



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**

Im. Jarosława Dąbrowskiego



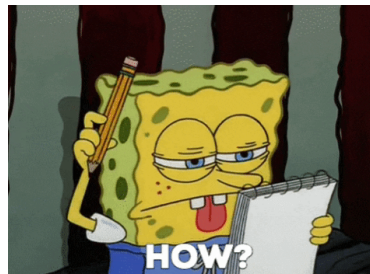
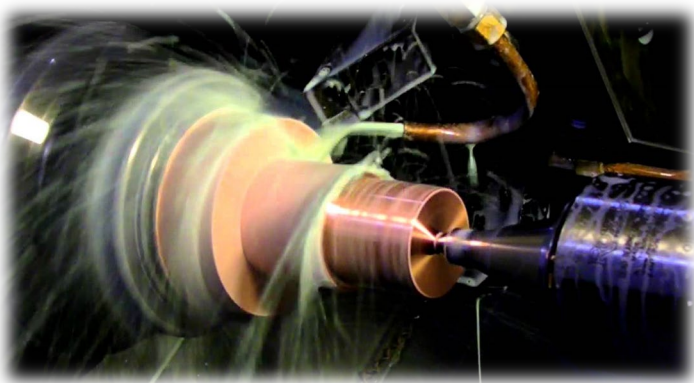
Podstawy CAx

**Technologie przyrostowe szybkiego prototypowania
Przegląd podstawowych metod druku 3D oraz
przykłady ich zastosowania.**

ppłk dr inż. Paweł PŁATEK

WYDZIAŁ MECHATRONIKI, UZBROJENIA I LOTNICTWA

Jak wyeliminować ograniczenia klasycznych konwencjonalnych technik produkcyjnych?



Jak zwiększyć efektywność w zakresie wytwarzania nowych produktów?



Jak wykonać obiekty charakteryzujące się skomplikowaną geometrią w możliwie krótkim czasie ?

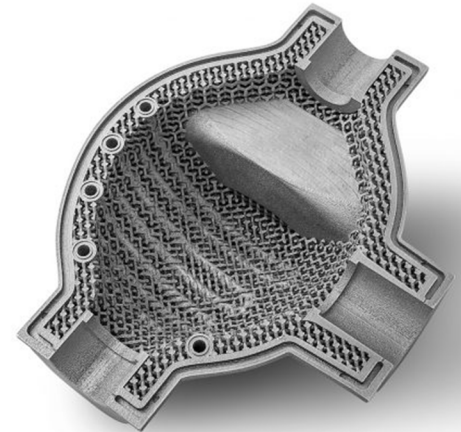
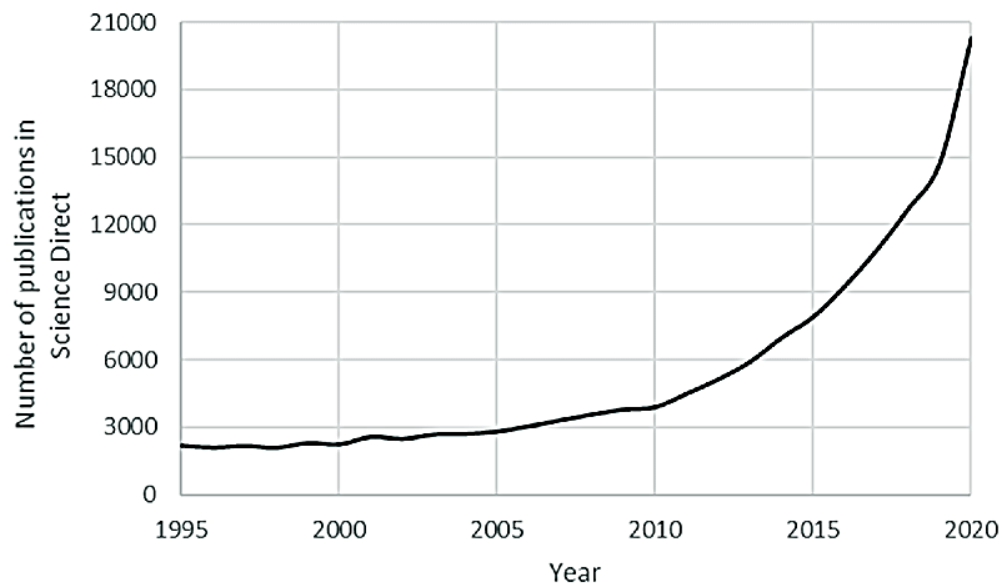
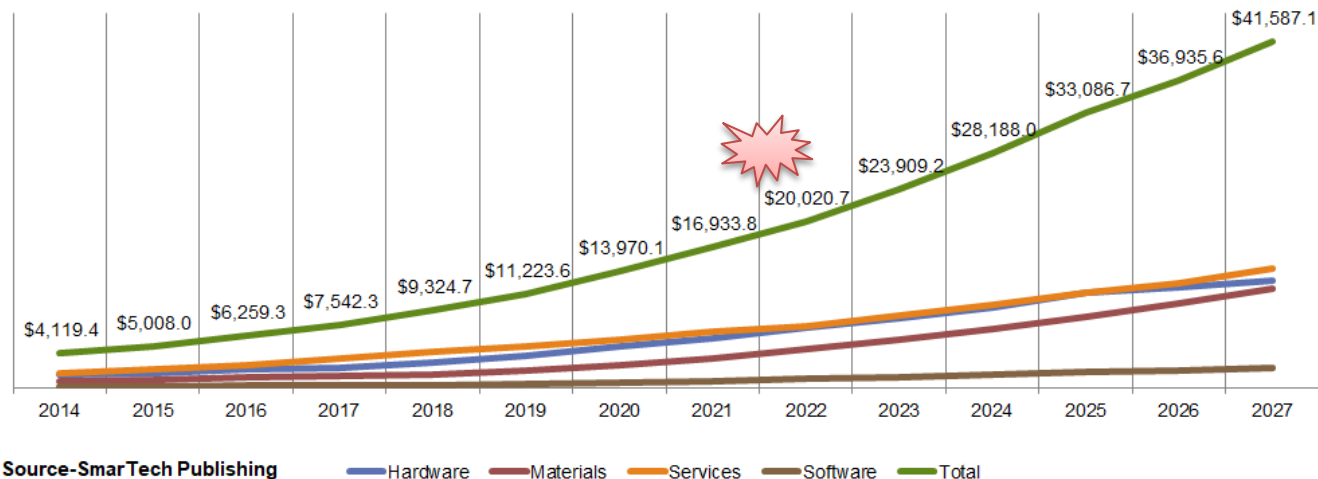


FIGURE [2] /
Porsche turbo exhaust manifold printed by MIMO Technik in Inconel 625 with a 1-mm wall

Additive Manufacturing – istota procesu

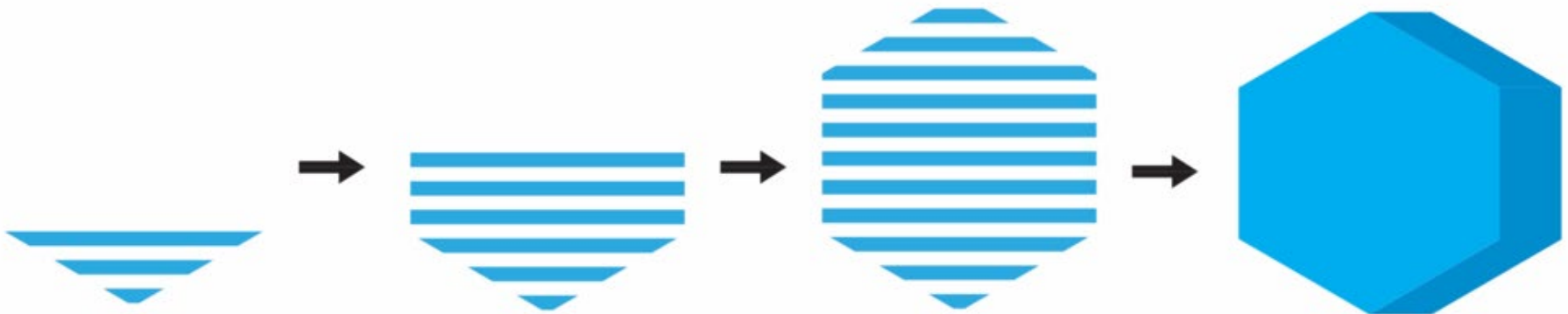
Total Additive Manufacturing Market Size, by Opportunity Segment, All Technologies (Professional environments only), 2014-2027(e)



**z roku na rok można
zaobserwować znaczący
wzrost zainteresowania
przyrostowymi technikami
produkcji**

Additive Manufacturing (Przyrostowe Techniki Wytwarzania) – to grupa metod produkcyjnych w których **obiekt rzeczywisty wytwarzany jest metodą warstwa po warstwie** zgodnie z kolejnymi przekrojami modelu geometrycznego opracowanego w programach typu CAD.

Schemat powstawania obiektów za pomocą przyrostowych technik wytwarzania



Technika ta potocznie nazywana jest **drukiem 3D** pomimo faktu, że zbyt wiele z tradycyjnym drukiem nie ma wspólnego ;)

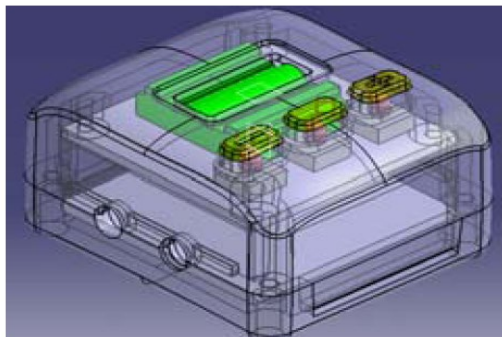
W zależności od przeznaczenia modelu wykonanego z wykorzystaniem technik AM możemy podzielić je na:

- **zapewniające jedynie wstępną weryfikację**, czyli odzwierciedlające kształt, formę modelu jedynie w sposób przybliżony, mniej precyzyjny;
- **funkcjonalne**, czyli posiadające niektóre parametry zbliżone lub nawet identyczne z parametrami właściwego wyrobu. Pozwalają one na dokładną prezentację gotowego przyszłego wyrobu, mogą posłużyć chociażby do oceny zainteresowania produktem;
- **będące w zasadzie gotowymi elementami**. Są to modele wykonane technologiami RP już jako seria próbna, o wszystkich parametrach właściwego wyrobu. Możemy na nich przeprowadzić badania własności fizycznych, przeanalizować możliwość wprowadzenia zmian w już wytwarzanych produktach;

Gdy znamy zastosowanie naszego modelu, łatwo możemy określić, z jakiego materiału powinien zostać wykonany i chociażby na tej podstawie możemy dokonać wyboru technologii.

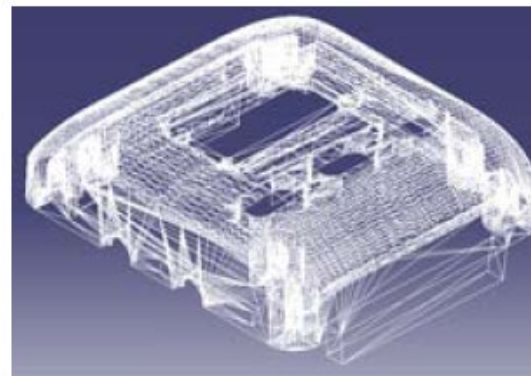
A jest w czym wybierać...

Additive Manufacturing – istota procesu



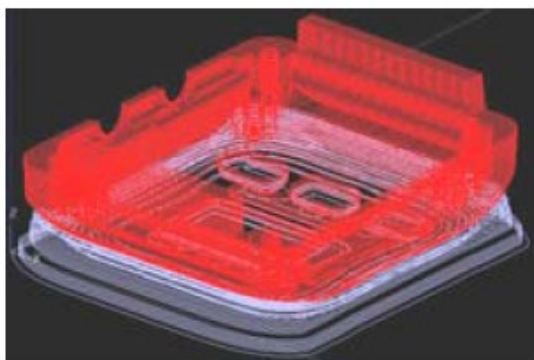
Model 3D CAD

CAD → STL



Model w formacie STL

**STL → 2D
przekroje**



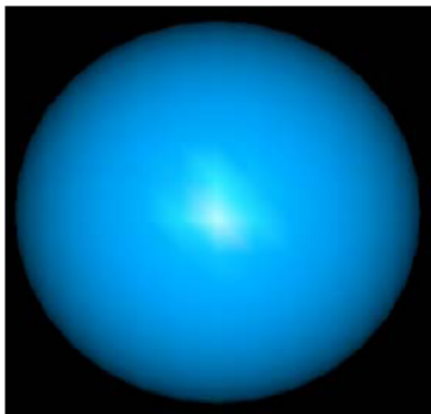
**Model podzielony na
dwuwymiarowe przekroje**

Budowa

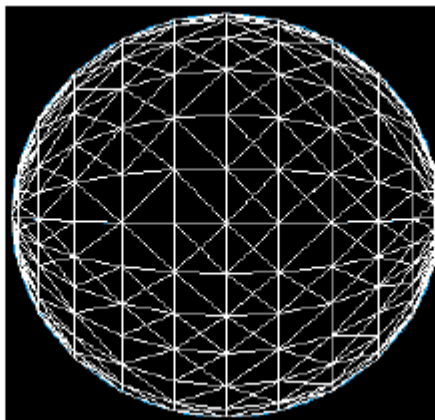


Obróbka wykańczająca

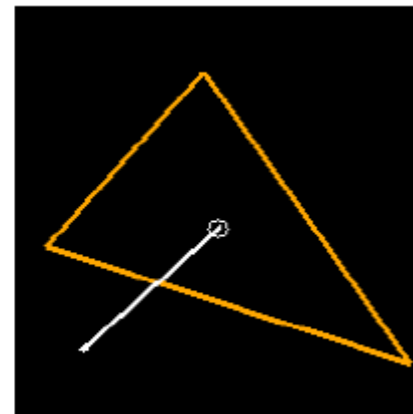
Format STL co to takiego?



Model 3D



**Model po
triangulacji**

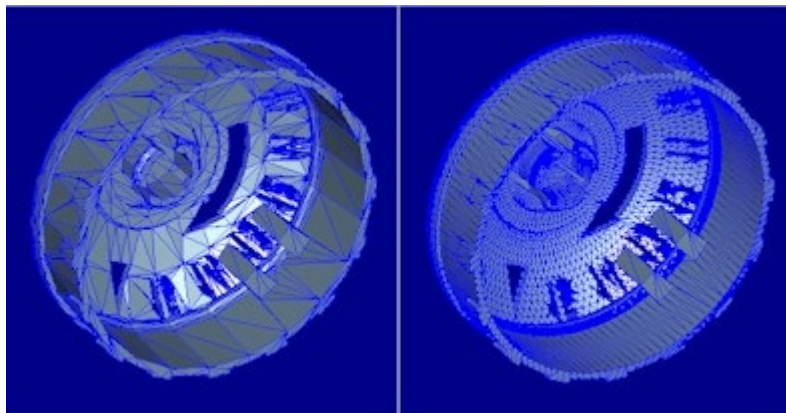


**Pojedynczy trójkąt
i wektor normalny**

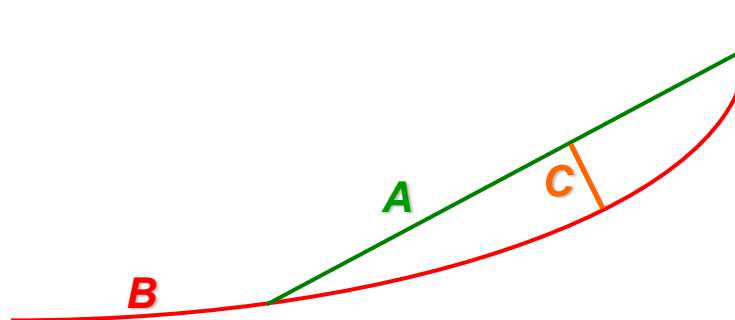
-) **STL = stereolithography**
-) **format rozwinięty przez 3D Systems**
-) **nieformalny standard dla RP**

STL - standardowy format wymiany danych w dziedzinach przemysłu związanych z Szybkim Prototypowaniem, wymaganym przy pracy z maszynami stereolitograficznymi.

Format STL co to takiego?



Wpływ tolerancji na jakość odwzorowania powierzchni



A – powierzchnia po triangulacji

B – powierzchnia wejściowa

C - tolerancja

...

facet normal 7.060325e-001 -7.060338e-001 -5.508592e-002

outer loop

vertex -1.924657e+001 -3.877589e+000 -3.000000e+000

vertex -1.919848e+001 -3.855762e+000 -2.663359e+000

vertex -1.936898e+001 -4.000000e+000 -3.000000e+000

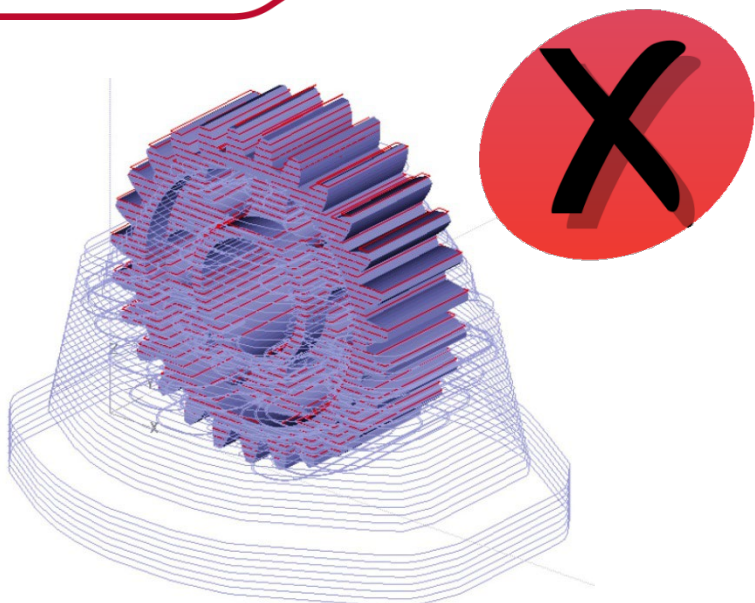
endloop

endfacet

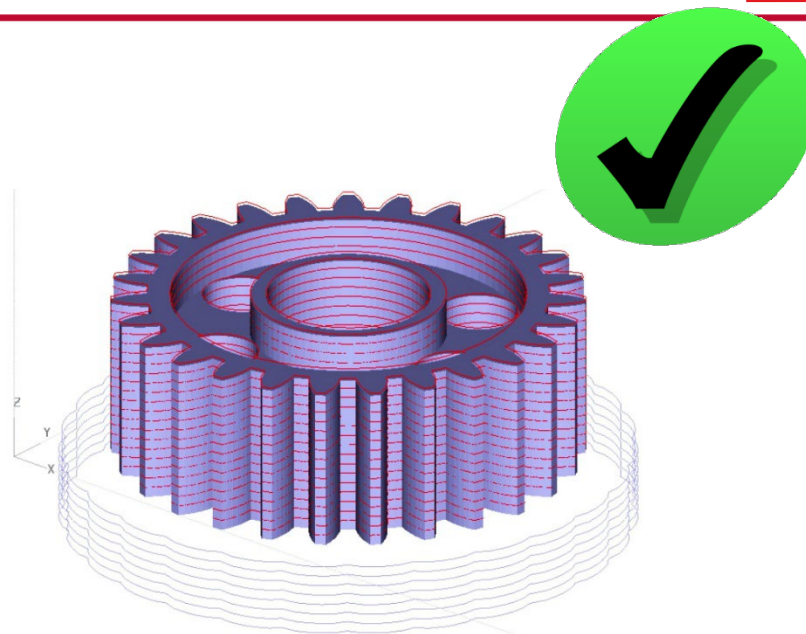
...

Przykład pliku STL w formacie ASCII

Jak należy przygotować model ?

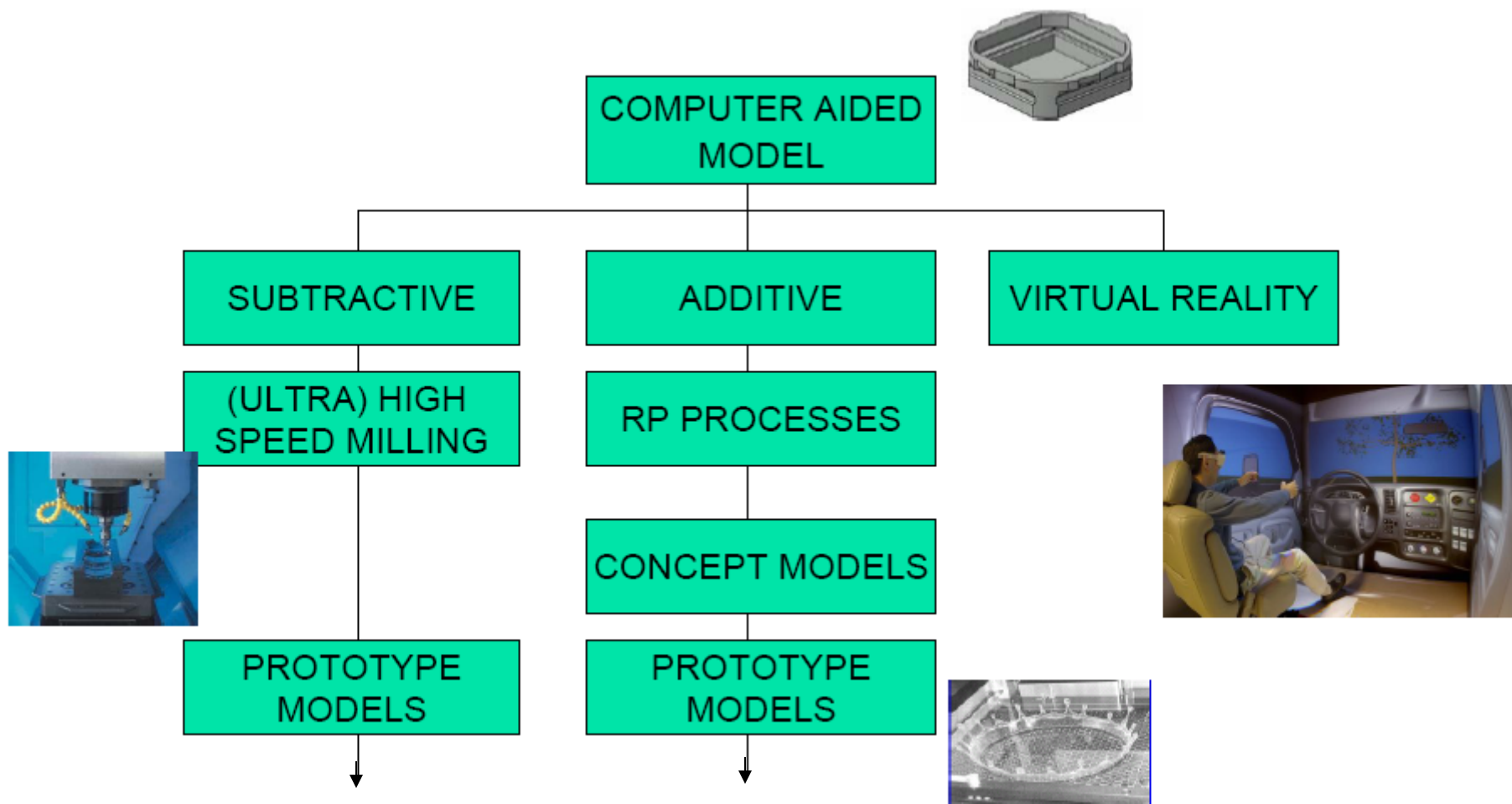


- **niska jakość wykończenia,**
- **niewielka wytrzymałość podczas pracy,**
- **duża ilość materiału podporowego,**
- **dłuższy czas druku,**
- **wyższy koszt wydruku**



- **lepsze wykończenie powierzchni,**
- **większa wytrzymałość podczas pracy,**
- **niewielka ilość materiału podporowego**
- **krótszy czas druku**
- **niższy koszt wydruku**

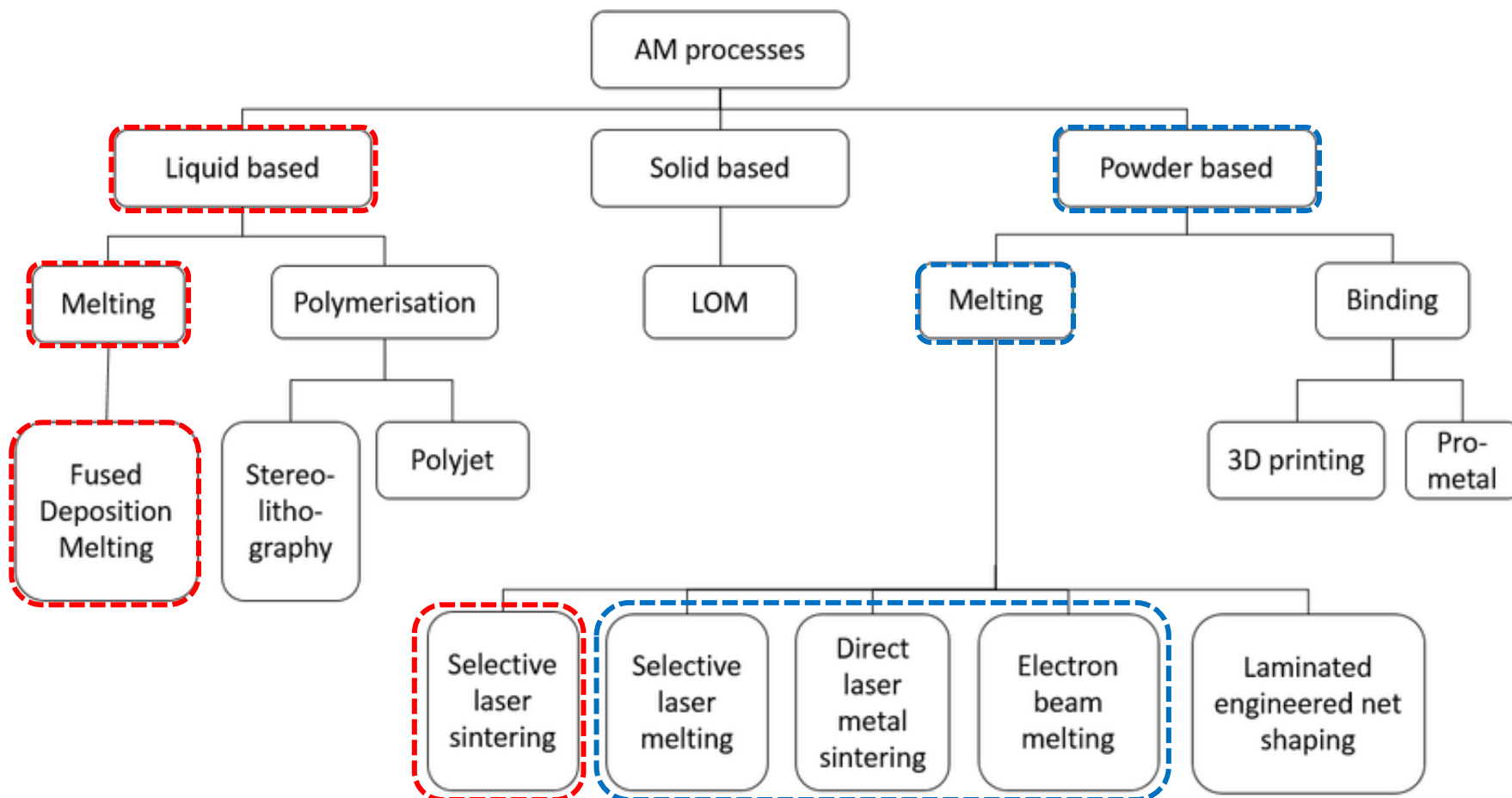
Additive Manufacturing co to takiego?





Współczesne techniki wytwarzania przyrostowego

Klasyfikacja komercyjnie dostępnych technik wytwarzania przyrostowego AM (Additive Manufacturing)



maj 1980 (Japonia)



Hideo Kodama (*Nagoya Municipal Industrial Research Institute*)

- dokonuje pierwszego zgłoszenia patentowego: **„żywica fotopolimerowa wystawiona na działanie światła UV twardnieje pozwalając na budowanie obiektów w sposób warsztatowy”**
- publikuje dwie prace naukowe, które są traktowane jako początki tzw. rapid prototyping.

1984-86 (Francja)



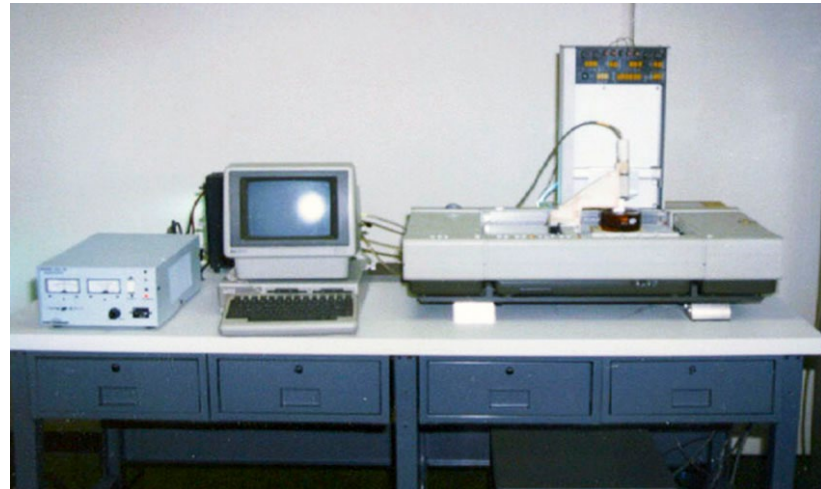
Alain le Méhauté, Jean-Claude André, Olivier de Witt

- ich spotkania na stołowie French National Center for Scientific Research zaowocowały opracowaniem techniki stereolitografii;
- pierwszy wydrukowany obiekt – model spiralnych schodów;
- przełożeni z FNCSR nie doceniają ich osiągnięcia ;(

Ich zastrzeżenie patentowe dotyczące stereolitografii zostało zgłoszone trzy tygodnie przed Chuck Hull'em z USA. Francuski patent francuski zostaje przyznany w styczniu 1986 roku. Od zaproponowanego przez nich terminu Stereolithography utworzona zostaje nazwa rozszerzenia plików *.STL

1986 (USA)

Chuck Hull – współzałożyciel firmy 3D System



- właściciel 93 patentów w USA oraz 20 w Europie, współzałożyciel firmy 3D System;
- sfrustrowany inżynier pracujący w branży meblarskiej (zajmuje się pokrywaniem blatów mebli twardą powłoką ochronną w postaci żywicy utwardzanej za pomocą światła UV) postanawia usprawnić proces wytwarzania modeli prototypowych z tworzywa sztucznego;
- opracowuje niezależnie od zespołu francuskiego własne rozwiązanie w dziedzinie Stereolitografii (SLA), postanawia założyć własną działalność;
- w 1988 roku pojawia się pierwsze komercyjne dostępne urządzenie do tzw. druku 3D za pomocą metody (SLA).

1988 (USA)

Carl Deckard – ojciec technologii Selective Laser Sintering (SLS)



- w wieku 8 lat podczas wizyty w Henry Ford Museum, postanawia zostać wynalazcą ;);
- studiował w w University of Texas, podczas wakacyjnej pracy w fabryce TRW w Houston dostrzega potrzebę opracowania technologii wspomagającej klasyczną obróbkę ubytkową - tak w jego głowie powstaje idea kolejnej techniki wytwarzania przyrostowego;
- jako student, a następnie doktorant wspólnie z dr Joe Beaman z UT-Austin Technology Incubator przez kolejne 2,5 roku udoskonalają jego pomysł... tak powstaje technologia SLS (Selective Laser Sintering).

1988 (USA)

Scott Crump twórca technologii Fused Deposition Modelling (FDM)



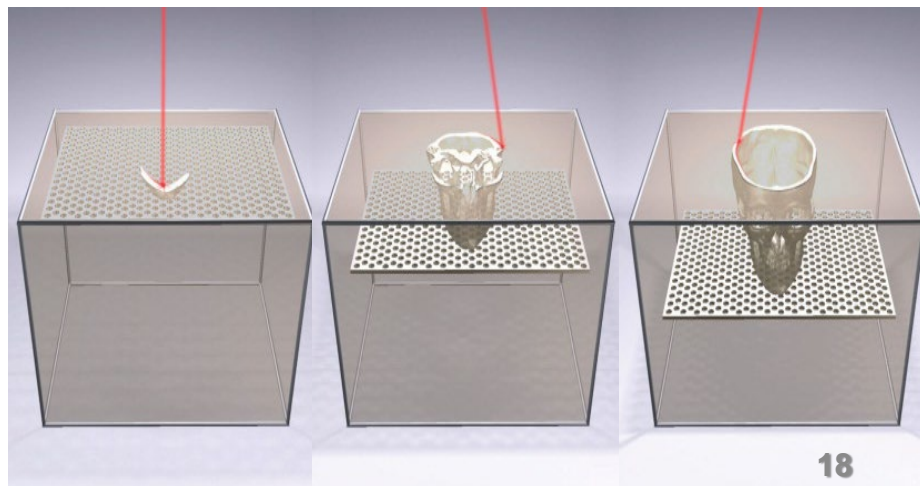
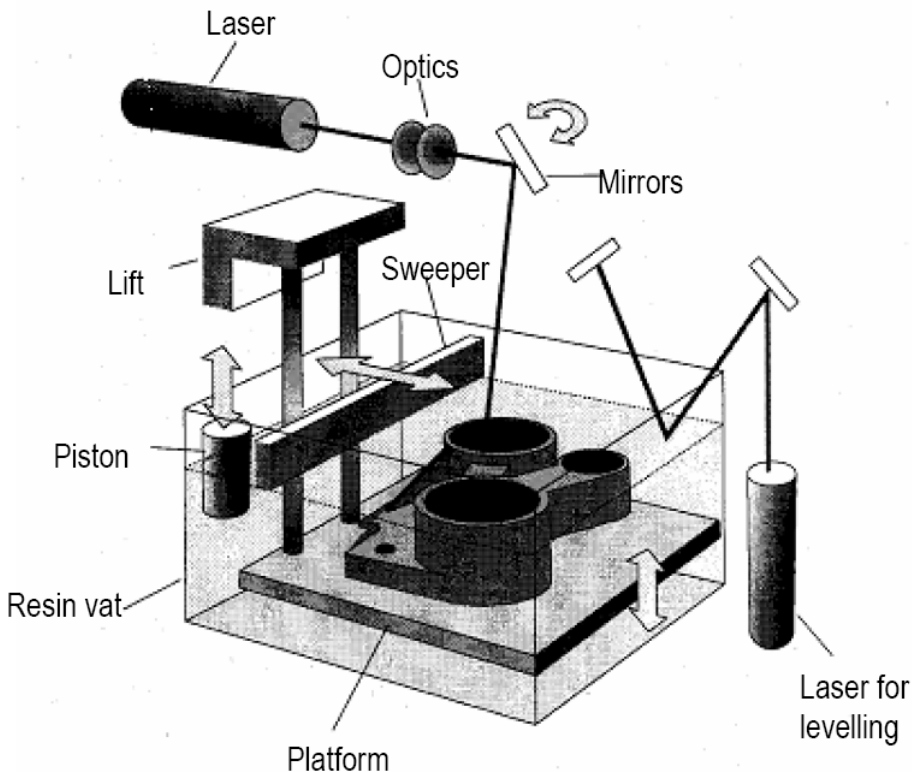
- interesowała go idea maszyn, które pozwalałyby na automatyczne wytwarzania obiektów 3D,
- eksperymentował w ...kuchni, mieszając воск z polietylenem, a następnie za pomocą pistoletu do kleju próbował wykonać zabawkę dla swojej córki;
- zauważył, że jeśli pistolet wykonywałby ruch roboczy w układzie 0XYZ proces ten mógłby być realizowany automatycznie - tak w jego głowie powstaje pomysł technologii Fused Deposition Modelling (FDM);
- pracował w firmie ABS plastics filaments, produkującej tworzywa sztuczne;
- wspólnie z żoną w 1989 roku patentuje swoje odkrycie.
- W 1992 roku wspólnie zakładają firmę Stratasys Ltd.

Stereolithography (SLA) – charakterystyka metody

Idea procesu (SLA) polega na naświetlaniu żywicy światłoczułej za pomocą światła UV lub laserowego

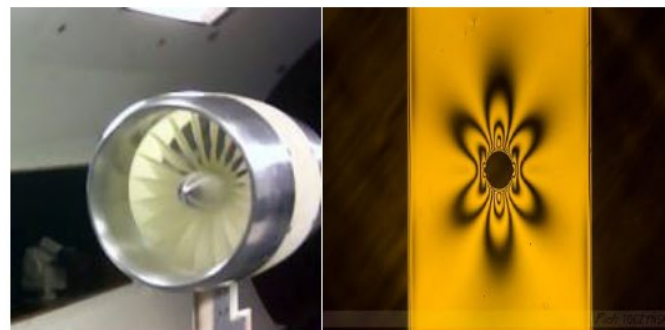
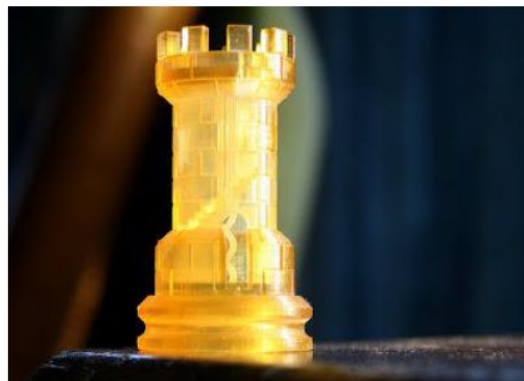
MATERIAŁ: ciekły, światło utwardzalny polimer

- + „wysokie” detale i cienkie ścianki,
- + jakość powierzchni wydruku,
- + dobrze poznany proces,
- wymagana obróbka wykańczająca,
- ryzyko deformacji i skurczu,
- ograniczona liczba odmian materiałów,
- struktura podporowa



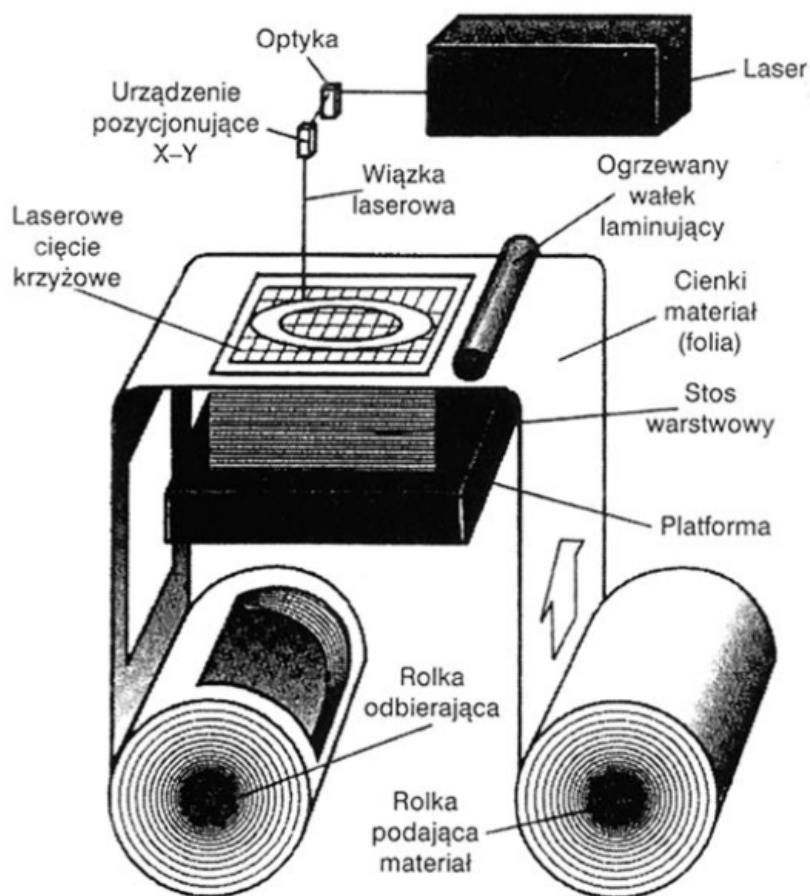
Stereolithography (SLA) – przykłady zastosowań

Modele poglądowe, pokazowe o ograniczonej funkcjonalności

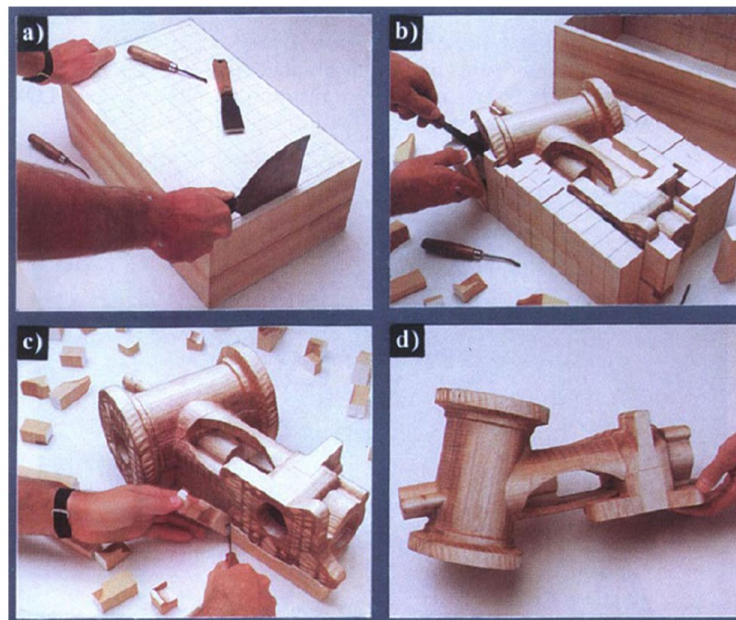


Laminated Object Manufacturing (LOM) – charakterystyka metody

Idea procesu (LOM) polega na klejeniu cienkiej folii lub papieru, a następnie wycinaniu materiału mechanicznie lub za pomocą światła lasera



Fazy końcowe wytwarzania prototypów technologią LOM



- a) stos warstwowy
- b) usuwanie ramy
- c) usuwanie materiału odpadowego
- d) gotowy model

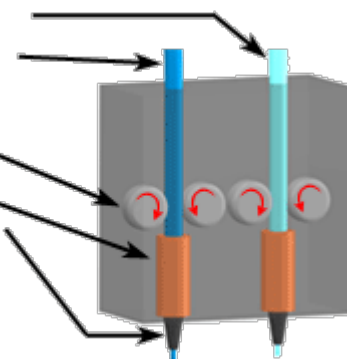
foto: K. Oczko „Rapid Prototyping w procesach odlewniczych”, Prace Instytutu Odlewnictwa, Kraków 1997

Fused Deposition Modelling (FDM) – charakterystyka metody

Idea procesu (FDM) polega na nakładaniu naprzemiennym warstw materiału podporowego i modelowego zgodnie z geometrią modelu 3D z tworzywa sztucznego ABS i jego pochodnych

WŁÓKNO MATERIAŁU PODPOROWEGO
WŁÓKNO MATERIAŁU MODELOWEGO

PODAJNIK ROLKOWY
GRZAŁKA
DYSZE DRUKUJĄCE



GŁOWICA DRUKUJĄCA

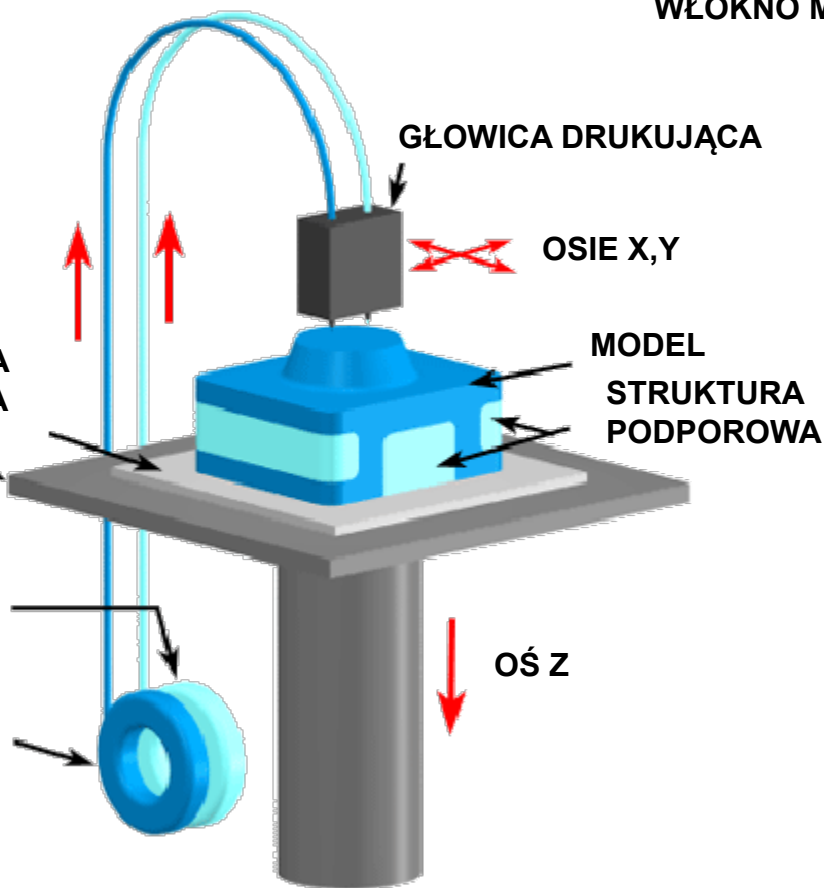
OSIE X,Y

OŚ Z

PODSTAWA
MODELOWA
STÓŁ
ROBOCZY

MODEL
STRUKTURA
PODPOROWA

MATERIAŁ
PODPOROWY
MATERIAŁ
MODELOWY



Fused Deposition Modelling (FDM) – rozwiązania techniczne

Obecnie jest to jedna z najbardziej rozpowszechnionych technik druku 3D. Producenci oferują szeroką gamę urządzeń możliwych do zastosowania o zróżnicowanych możliwościach technicznych.





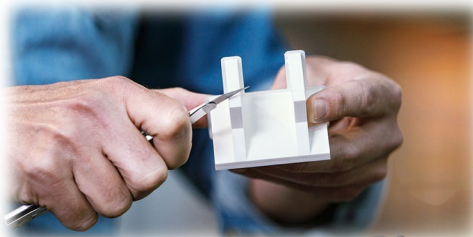
Ciekawe rozwiązanie z zakresu druku 3D wielkogabarytowego

Worlds Largest 3D Printed Boat

Printed: September 19-22 2019

Fused Deposition Modelling (FDM) – przykład zastosowania

Modele poglądowe, makiety o właściwościach zbliżonych do rzeczywistego obiektu zastosowanie tworzywa sztucznego np. PLA/ABS/ PET



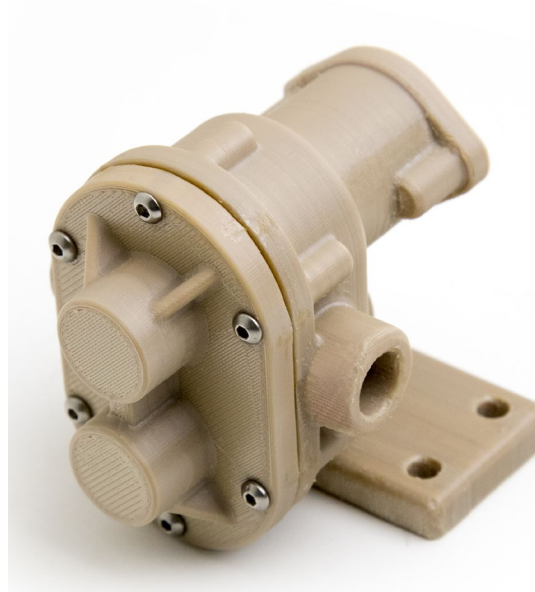
Fused Deposition Modelling (FDM) – przykład zastosowania

Modele poglądowe, makiety o właściwościach zbliżonych do rzeczywistego obiektu zastosowanie tworzywa sztucznego np. PLA/ABS/ PET



Fused Deposition Modelling (FDM) – przykład zastosowania

Elementy części mechanicznych o wysokiej funkcjonalności uwarunkowane od zastosowanego tworzywa sztucznego np. ULTEM, Polyflex, Nylon, PEEK



Fused Deposition Modelling (FDM) – przykład zastosowania

Elementy części mechanicznych o wysokiej funkcjonalności uwarunkowane od zastosowanego tworzywa sztucznego np. BASF Ultrafuse 316L



Fused Deposition Modelling (FDM) – przykład zastosowania

Elementy części mechanicznych o wysokiej funkcjonalności uwarunkowane od zastosowanego tworzywa sztucznego np. BASF Ultrafuse 316L



filament

3D printing

Green part

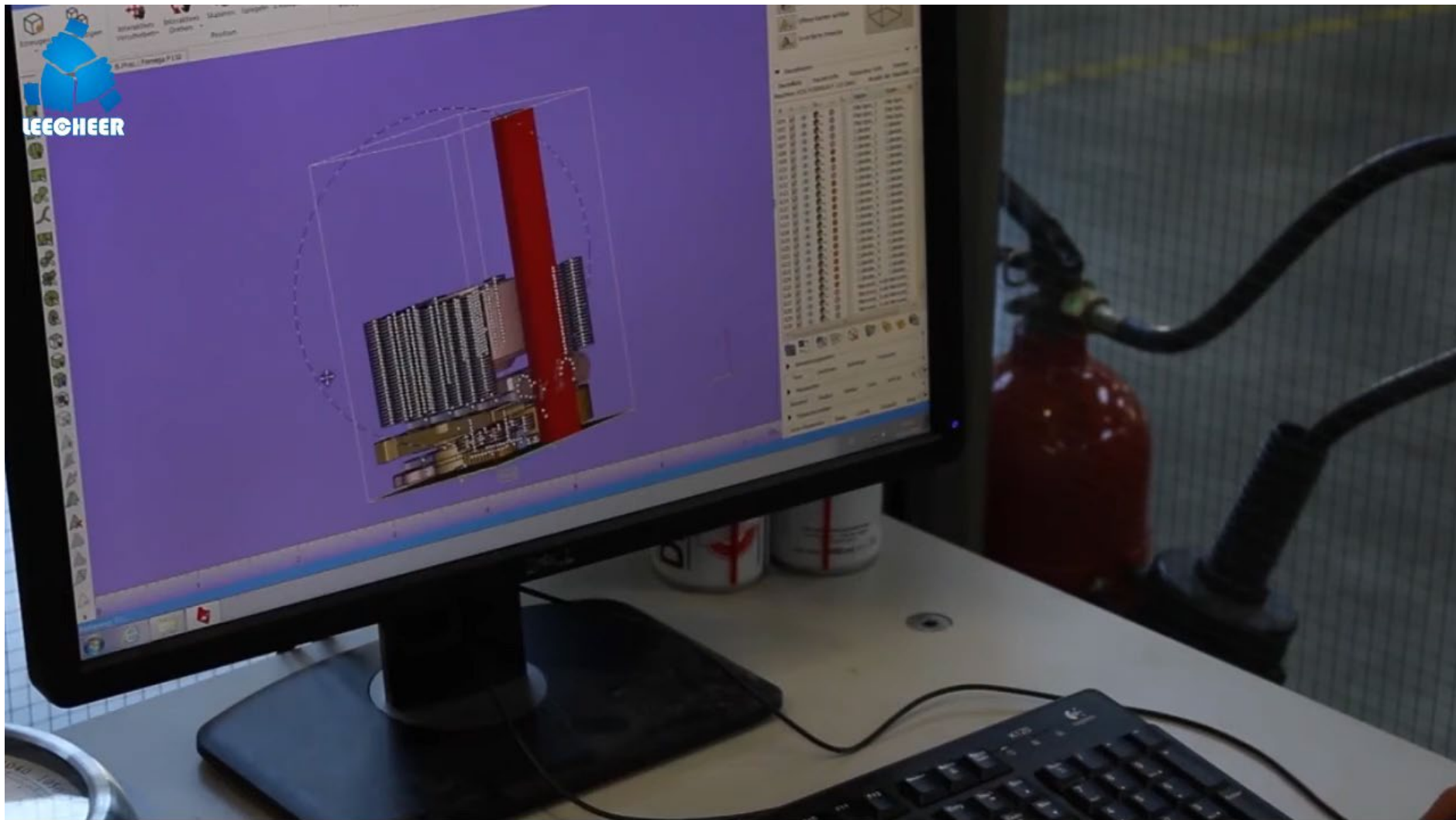
Debinding

Sintering

Metal part



Technika SLS (Selective Laser Sintering) – zasada działania

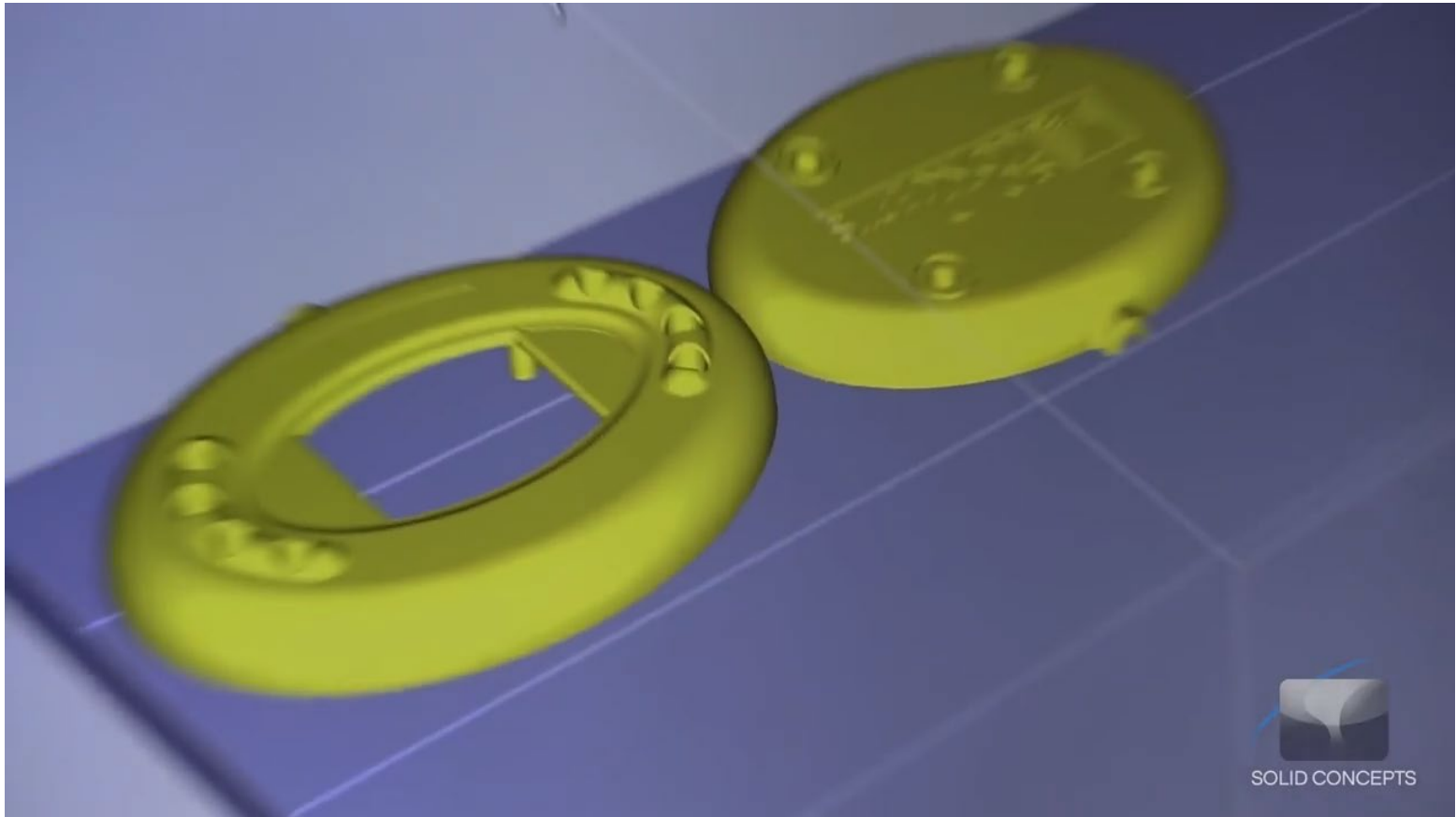


Technika SLS (Selective Laser Sintering) – przykład zastosowania



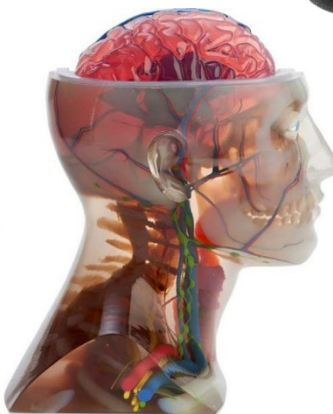
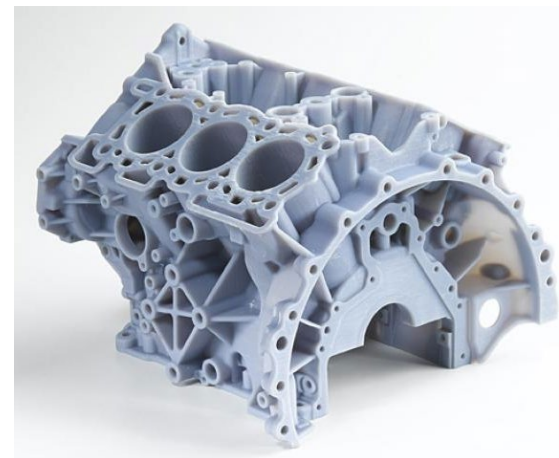
Polyjet - charakterystyka metody

Metoda Polyjet – polega na naprzemiennym nakładaniu przez układ dyszowy żywicy fotopolimerowej utwardzanej za pomocą światła UV



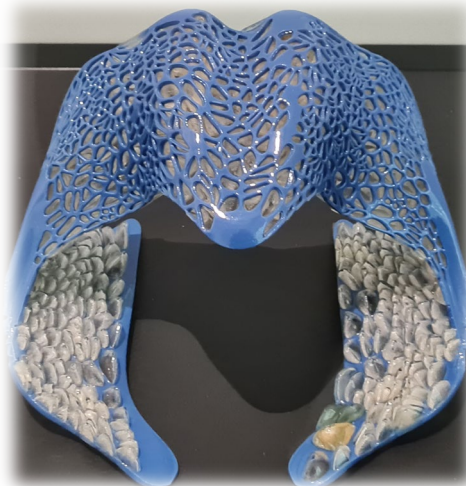
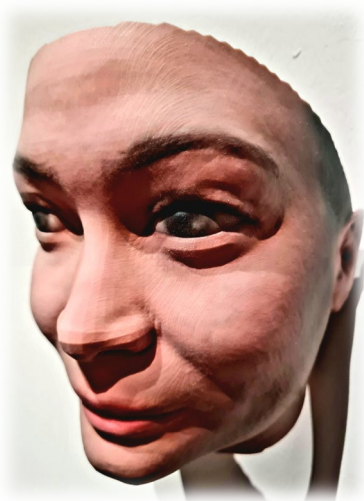
Polyjet - przykłady zastosowań

Metoda Polyjet – pozwala na stosowanie różnego rodzaju żywic o zróżnicowanej kolorystyce jak również właściwościach mechanicznych (twardość w skali Shore'a)



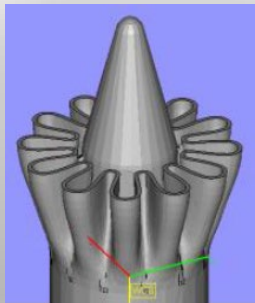
Polyjet - przykłady zastosowań

Ekspozycja sztuki nowoczesnej w Centrum Pompidou w Metz

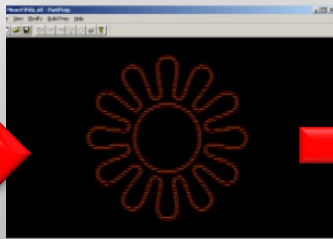


Laser Engineering Net Shaping System – przygotowanie procesu technologicznego

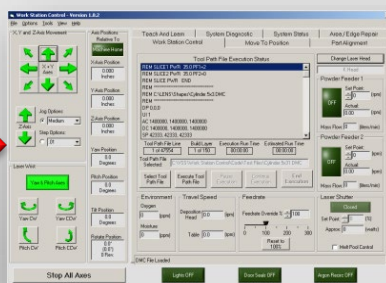
Design



Preparation of layered file



LENS software

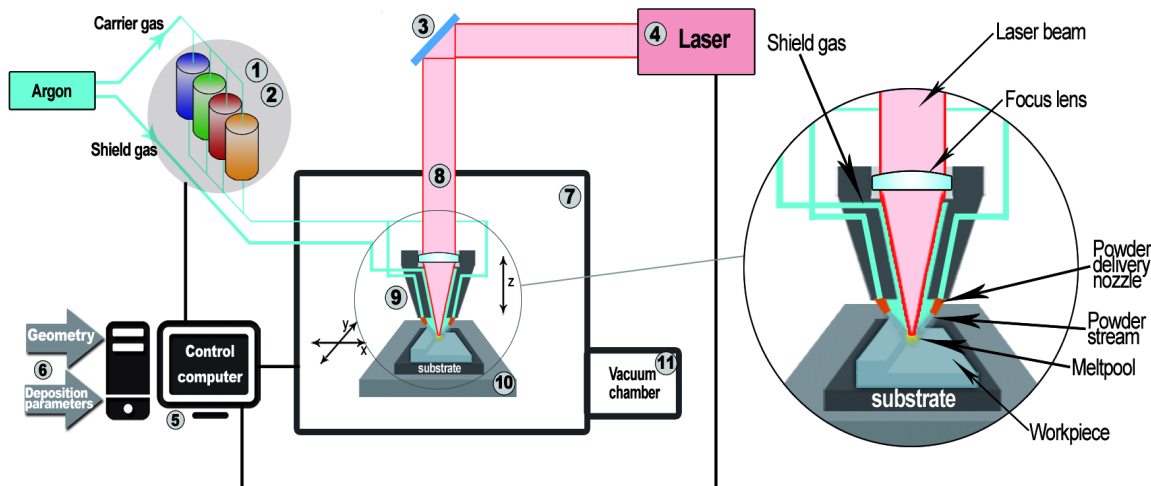


LENS control software

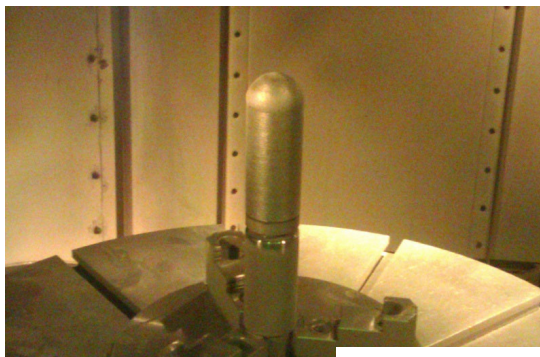
Manufactured element



LENS – zasada działa systemu



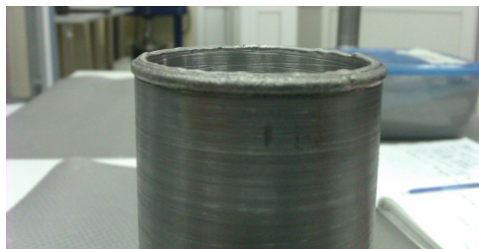
Laser Engineering Net Shaping System (LENS) – przykłady zastosowania



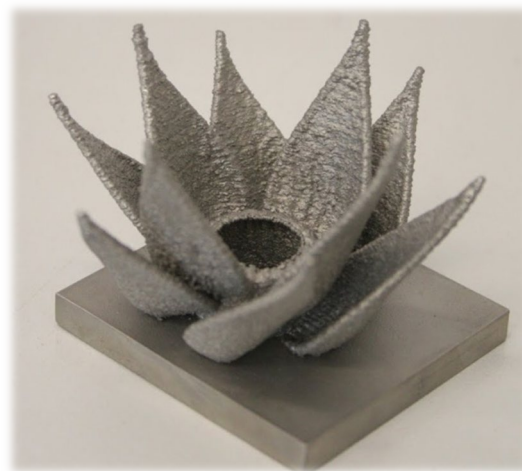
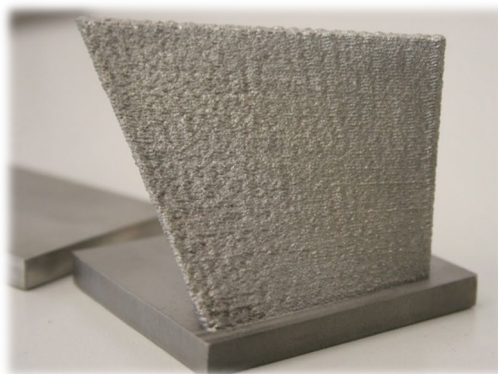
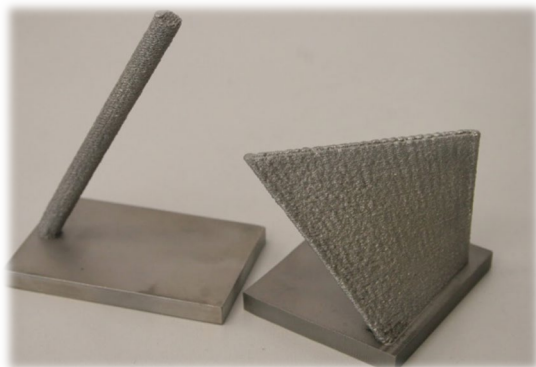
**Nanoszenie warstw
ochronnych**



Regeneracja części



Laser Engineering Net Shaping System (LENS) – przykłady zastosowania



Laser Engineering Net Shaping System (LENS) – przykłady zastosowania

Przykłady zastosowania techniki LENS w procesie naprawy i wytwarzania elementów konstrukcyjnych sprzętu wojskowego



Working Dimensions

- ❑ Industry leading Laser Head Travel: "X": 1500mm, "Y": 1500mm, "Z": 2100mm
- ❑ Laser Work Envelope: 4.725 cubic meters
- ❑ Motion controlled to +/- 0.025mm

Laser Engineering Net Shaping System (LENS) – przykłady zastosowania

Przykłady zastosowania techniki LENS w procesie naprawy i wytwarzania elementów konstrukcyjnych sprzętu wojskowego

Standard Heads



Coaxial Nozzle



4 powder feed
nozzle



Off angle nozzle

Deep Repair Head for internal LMD

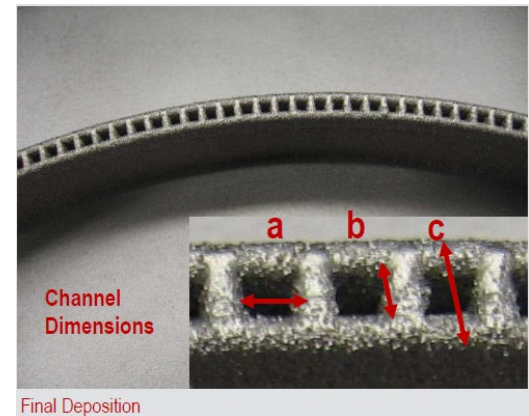
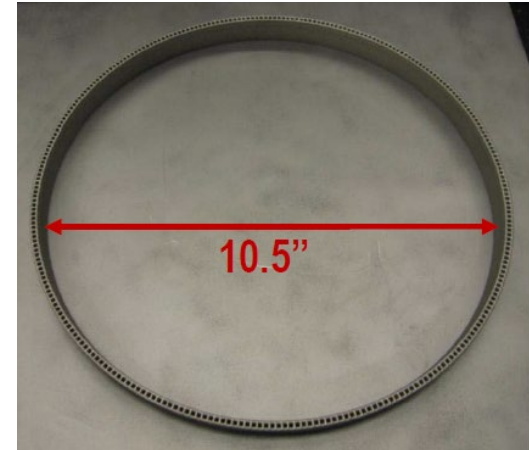
- Industrially hardened 3 shift production capable
- Water cooled, can deliver up to 3KW power
- Integrated powder feed and inert gas delivery
- Reach 1000 mm, Min Bore dia. 57mm
- Longer reach/smaller bore dia. possible, special order



Standard Chamber and Parts Handling

Przykłady zastosowania techniki LENS w procesie naprawy i wytwarzania elementów konstrukcyjnych sprzętu wojskowego

- IN 625 LMD free form; 341 hours continuous build time; 7000 layers; **handbook properties**; 822x546x2108 mm
- NO OTHER LMD OEM/USER EXCEPT RPMI/EFESTO HAS TO DATE BUILT PARTS CLOSE TO THIS SIZE**



Final Deposition

- IN625 Freeform Dual Wall Cooling Channel
- $a = 0.065''$ $b = 0.065''$ $c = 0.180''$
- Approximately 0.06" Wall Thickness



Multi Axis LMD process in continuous real-time

Free Form Manufacturing



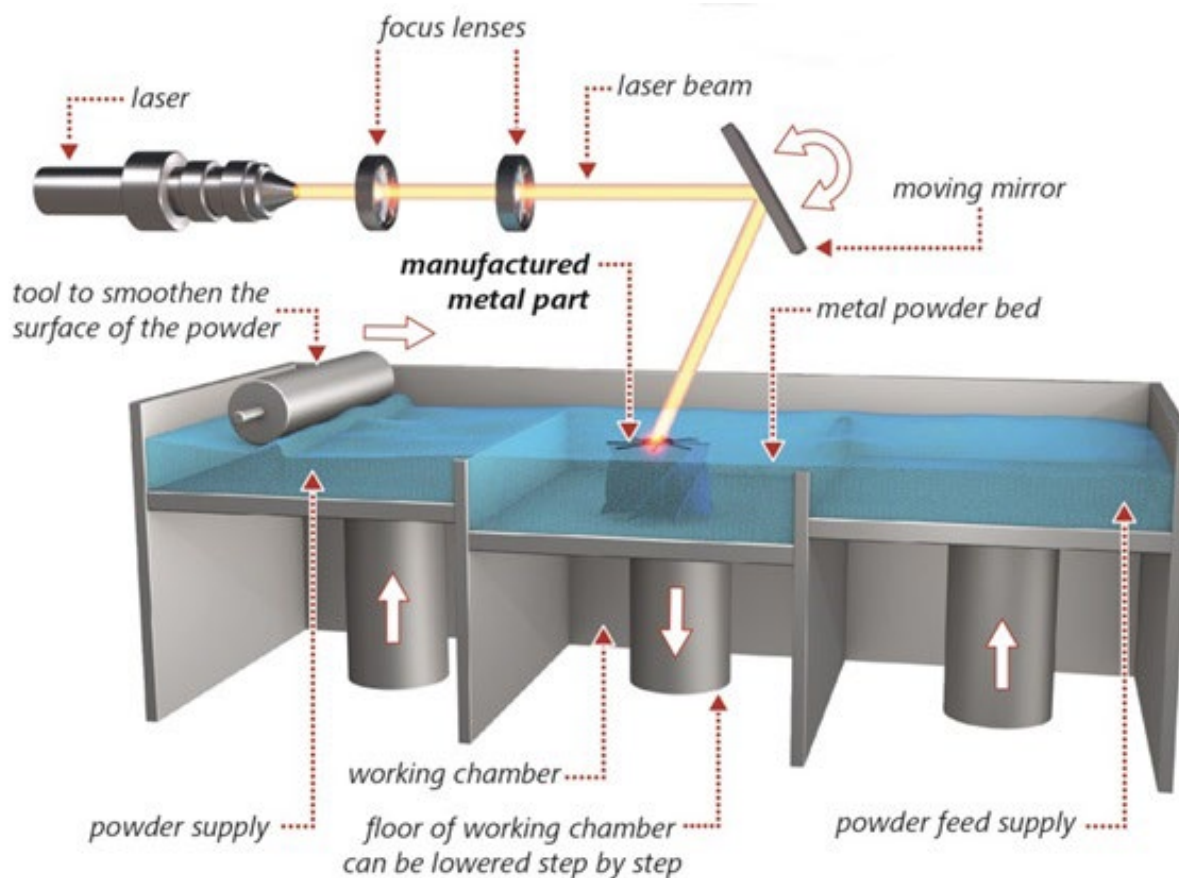
- 4000 layers
- 16 hours
- 2mm wall

Finished Part

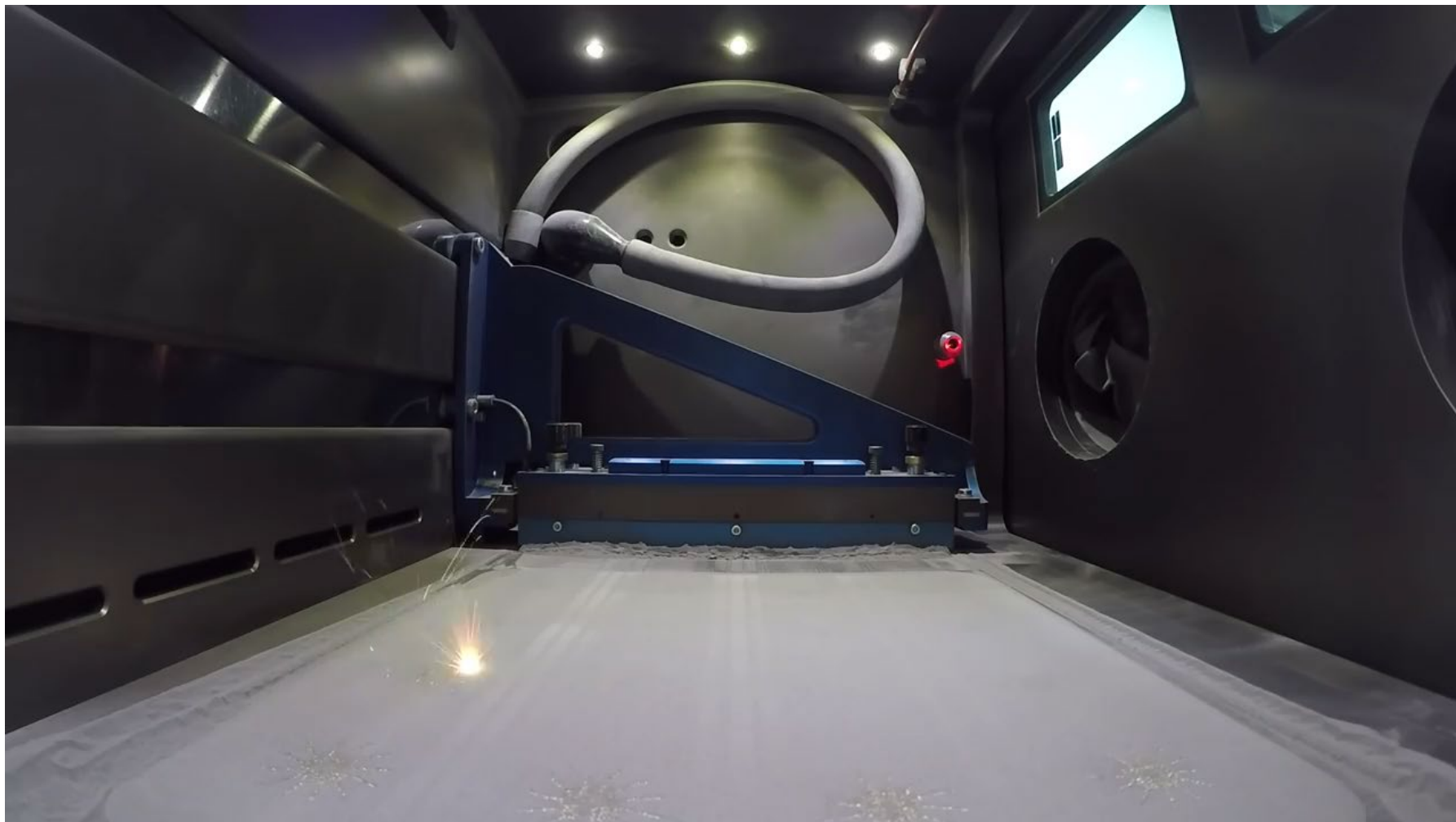


Selective Laser Melting/ Direct Metal Laser Sintering (SLM/DMLS) – charakterystyka metody

SLM/DMLS – są to tzw. metody Powder Bed Fusion. Proces powstawania obiektu realizowany jest z wykorzystaniem złoża proszkowego, którego ziarna proszku są ze sobą spajane poprzez spiekanie lub przetapianie.



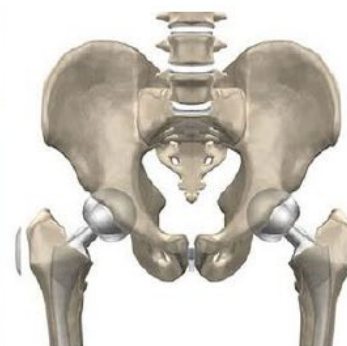
Selective Laser Melting/ Direct Metal Laser Sintering (SLM/DMLS) – charakterystyka metody



Selective Laser Melting/ Direct Metal Laser Sintering (SLM/DMLS) – przykłady zastosowań



Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

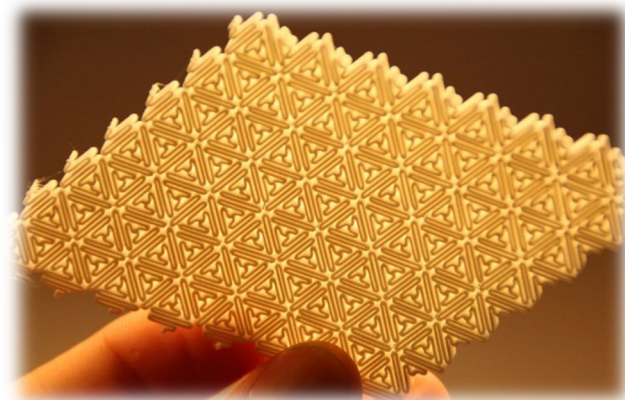




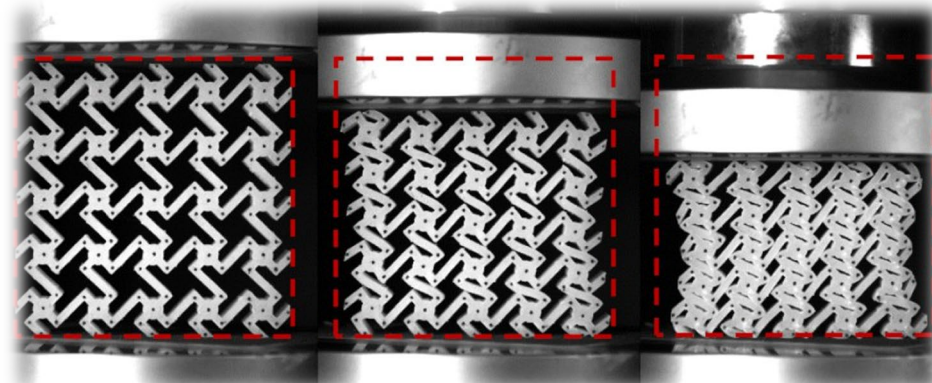
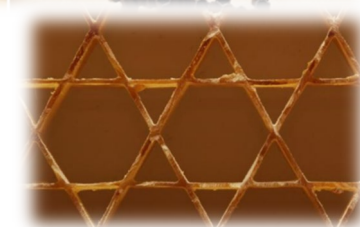
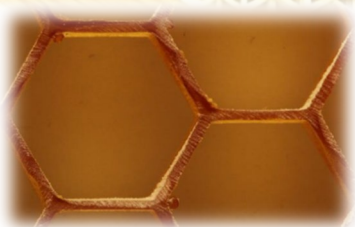
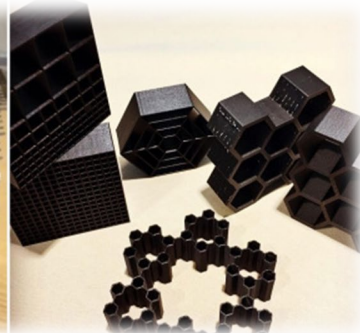
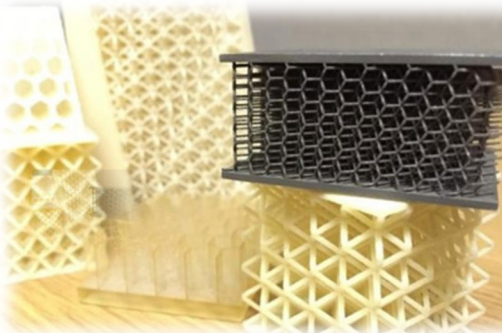
Nowe wyzwania i perspektywy

Struktury energochłonne wytwarzane metodami addytywnymi

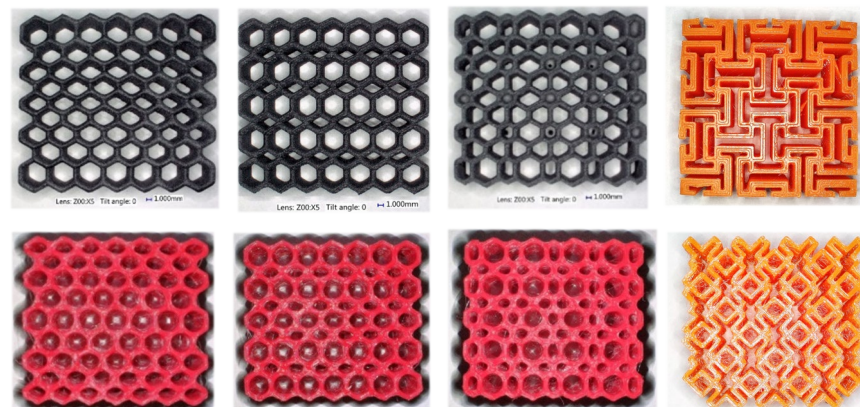
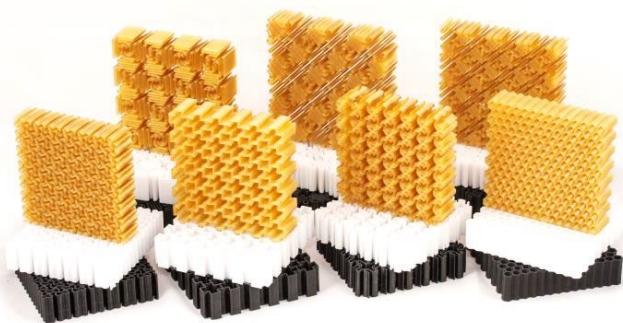
Rozwój w zakresie inżynierii materiałowej oraz obecny potencjał addytywnych metod wytwarzania spowodowały wzrost zainteresowania materiałami konstrukcyjnymi o budowie komórkowej regularnej.



Materiały komórkowe typu 2D oraz 3D

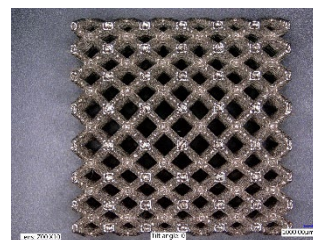
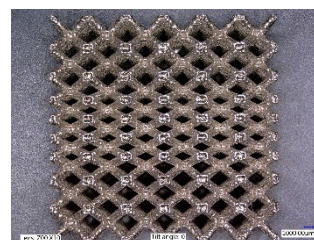
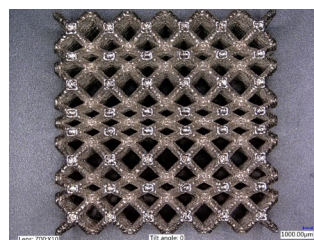
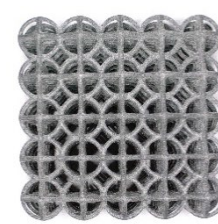
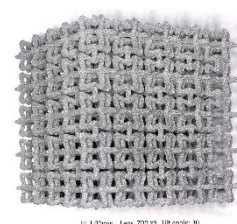
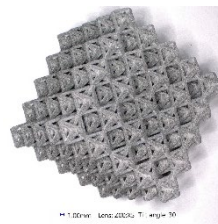
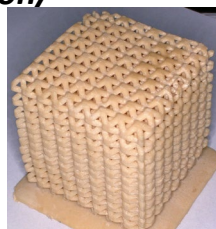
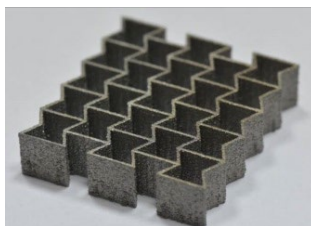
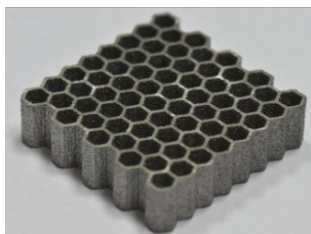


Struktury energochłonne wytwarzane metodami addytywnymi



Różnorodne struktury typu 2D oraz 3D

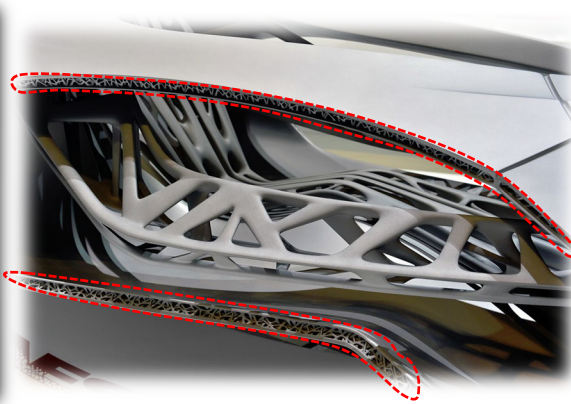
***Fused Deposition Modeling/ Fused Filament Fabrication/
Selective Laser Sintering***



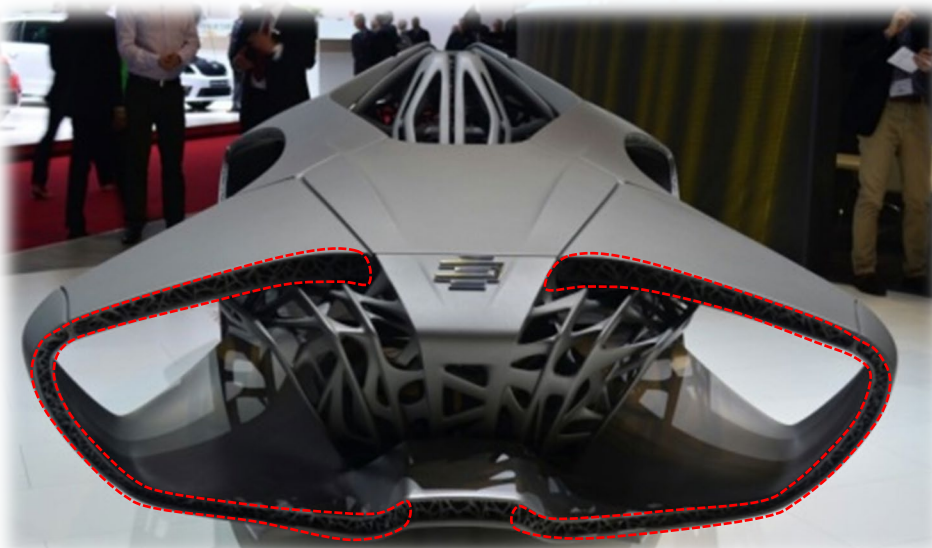
Struktury metaliczne (2D i 3D)

wykonane ze stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali nierdzewnej 316L

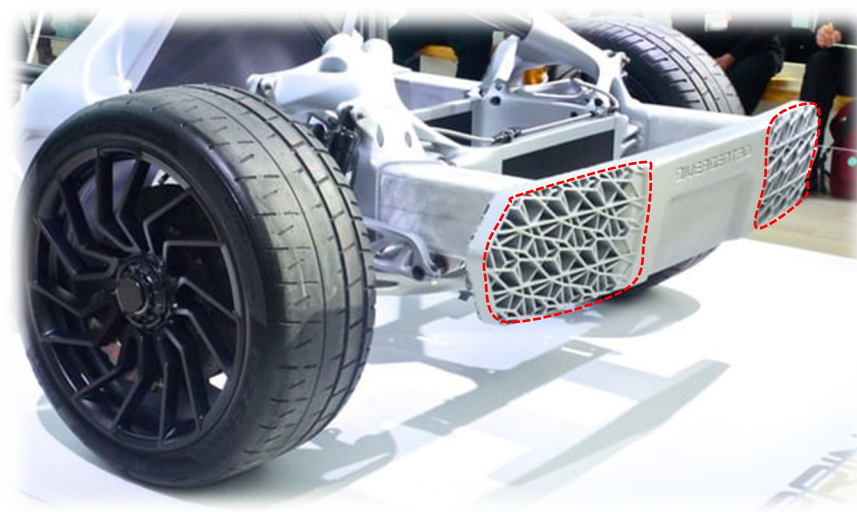
Przemysł motoryzacyjny



Tłok silnika
[www.wardsauto.com]



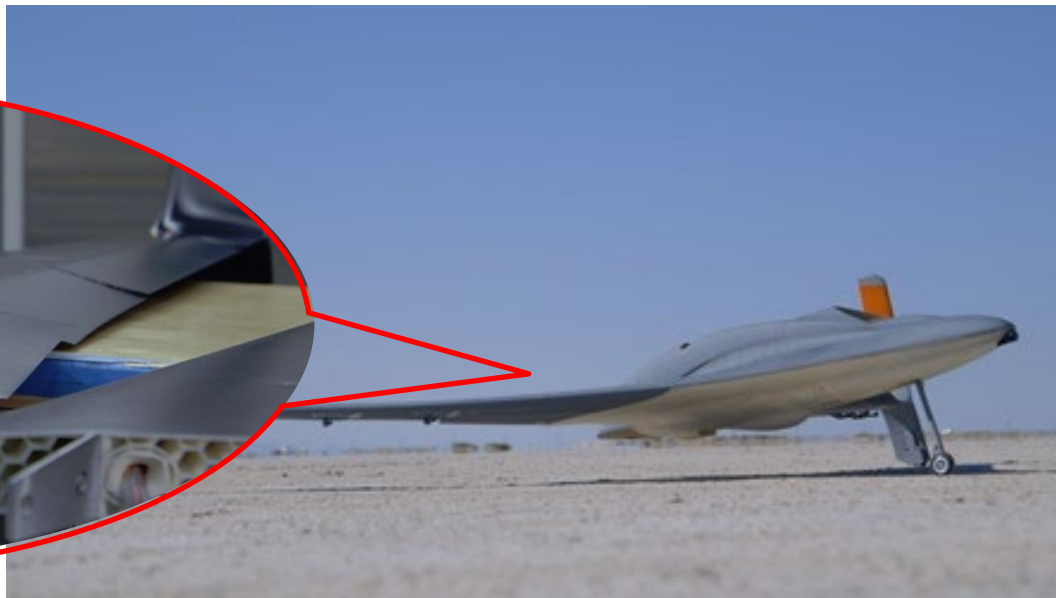
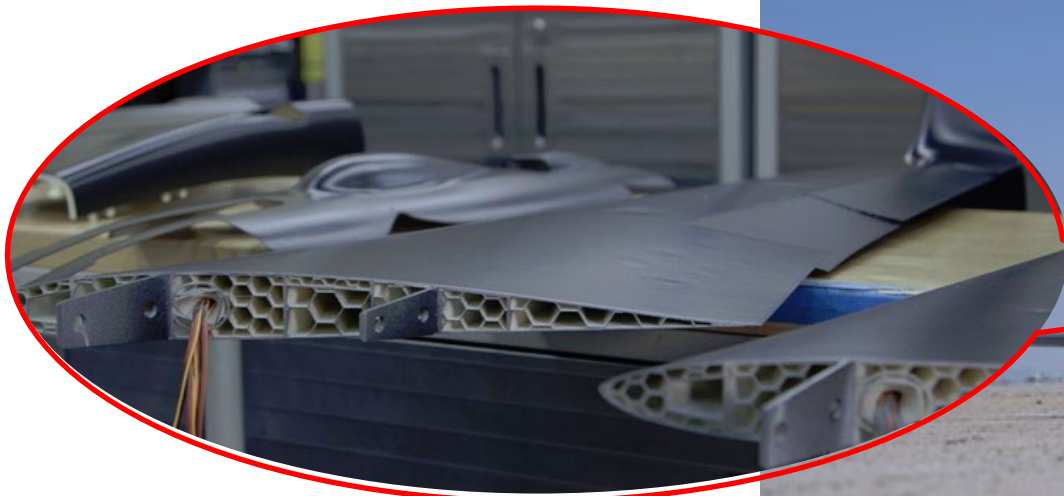
EADAG - nadwozie wykonane techniką AM
(Geneva Motor Show 2014)



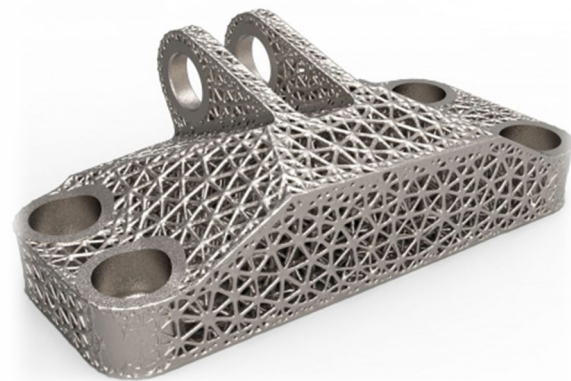
Divergent Blade 3D

Struktury energochłonne wytwarzane metodami addytywnymi

Przemysł lotniczy

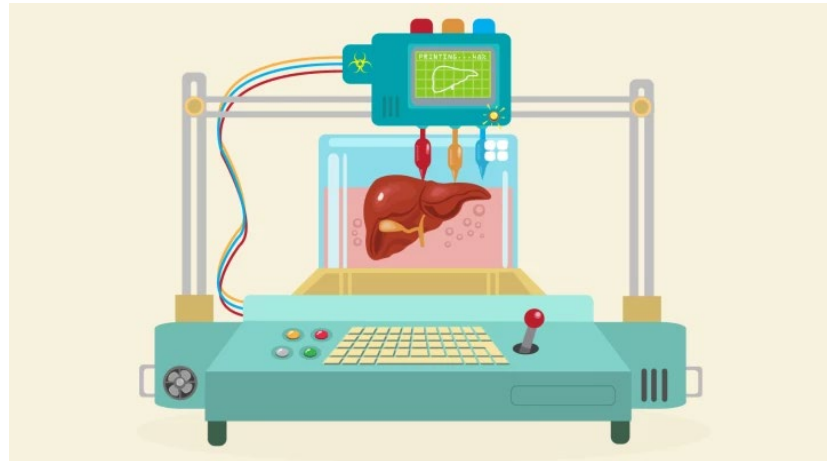
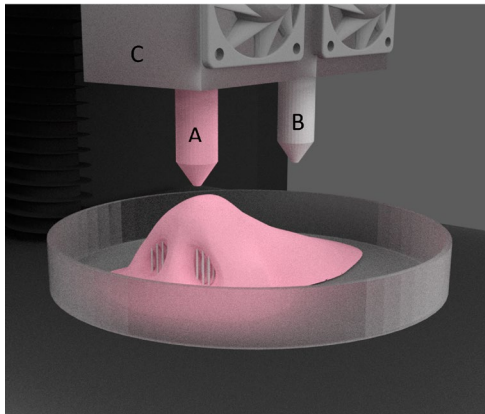
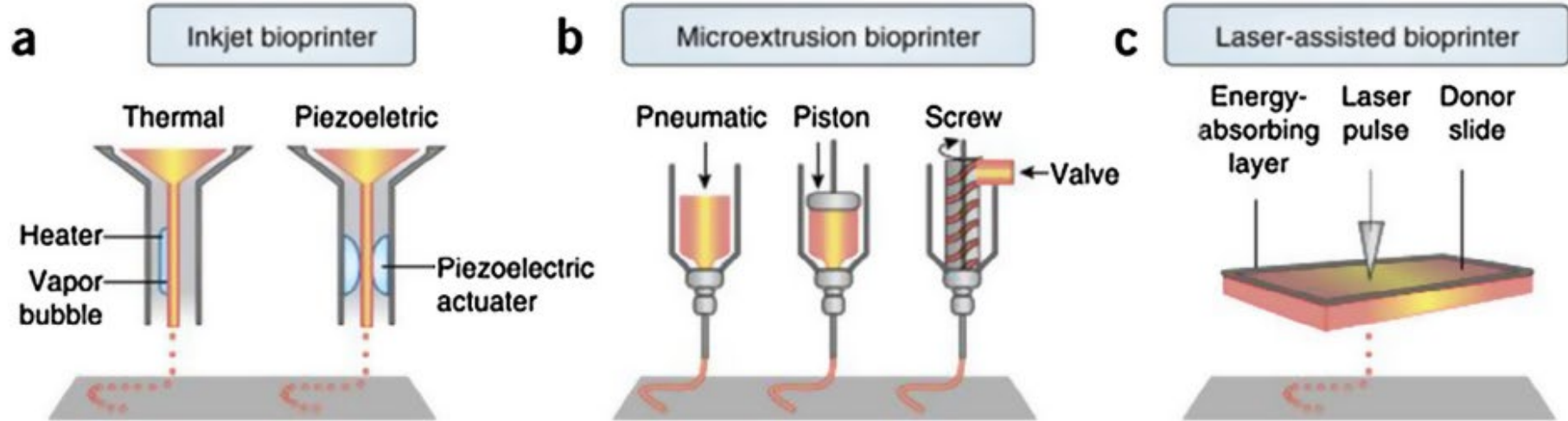


Bezpilotowy statek powietrzny Aurora Flight Sciences wykonany w 80% techniką druku 3D
(www.stratasys.com)

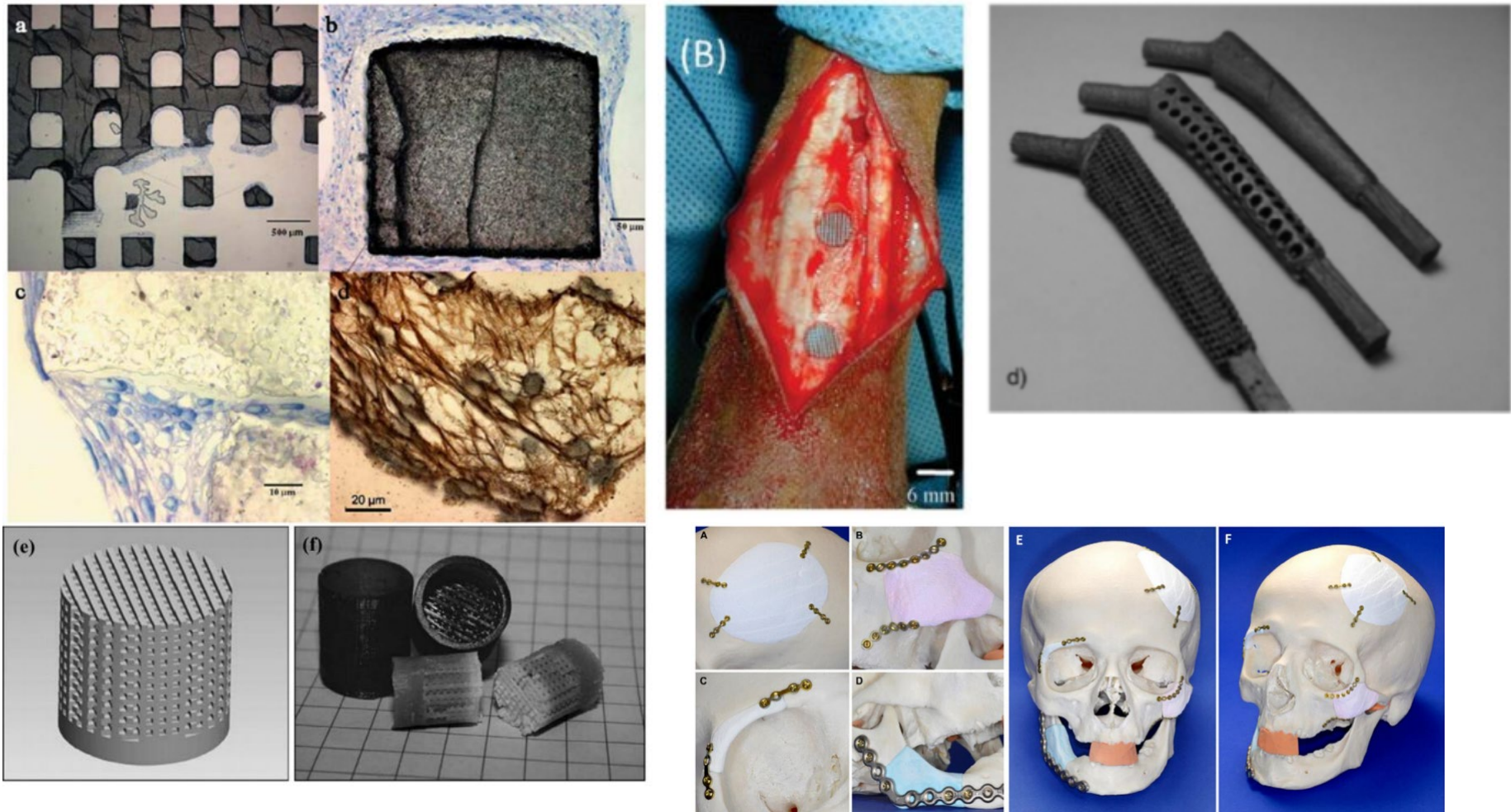


Optymalizacja masy części mechanicznych poprzez zastosowanie budowy komórkowej⁴⁷

Biomateriały



Biomateriały



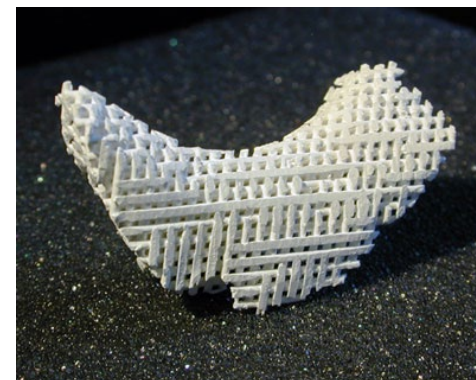
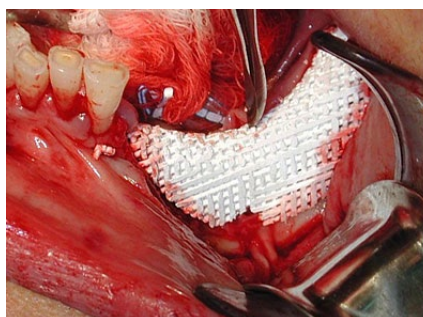
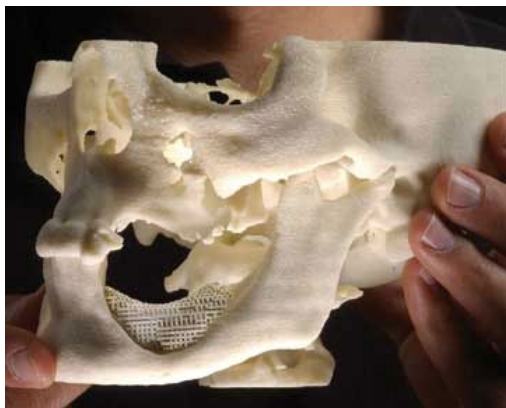
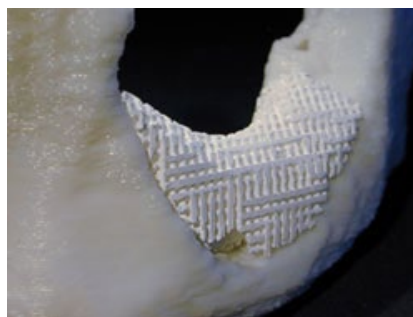
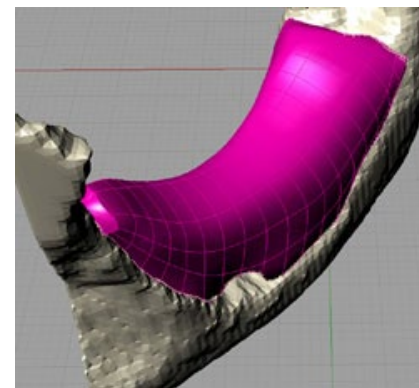
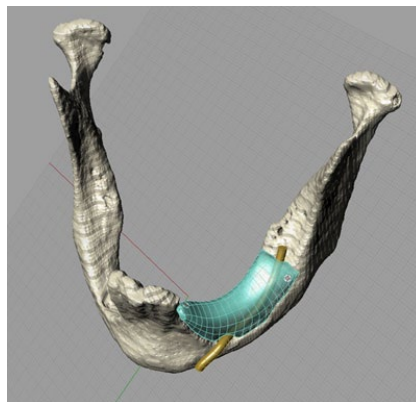
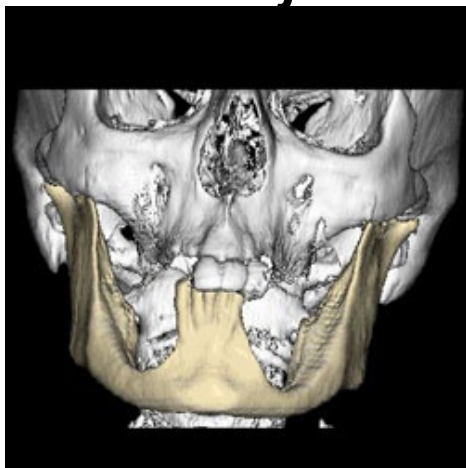
Zastosowanie Przyrostowych Technik wytwarzania w medycynie

Szablony chirurgiczne

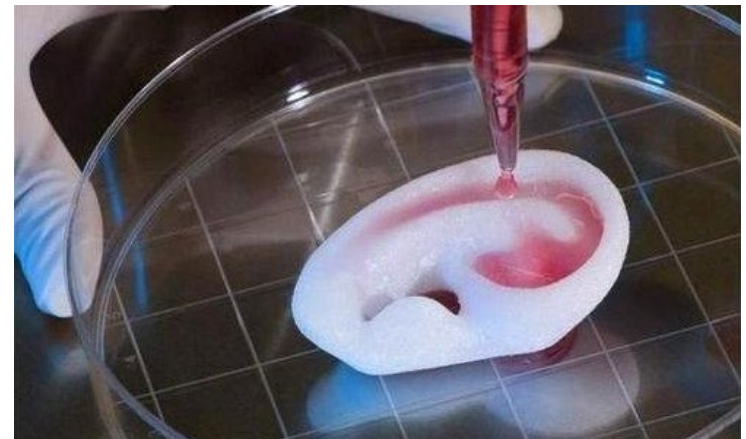
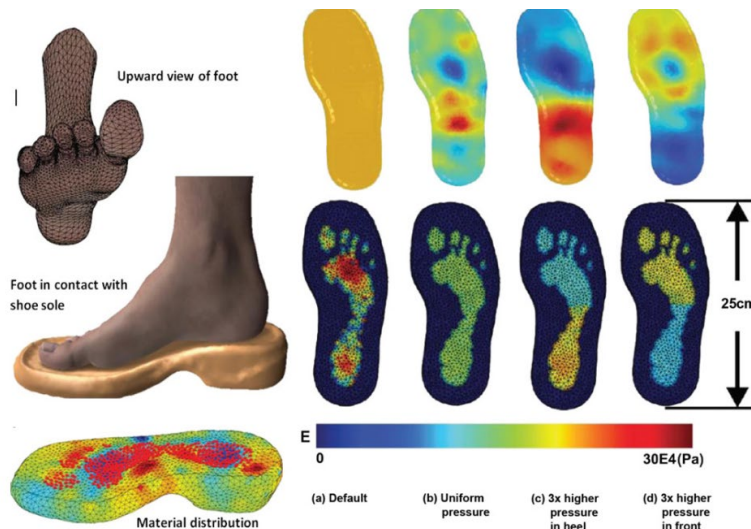
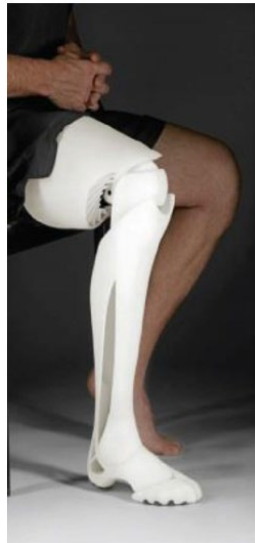
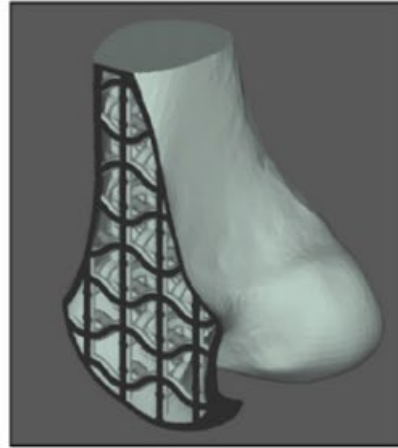
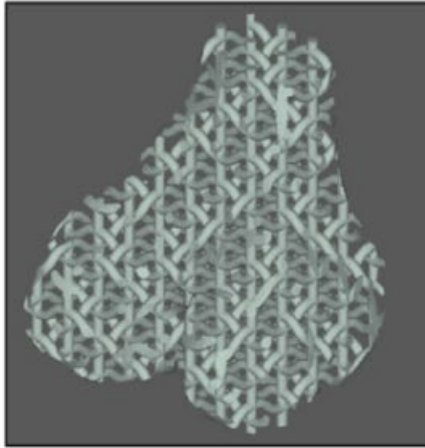
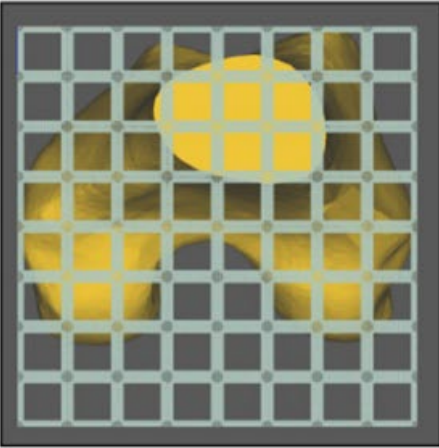


Zastosowanie Przyrostowych Technik wytwarzania w medycynie

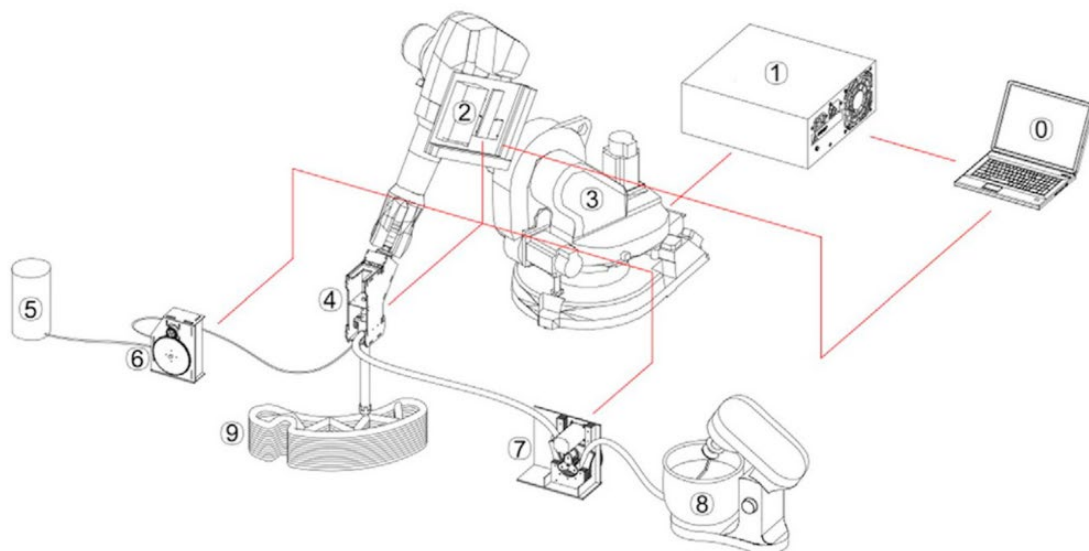
Rekonstrukcje



Produkcja spersonalizowanych protez oraz implantów



Zastosowanie Przyrostowych Technik Wytwarzania w budownictwie





Zastosowanie Przyrostowych Technik Wytwarzania w budownictwie



Przyszłe kierunki rozwoju w obszarze AM



3D Printed Rockets: Efficient, Custom Manufacturing for the Modern Age

Development of 3D printers



**X- 455, Y- 455, Z- 1100 mm³,
laser system with 2*500 W fiber lasers**



Application of the topology optimisation

Metal Additive Manufacturing



New metallic alloys powders

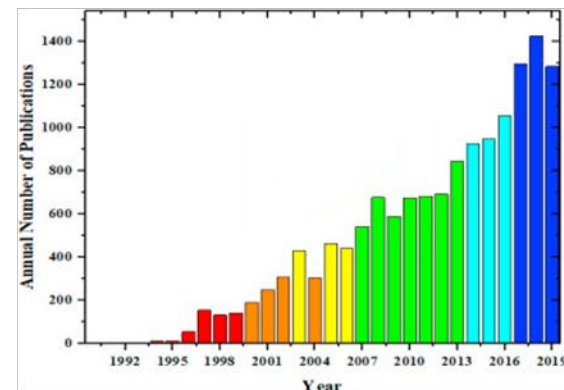
advanced and high applicable materials:

- *stainless steels,*
- *nickel-based,*
- *superalloys,*
- *titanium-based alloys,*
- *metal matrix composites (MMCs).*



**A magnesium part produced via
additive casting (Ventana)**

Composite & functional gradient materials



Przyszłe kierunki rozwoju w obszarze AM

Micro 3D printing – or more precisely, microscale additive manufacturing – is fueling a new miniaturization revolution in everything from microchips to medical devices

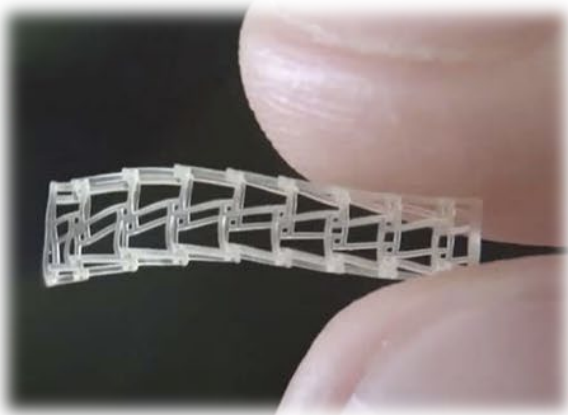


<https://all3dp.com/1/micro-3d-printing-guide/>

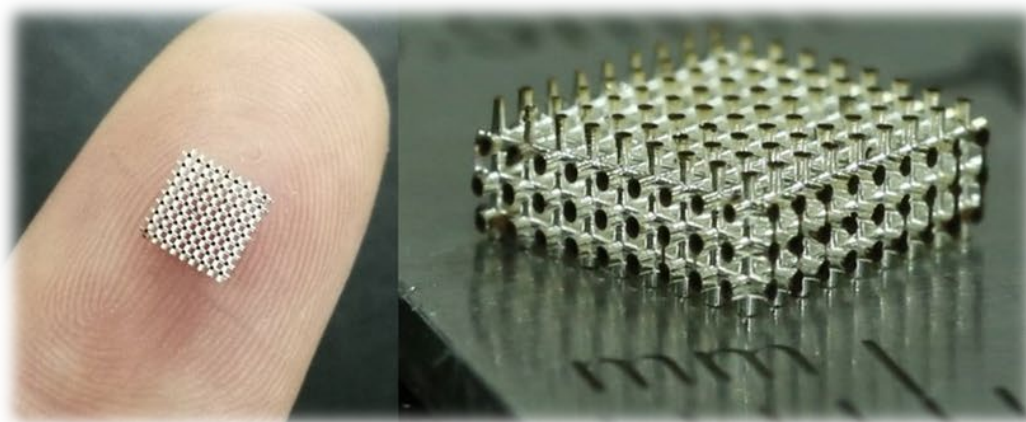
Przyszłe kierunki rozwoju w obszarze AM



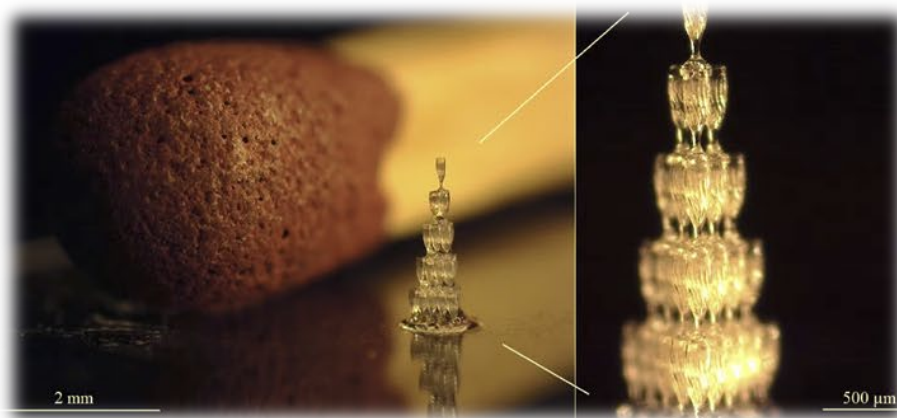
Microscale 3D printed part to demonstrate the capabilities of the Fabrica 2.0 Machine 3D printer



Micro 3D printed parts from Boston Micro Fabrication (<https://all3dp.com/1/micro-3d-printing-guide/>)



3D printing of metallic microstructures. Feature sizes: ~ 10 to $\sim 200 \mu\text{m}$. Surface roughness: $\sim 20 \text{ nm}$ (<http://xxl.ecnu.edu.cn/swjs/main.psp>)



Each Champagne flute in this tower is 400 microns tall and printed with TPP by Microlight3D



Dziękuję za uwagę