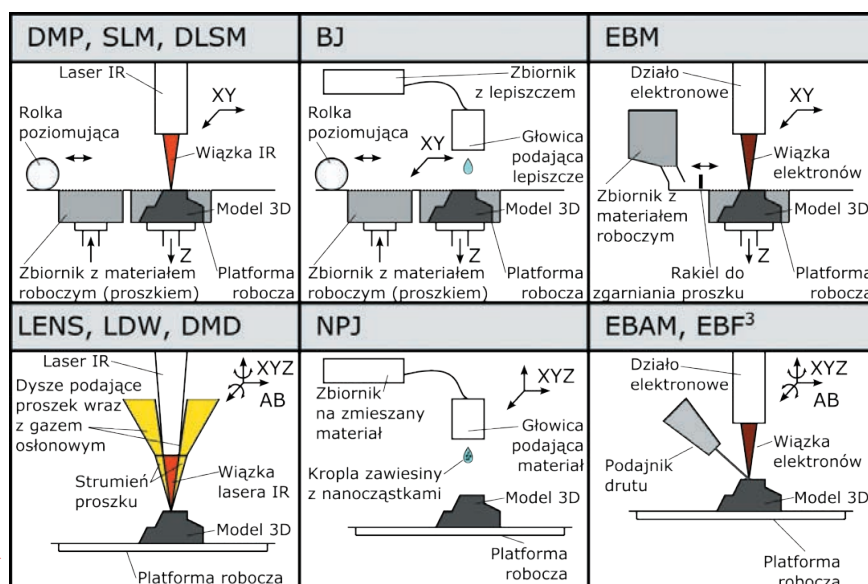
- **LENS** (*laser engineered net shaping*) – laserowe wykonanie ostatecznego kształtu i wymiaru. Metoda jest specyficznym rozwiązaniem metody napawania laserem LC, a została opracowana i opatentowana przez Sandia Corporation. Nazwa LENSTM jest zastrzeżona jako znak towarowy przez Sandia Corporation [8].

• **DMD** (*direct metal deposition*) – bezpośrednie osadzanie metalu. Metoda ta jest specyficznym rozwiązaniem metody napawania laserem LC. Skrót DM3D jest stosowany do określania rozwiązań przyrostowych firmy POM Grup [2].

Schematy działania każdej metody przedstawiono na rys. 3.

Pomimo opisywanych podobieństw w procesie wytwarzania obiektów metalowych producenci oferują urządzenia o różnych parametrach pracy. W tabelicy zestawiono przykładowych producentów urządzeń do druku 3D obiektów metalowych.

Rys. 3. Ogólne schematy działania różnych technologii druku 3D z użyciem materiałów metalowych



TABLICA. Porównanie wybranych technologii oferowanych przez producentów drukarek 3D [2]

Nazwa skrótowna	Wybrany producent	Wybrany model	Pole robocze	Prędkość druku	Dokładność
DMP	3DSYSTEMS	ProX®DMP 300	250 × 250 × 330 mm	b.d.	±0,1+0,2% przy min. ±50 μm
SLM	SLM-SOLUTION	SLM®280HL	280 × 280 × 365 mm	do 55 cm³/h	80÷115 μm*
DMLS	EOS	EOS M 290	250 × 250 × 325 mm	do 420 m/min	100 μm*
BJ	ExOne	M-Flex®	400 × 250 × 250 mm	ok. 30+60 s/warstwa***	63,5 × 60,0 × 100,0 μm (XYZ)
NPJ	XJet Ltd.	sprzedaż od 2017 r.	500 × 250 × 250 mm	b.d.	2 μm **
EBM	Arcam	Arcam Q20plus	350 × 380 mm (Ø × wys.)	480 km/min	140 μm *
EBAM	Sciaky Inc.	EBAM™ 68	711 × 635 × 1600 mm	3,18÷9,07 kg/h	–
LDW	DMG MORI	LASERTEC 65 3D	500 × 399 mm (Ø × wys.)	1 kg/h***	1,5÷2,5 mm *
LMD	TRUMPF	TruLaser Cell 3000	600 × 420 × 520 mm	85 m/min	15 μm
LENS	Optomec	LENS MR-7	300 × 300 × 300 mm	3,6 m/min, do 100 g/h	± 25 μm
DM3D	POM Group	DMD105d	300 × 300 × 300 mm	2 m/min	–

* Średnica skupienia wiązki

** Producent podaje wyłącznie grubość pojedynczej warstwy

*** Czas na jedną warstwę w zależności od materiału

Podsumowanie

Ciągły rozwój techniki wpływa na powstawanie coraz nowszych metod wytwarzania obiektów metalowych. Obiekty te pełnią obecnie nie tylko rolę prototypów, lecz także w pełni funkcjonalnych elementów maszyn czy urządzeń. Mnogość rozwiązań technologicznych pozwala dobrać drukarkę 3D według potrzeb. Podsumowując przedstawiony przegląd technologii druku 3D obiektów metalowych, można wysnuć następujące wnioski:

- Najlepszą jakość wydruku (dokładność odwzorowania) można uzyskać w technologii NPJ (2 μm = warstwa), która obecnie jest w fazie testowej. Pozostałe technologie mają znacznie mniejszą dokładność odwzorowania w osi Z.
- Najwyższą prędkością druku charakteryzuje się technologia EBAM. Producent podaje, że jego urządzenie może osiągnąć prędkość budowy modeli na poziomie 9 kg/h.
- Największą gęstość wypełnienia, przekładającą się na wytrzymałość mechaniczną, można uzyskać w technologii EBM. Wykorzystuje ona rozprężone elektrony w próżni do topienia i łączenia proszku. Dodatkową zaletą tej metody jest wysoka czystość materiału (co wynika z łączenia materiału w warunkach próżniowych).
- Wielkość drukowanych obiektów zależy od technologii i dostępnego modelu drukarki. Przestrzeń, w której może być drukowany metalowy obiekt, ma minimalne wymiary 250 × 250 × 325 mm (EOS M 290).
- Niektóre z technologii pozwalają na regenerację lub nadbudowę warstw na metalowych obiektach. Są to technologie: EBAM, LDW, LMD, LENS i DM3D.

- Rozwiązanie LASERTEC 65 3D firmy DMG MORI stanowi kombinację maszyny drukującej i skrawającej. W trakcie pracy urządzenie może osadzać metalowe warstwy oraz przeprowadzić obróbkę skrawającą (jedną czynność w danej chwili). Zaletą tego rozwiązania jest możliwość wykonania wygładzonych powierzchni wewnętrznych metalowego obiektu.

LITERATURA

- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. "Additive manufacturing of metals". *Acta Materialia*. (2016): s. 371–392.
- Katalogi informacyjne producentów: 3DSYSTEMS, SLM-SOLUTION, EOS, ExOne, XJet Ltd., Arcam, Sciaky Inc., DMG MORI, TRUMPF, Optomec, POM Group.
- Siemiński P., Budzik G. „Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D”. Warszawa: OWPW, 2015.
- Murr L.E., Martinez E., Amato K.N., Gaytan S.M., Hernandez J., Ramirez D.A., Shindo P.W., Medina F., Wicker R.B. "Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science". *Journal of Materials Research and Technology*. (2012): s. 42–54.
- Atzeni E., Salmi A. "Evaluation of additive manufacturing (AM) techniques for the production of metal-ceramic dental restorations". *Journal of Manufacturing Processes*. (2015): s. 40–45.
- Portale branży druku 3D: additively.com, 3ders.org, 3dprintingindustry.com, swiatdruku3d.pl, centrumdruku3d.pl (dostęp: 20.09.2016 r.).
- Michopoulos J.G., Lambrakos S., Iliopoulos A. "Multiphysics challenges for controlling layered manufacturing". *34th Computers and Information in Engineering Conference*, New York, 2014.
- Gill D., Smugeresky J.E., Atwood C.J. "Laser Engineered Net Shaping™ (LENS®) for the Repair and Modification of NWC Metal Components". SANDIA REPORT, 2006.
- Wang W., Pinkerton A.J., Wee L.M., Li L. "Component repair using laser direct metal deposition". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. (2008): s. 827–836.