



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



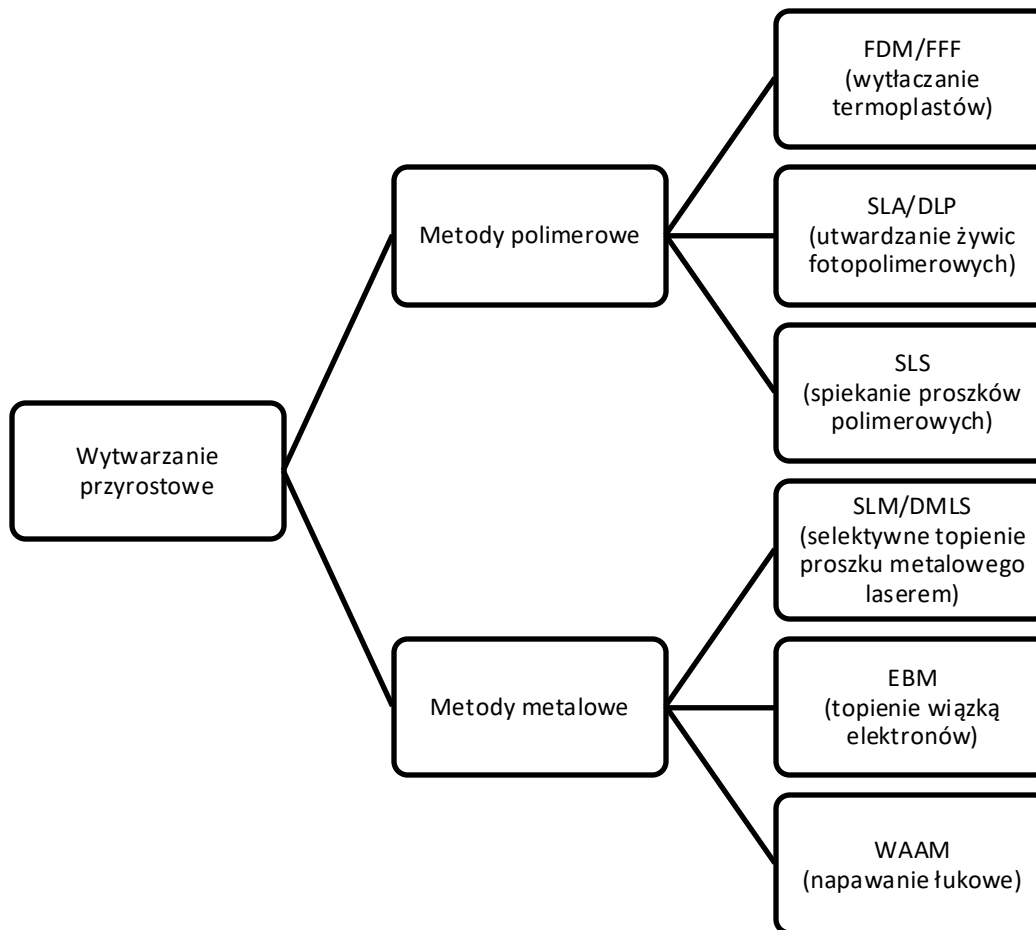
**WYDZIAŁ  
BUDOWY MASZYN  
I LOTNICTWA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

# Projektowanie elementów wytwarzanych przyrostowo

dr inż. Michał Batsch

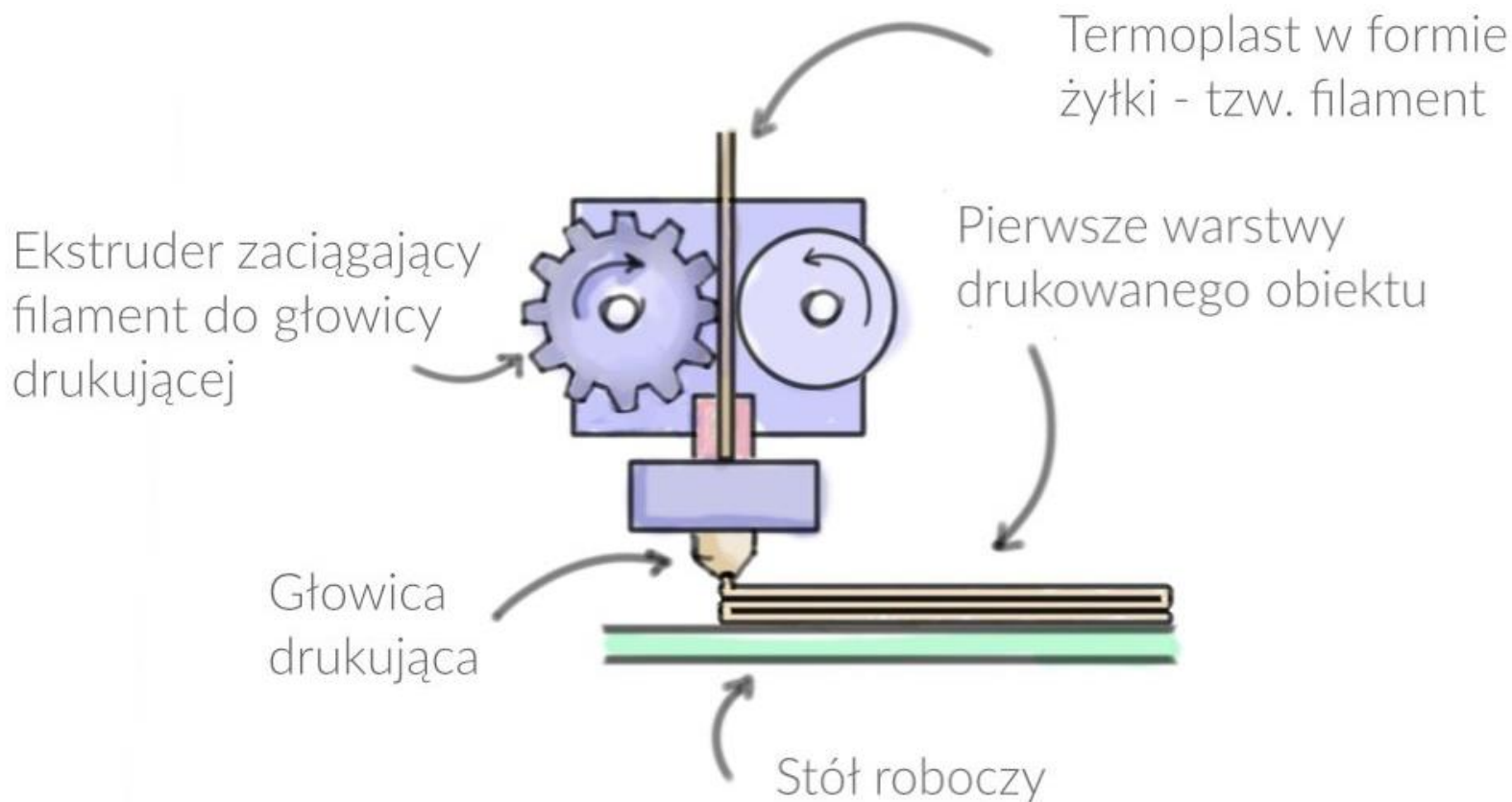
# Przegląd metod wytwarzania przyrostowego

Wytwarzanie przyrostowe to proces budowania trójwymiarowych obiektów na podstawie modelu cyfrowego (CAD) poprzez nakładanie materiału warstwa po warstwie. W przeciwieństwie do metod ubytkowych (np. frezowanie), minimalizuje odpady i pozwala na tworzenie niemal dowolnie złożonych geometrii wewnętrznych.



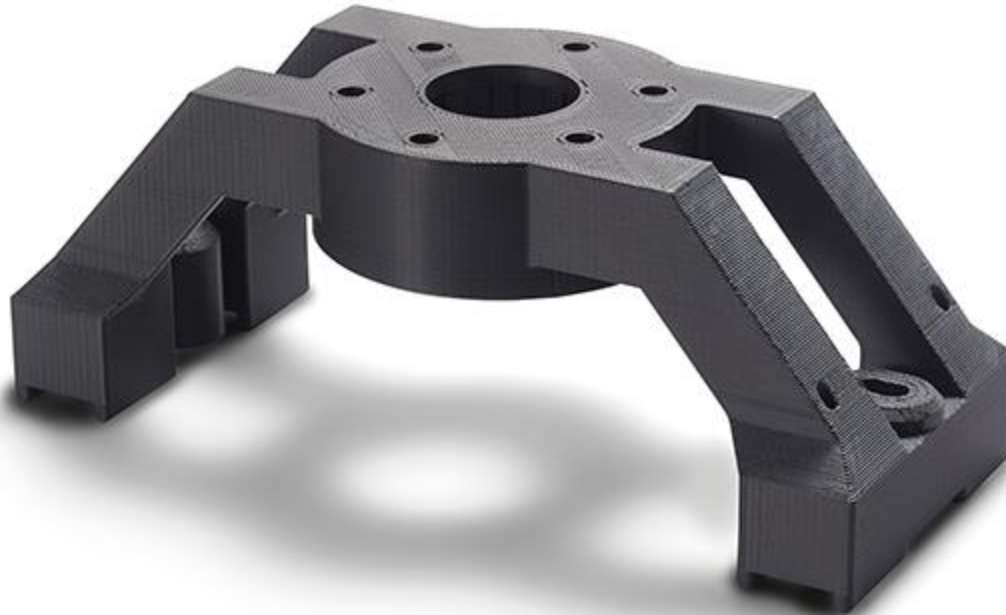
# FDM/FFF (Fused Deposition Modeling):

Termoplastyczny drut (filament) jest roztapiany w głowicy i wyciskany przez dyszę, rysując kształt warstwy.



# FDM/FFF (Fused Deposition Modeling):

Termoplastyczny drut (filament) jest roztapiany w głowicy i wyciskany przez dyszę, rysując kształt warstwy.

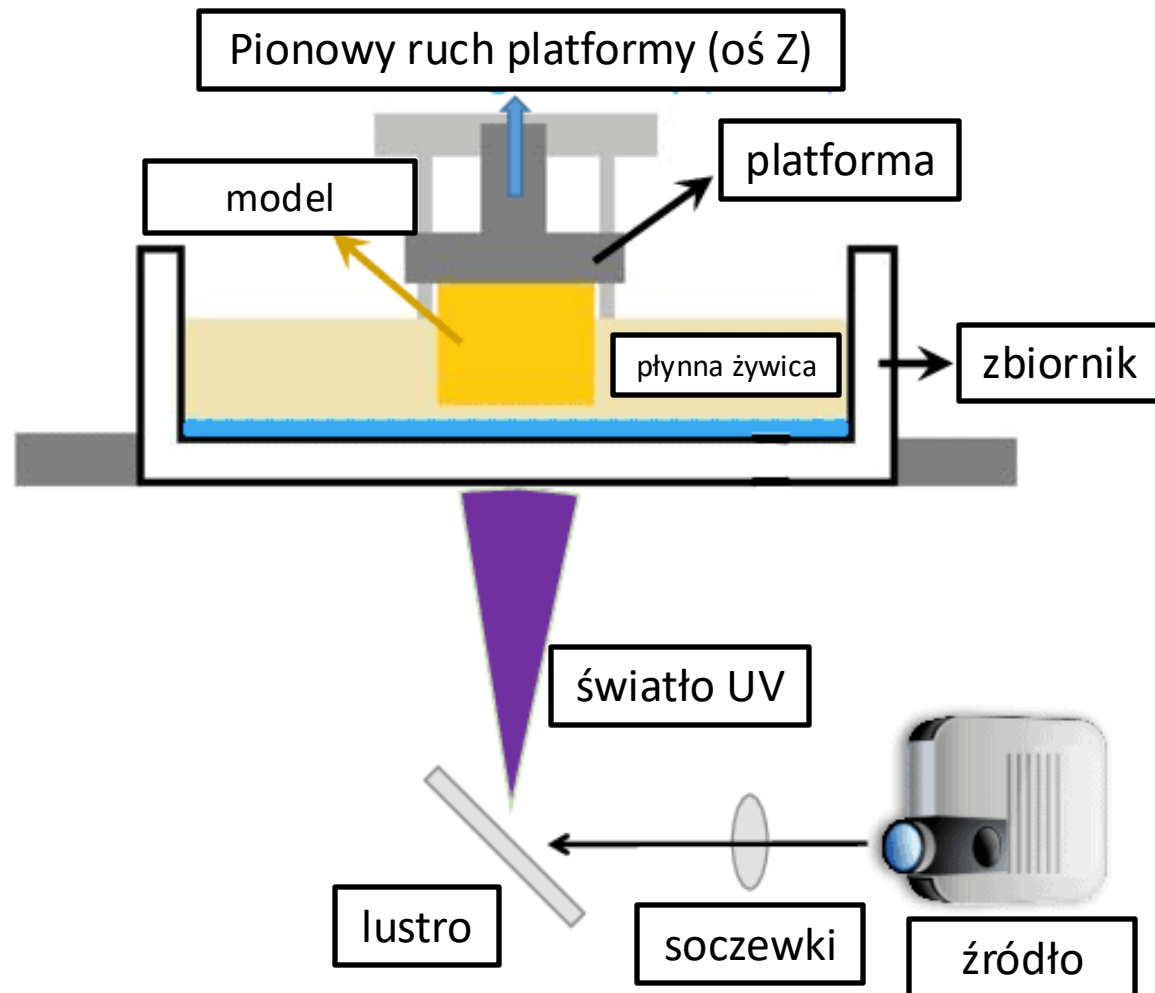


# SLA(Stereolitografia) i DLP (Digital Light Processing)

Metody **SLA** i **DLP** należą do rodziny technologii **Vat Photopolymerization**. Ich cechą wspólną jest wykorzystanie płynnej żywicy fotopolimerowej, która twardnieje pod wpływem światła o konkretnej długości fali (zazwyczaj UV).

**SLA** - źródłem światła jest laser. Lustra kierują punkt lasera na powierzchnię żywicy, „rysując” kształt warstwy punkt po punkcie.

**DLP** – źródłem światła jest projektor cyfrowy (ekran z matrycą mikroluster). Projektor wyświetla od razu cały obraz warstwy (jako maskę świetlną) na dnie zbiornika z żywicą. Cała warstwa utwardzana jest w tym samym momencie.



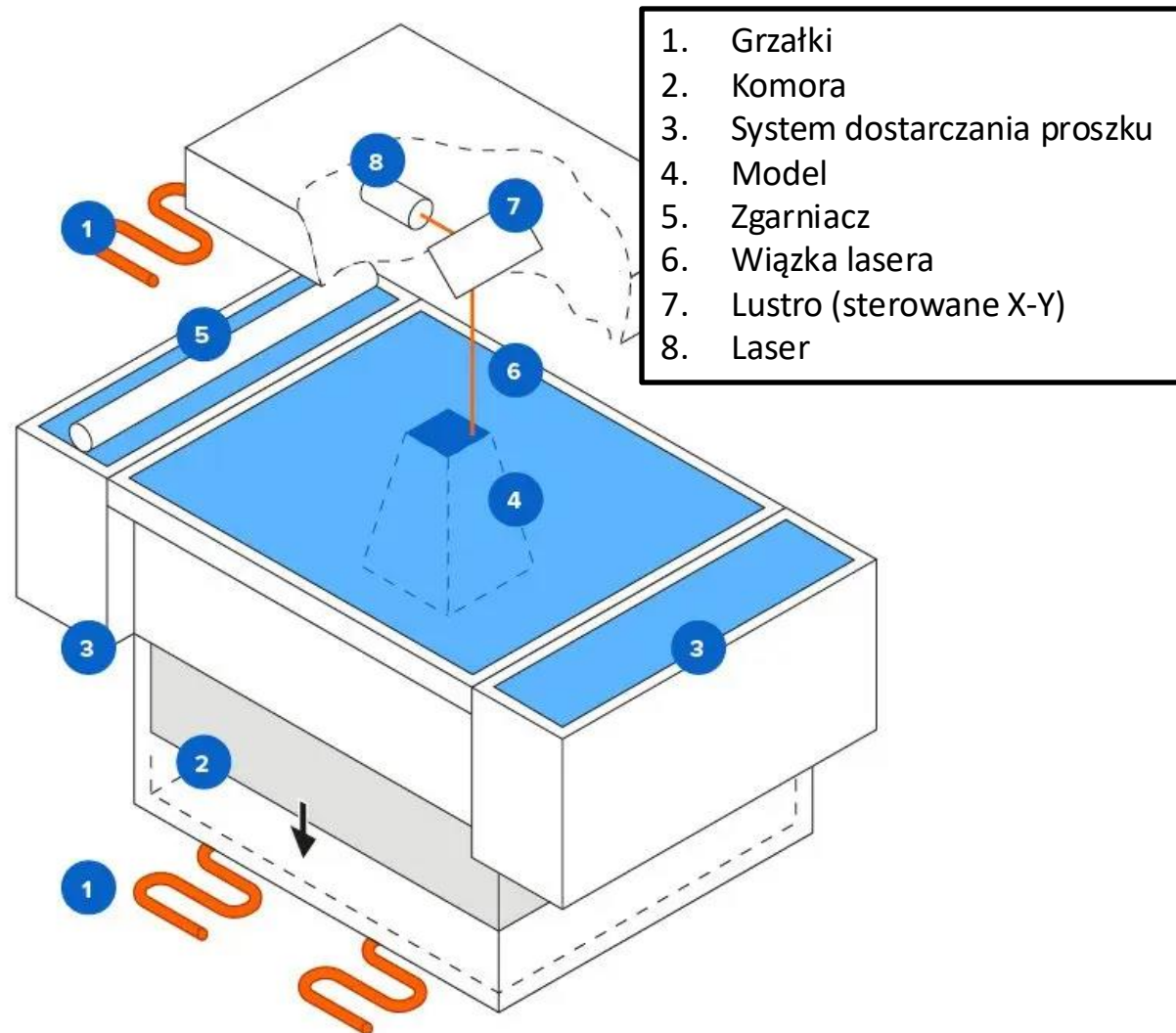
# SLA(Stereolitografia) i DLP (Digital Light Processing)

Metody **SLA** i **DLP** należą do rodziny technologii **Vat Photopolymerization**. Ich cechą wspólną jest wykorzystanie płynnej żywicy ftopolimerowej, która twardnieje pod wpływem światła o konkretnej długości fali (zazwyczaj UV).



# SLS (Selektywne Spiekanie Laserowe)

Metoda ta polega na warstwowym spajaniu sproszkowanych tworzyw sztucznych za pomocą wiązki lasera.



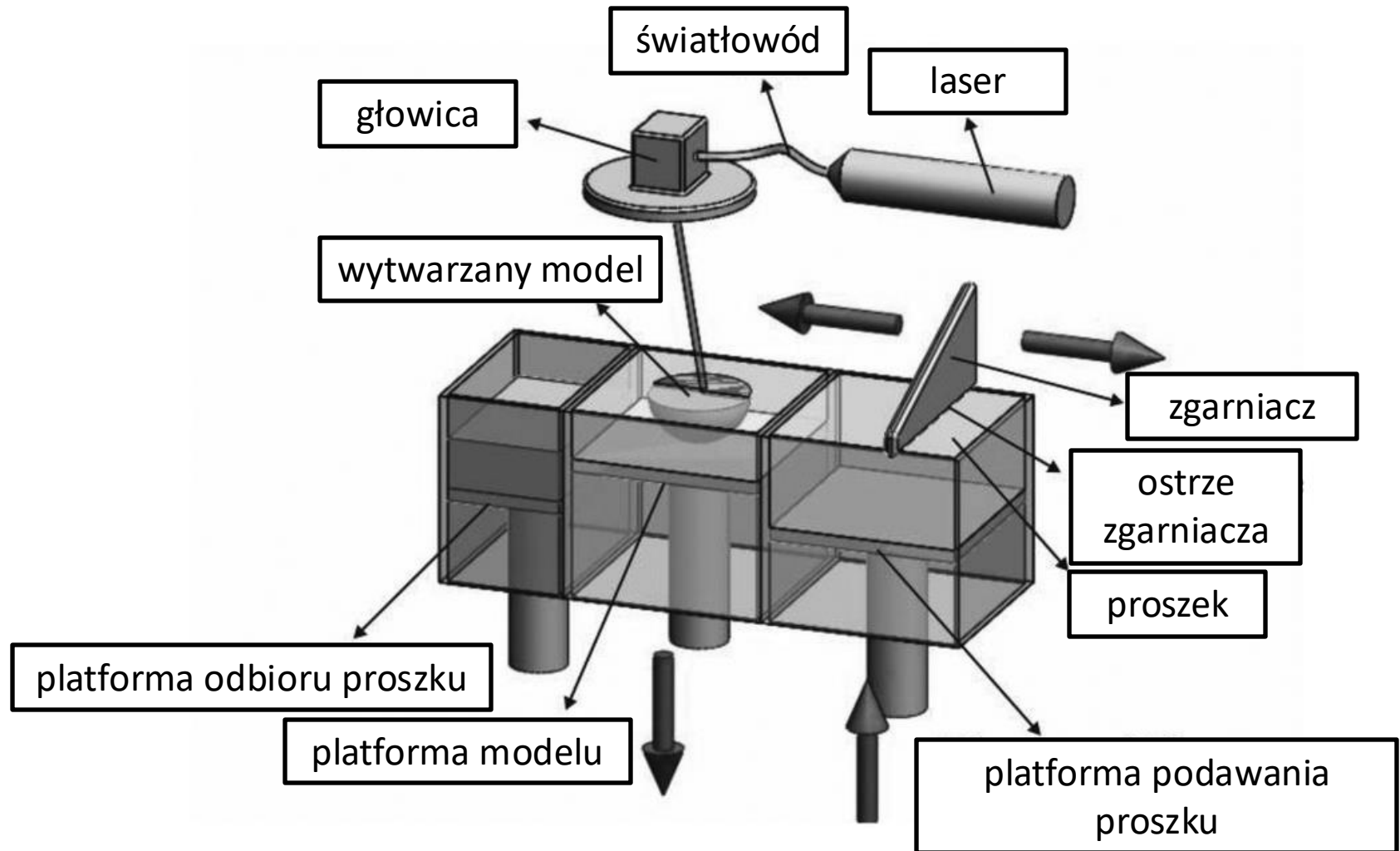
# SLS (Selektywne Spiekanie Laserowe)

Metoda ta polega na warstwowym spajaniu sproszkowanych tworzyw sztucznych za pomocą wiązki lasera.



# SLM (Selective Laser Melting) i DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Metoda ta polega na warstwowym spiekaniu proszków metali za pomocą wiązki lasera. Proces odbywa się w osłonie gazu.



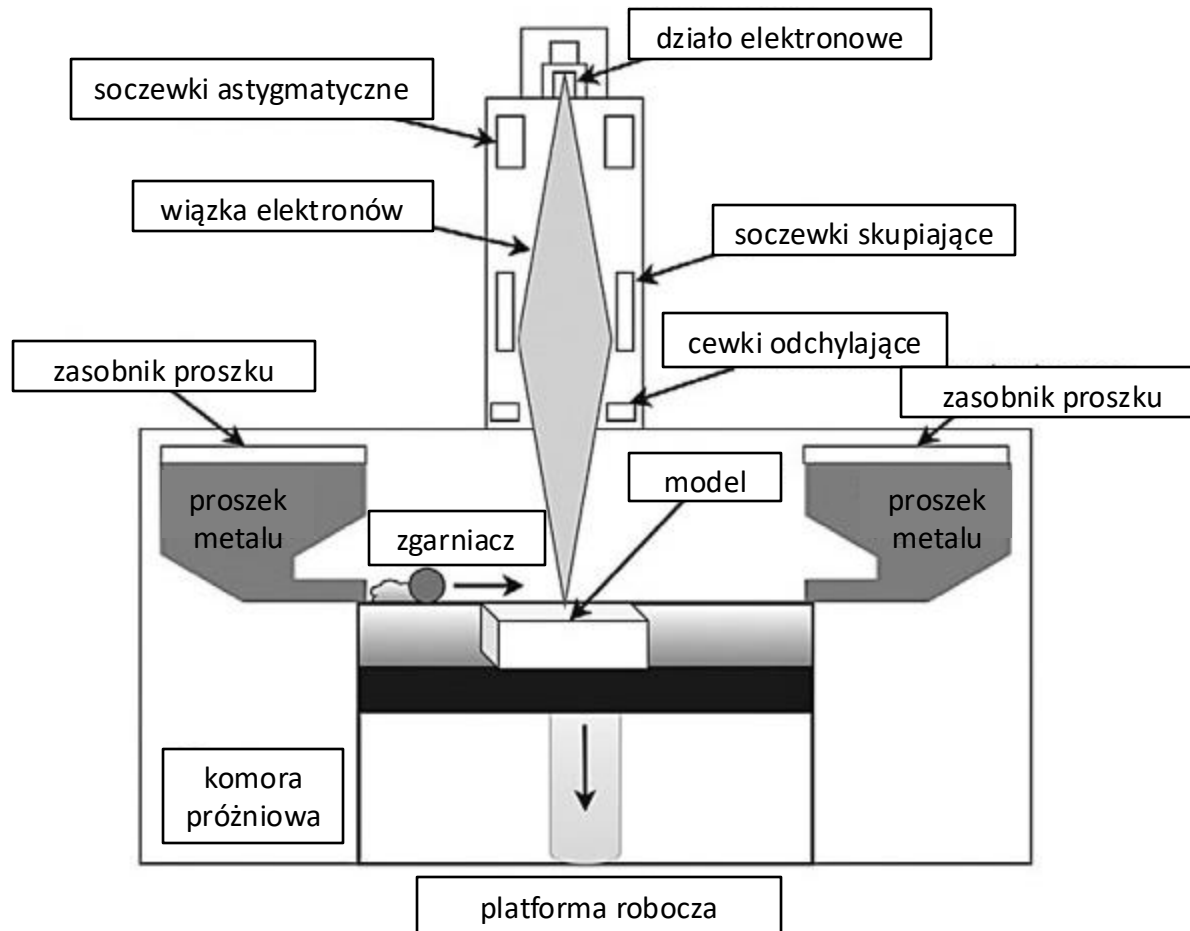
# SLM (Selective Laser Melting) i DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Metoda ta polega na warstwowym spiekaniu proszków metali za pomocą wiązki lasera.



# EBM (Electron Beam Melting)

Podobna do SLM ale zamiast lasera, źródłem energii jest działo elektronowe. Wiązka elektronów jest sterowana za pomocą cewek elektromagnetycznych (brak ruchomych lusterek, co pozwala na ekstremalnie szybkie przemieszczanie się wiązki). Proces odbywa się w próżni.



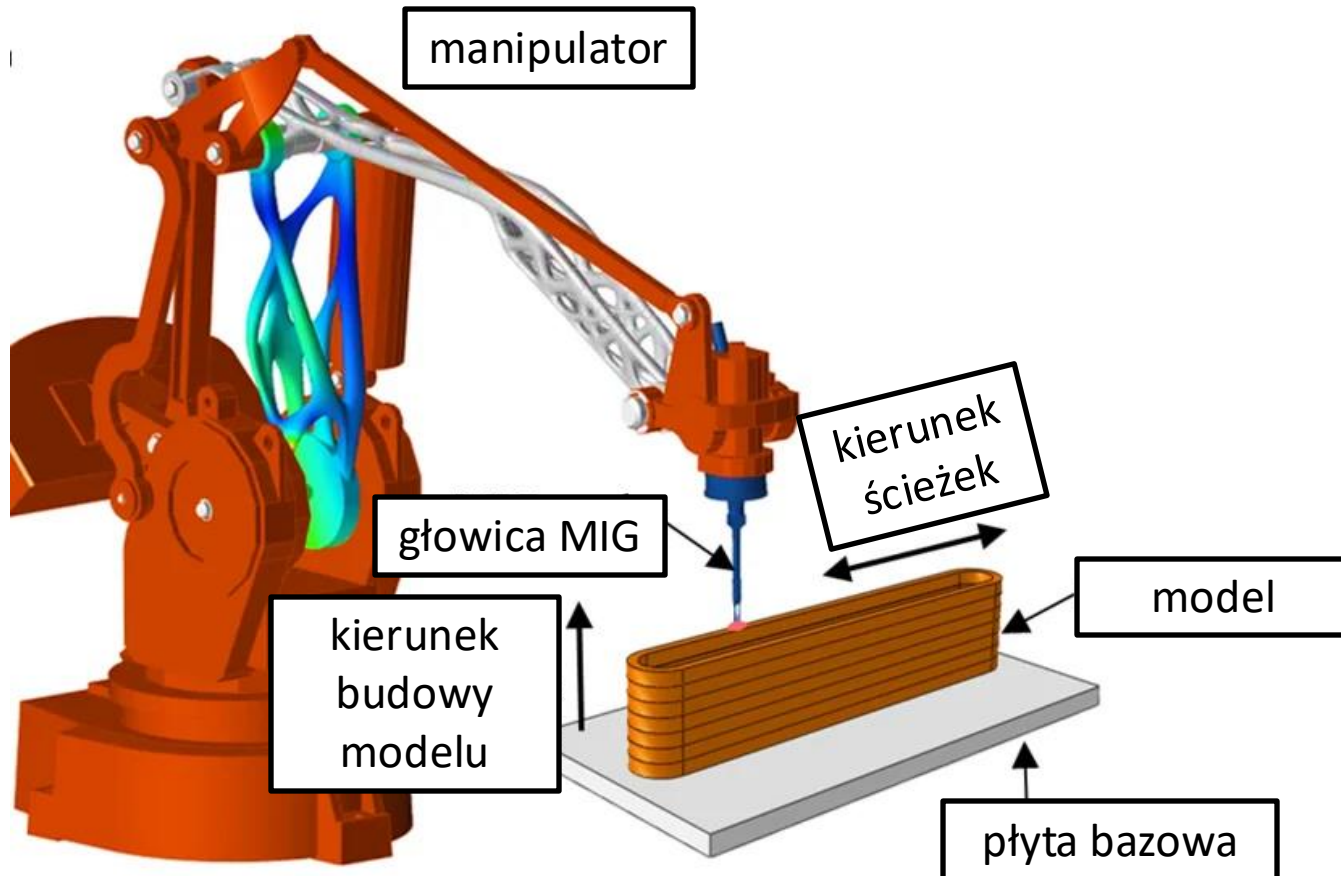
# EBM (Electron Beam Melting)

Podobna do SLM ale zamiast lasera, źródłem energii jest działo elektronowe. Wiązka elektronów jest sterowana za pomocą cewek elektromagnetycznych (brak ruchomych lusterek, co pozwala na ekstremalnie szybkie przemieszczanie się wiązki). Proces odbywa się w próżni.

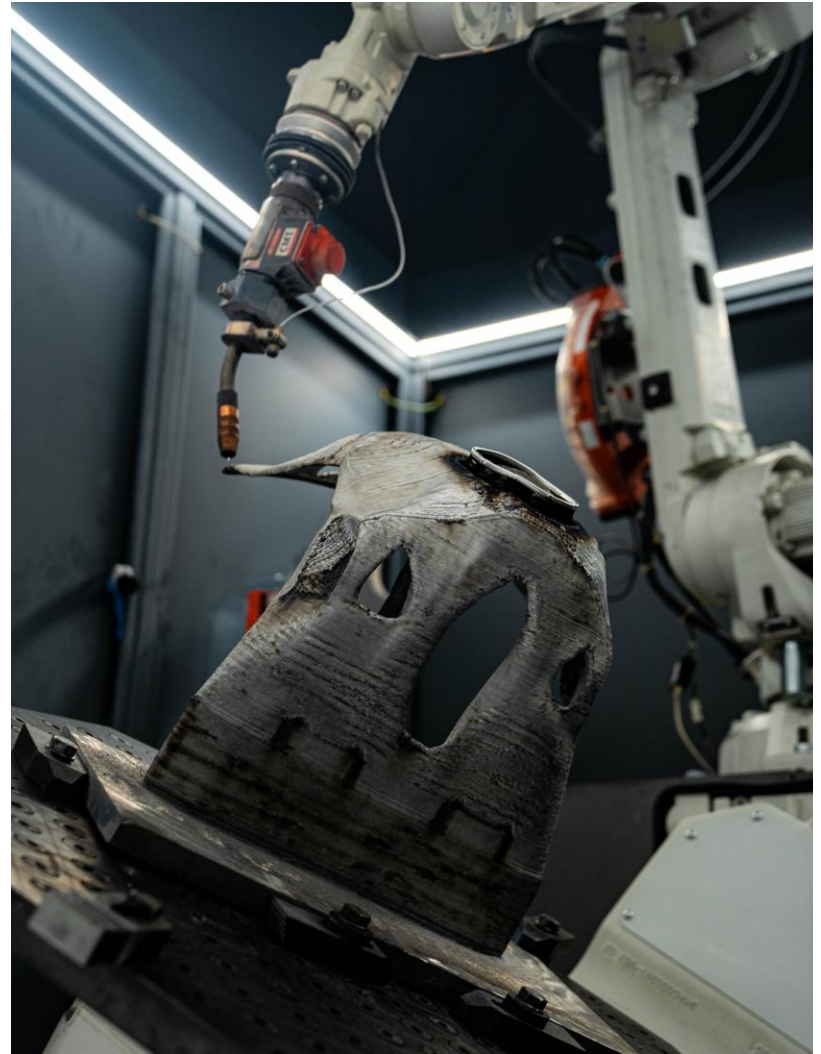
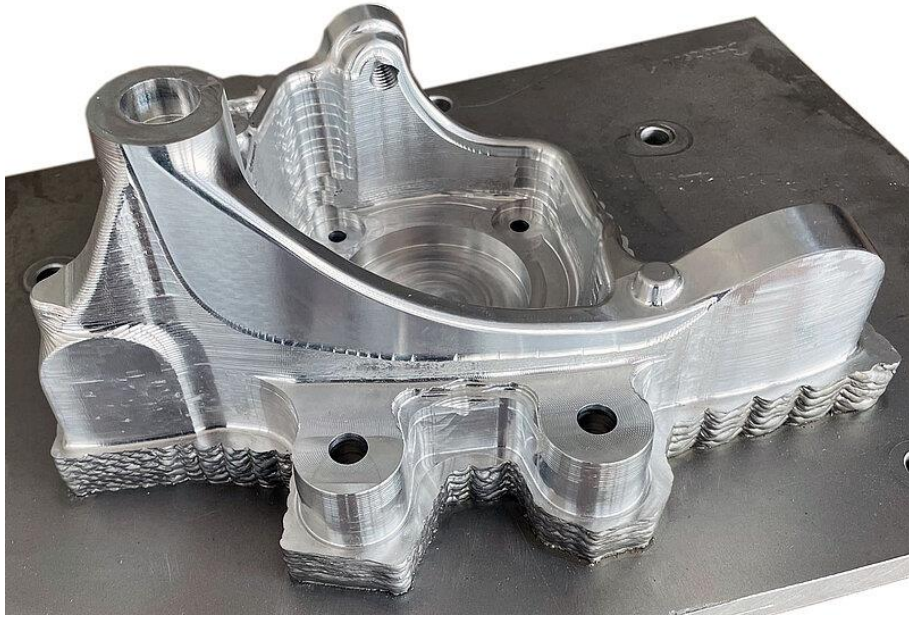


# WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)

WAAM wykorzystuje łuk elektryczny (taki sam jak w tradycyjnych spawarkach). Jako materiału używa się drutu spawalniczego (zazwyczaj stal, aluminium lub tytan), który jest podawany w sposób ciągły do strefy spawania. Głowica spawalnicza jest zamontowana na ramieniu robota przemysłowego (6-osiowego) lub na maszynie portalowej CNC, co pozwala na budowanie bardzo dużych obiektów w przestrzeni 3D. Robot kładzie ścieżkę spoiny na ścieżce, budując ścianki i bryły warstwa po warstwie.



# WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)

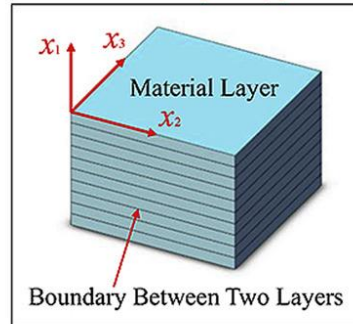


# Wytyczne do projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo

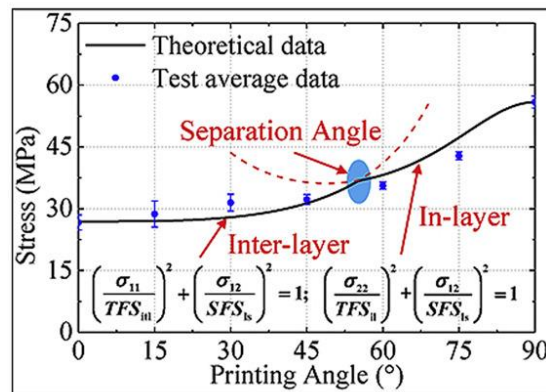
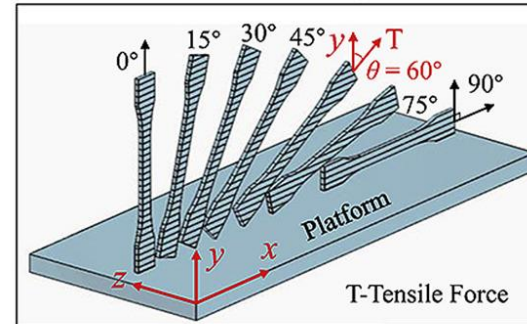
## Orientacja wydruku

- Części AM są anizotropowe. Wytrzymałość w osi Z (między warstwami) jest zazwyczaj niższa niż w osiach X/Y.
- Jakość powierzchni: Powierzchnie nachylone będą miały gorszą jakość niż pionowe ściany.

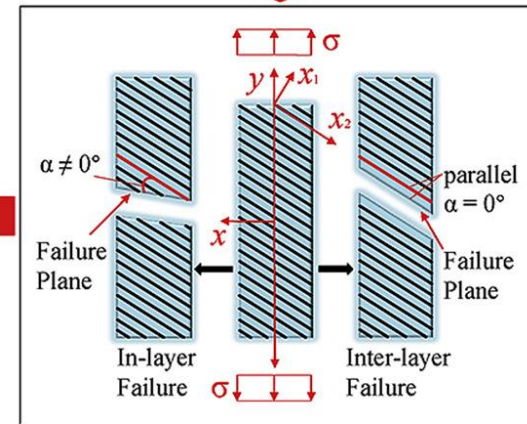
Transverse Isotropic Hypothesis



Status of 3D Printing Parts



Theoretical Models and Results

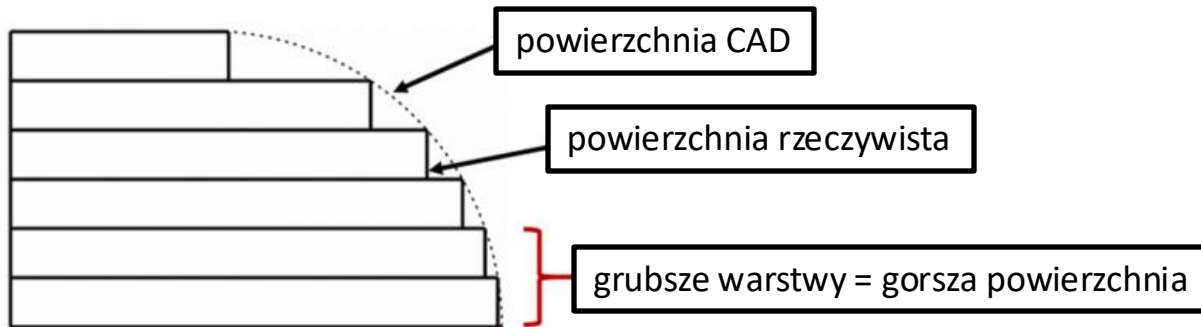


Two Different Failure mode

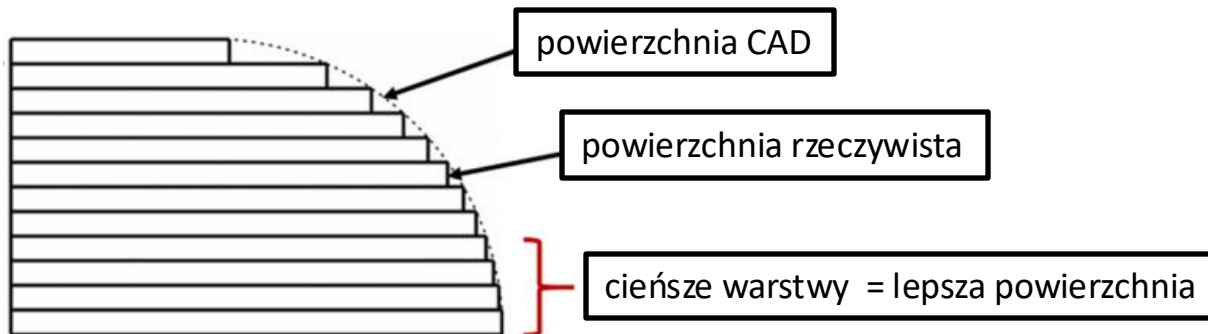
# Wytyczne do projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo

## Orientacja wydruku

- Części AM są anizotropowe. Wytrzymałość w osi Z (między warstwami) jest zazwyczaj niższa niż w osiach X/Y.
- Jakość powierzchni: Powierzchnie nachylone będą miały gorszą jakość niż pionowe ściany.

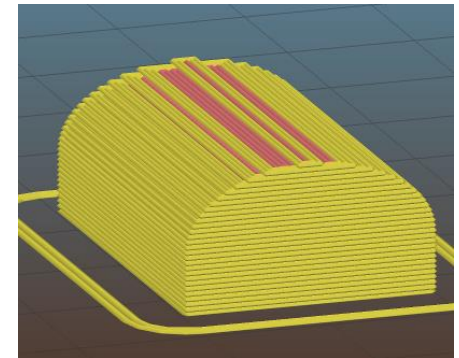


(a)

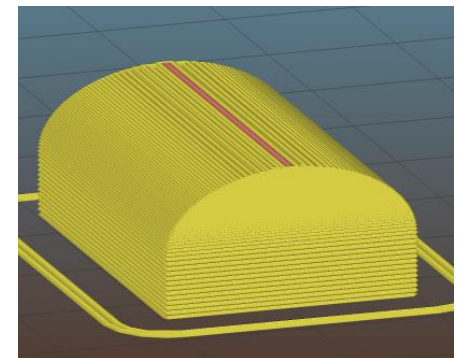


(b)

Stała grubość warstwy



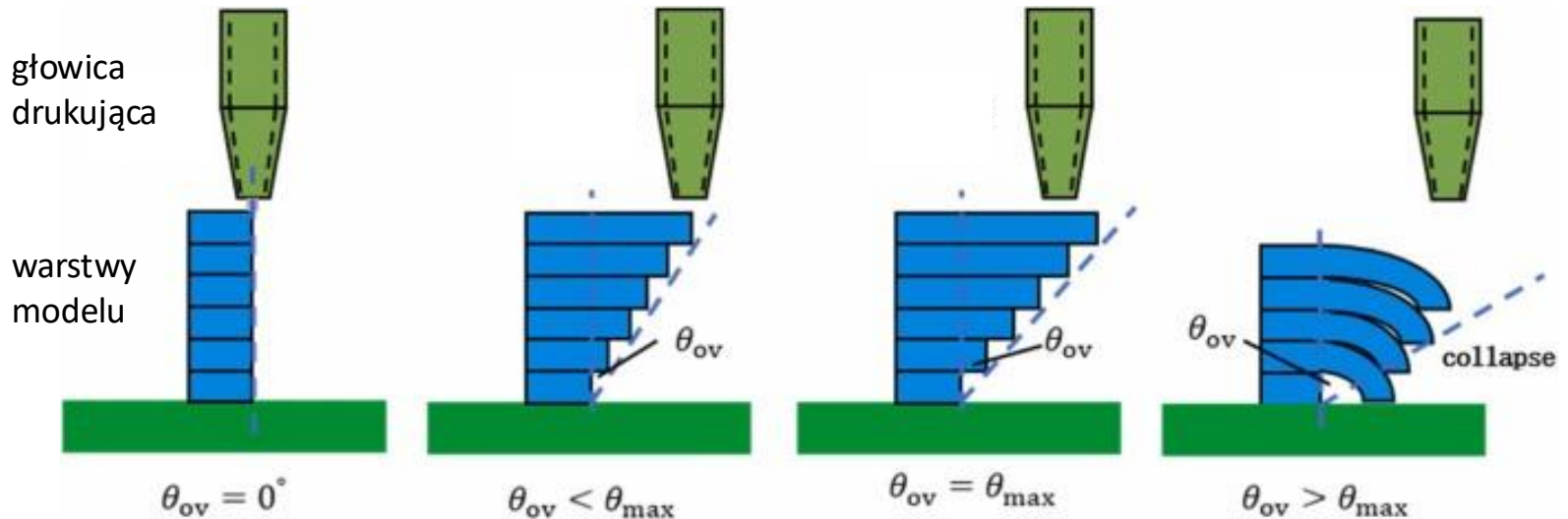
Zmienne grubość warstwy



# Wytyczne do projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo

## Kąty nawisów ("wysięgi") i podpory

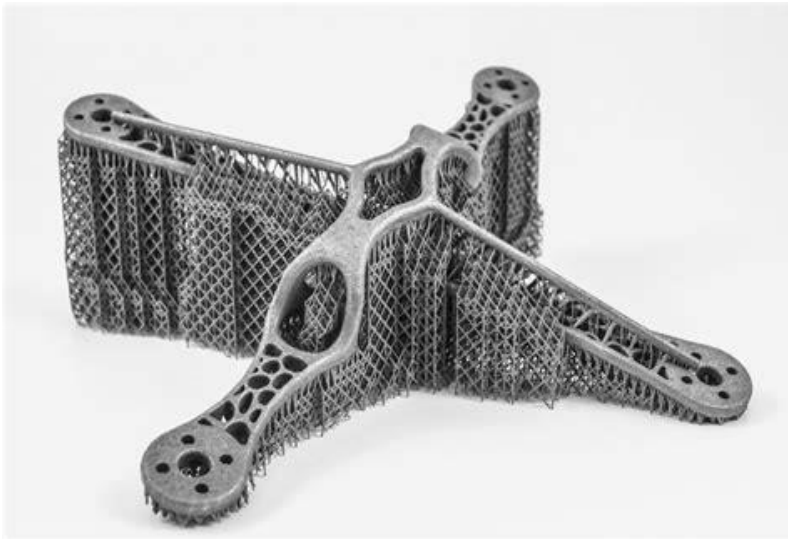
- Należy unikać kątów mniejszych niż  $45^\circ$  względem stołu roboczego.
- Jeśli detal tego wymaga, należy dodać podpory, które po wydruku są usuwane i stają się odpadem.



# Wytyczne do projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo

## Kąty nawisów ("wysięgi") i podpory

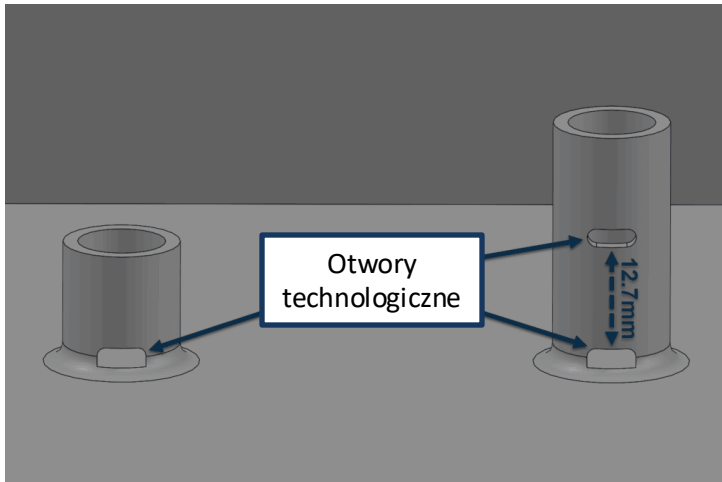
- Należy unikać kątów mniejszych niż  $45^\circ$  względem stołu roboczego.
- Jeśli detal tego wymaga, należy dodać podpory, które po wydruku są usuwane i stają się odpadem.



# Wytyczne do projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo

## Optymalizacja pod usuwanie materiału (puste przestrzenie)

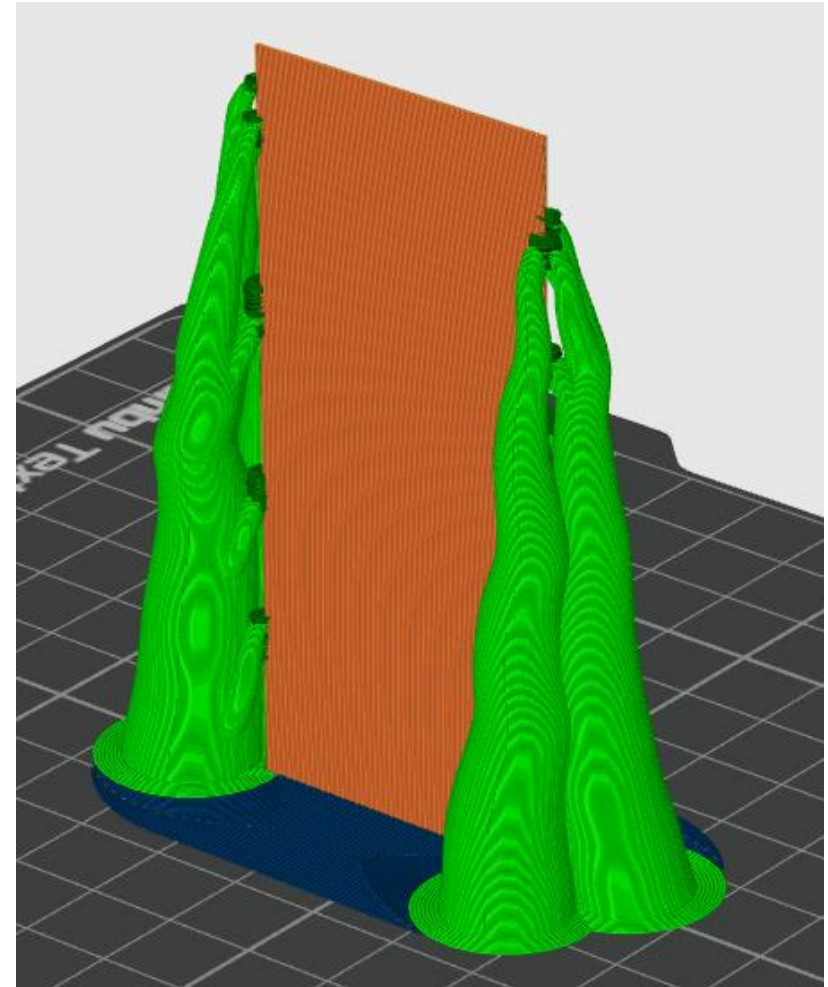
- Projektując elementy puste w środku (np. w technologii SLS lub SLM), należy dodać otwory technologiczne, przez które można usunąć pozostały proszek.



# Wytyczne do projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo

## Minimalne grubości i kanały

- Grubości ścianek - standardowo minimalna grubość niepodpartych ścianek to ok. 0.8 mm – 1.0 mm - wartości różni się w zależności od metody
- Kształt kanałów wewnętrznych musi umożliwić ich wykonanie bez podpór, a w przypadku metod wykorzystujących spiekanie proszku usunięcie go po procesie.

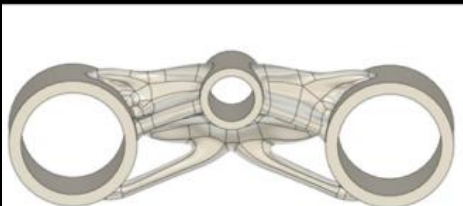

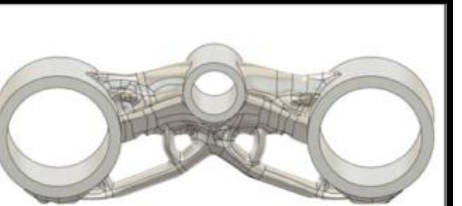

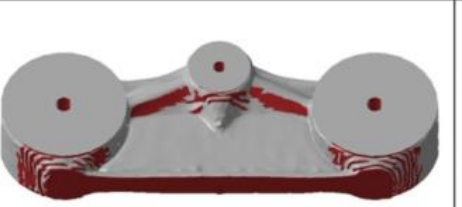

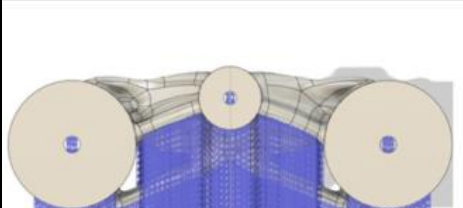
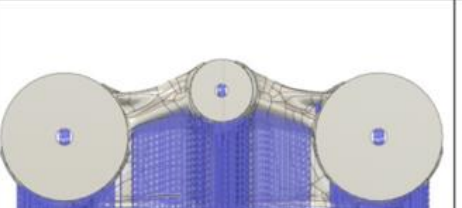
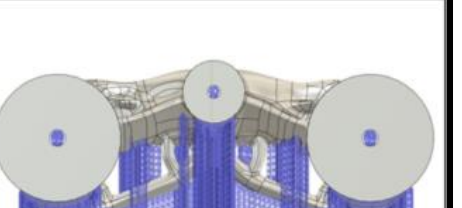


# Optymalizacja topologiczna

## Ograniczenia produkcyjne dla druku 3D:

- Ograniczenie kąta nawisu

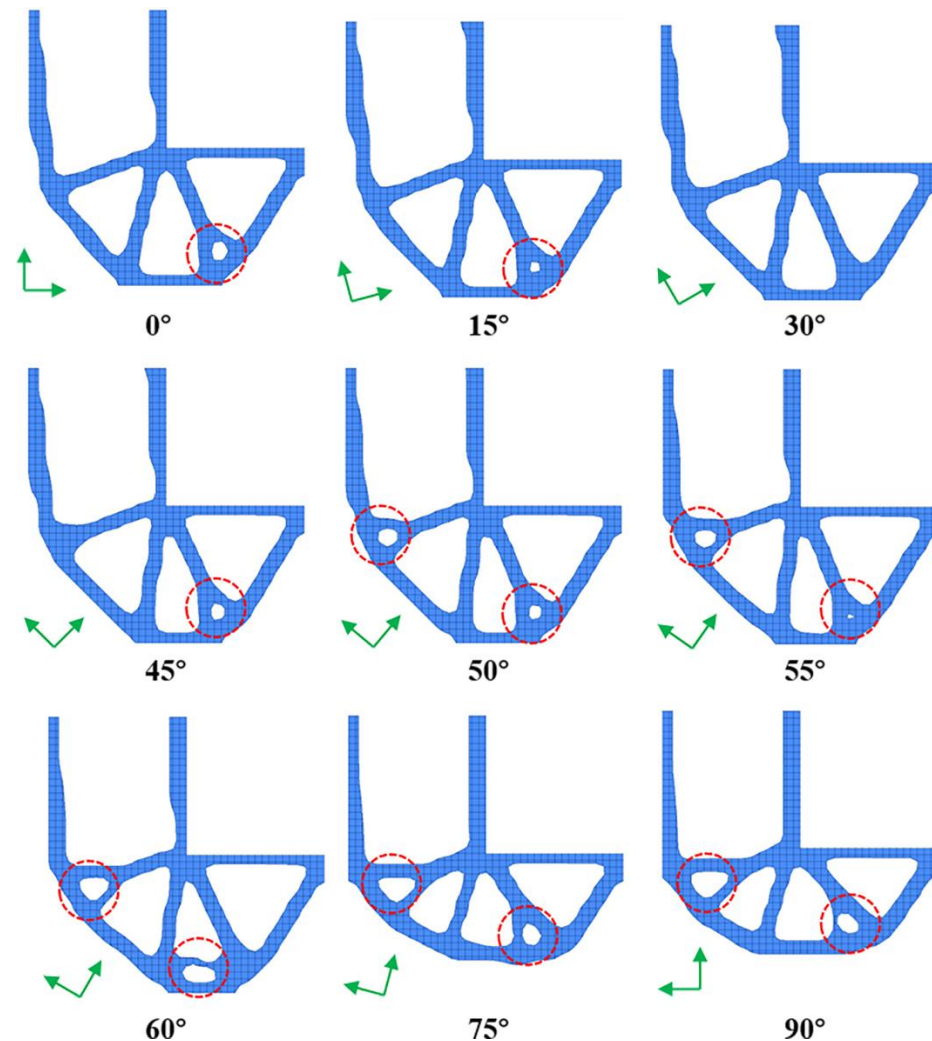
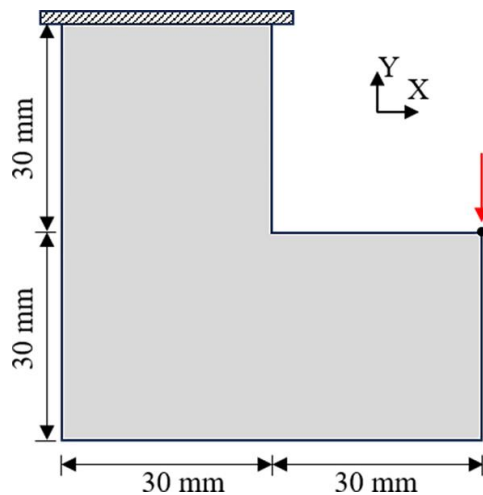
Maksymalny kąt samowspierania (np. 45st. dla danej maszyny/materiału). Program tak optymalizuje kształt, aby każda nowa warstwa miała podparcie w poprzedniej. Eliminuje to potrzebę stosowania wewnętrznych struktur wsporczych, które są trudne lub niemożliwe do usunięcia.

	Bez ograniczeń	Ograniczenie kąta (wariant 1)	Ograniczenie kąta (wariant 2)
Wynikowy kształt			
Obszary "wysięgnikowe"			
Symulacja spiekania			
	Part Mass = 1 kg   Support Mass = 28 g	Part Mass = 1.1 kg   Support Mass = 29 g	Part Mass = 1 kg   Support Mass = 19 g

# Optymalizacja topologiczna

## Ograniczenia produkcyjne dla druku 3D:

- Kierunek budowy (anizotropia)  
Zdefiniowana oś (np. +Z), w której element będzie drukowany. Algorytm generuje geometrię zoptymalizowaną pod ten konkretny kierunek, minimalizując powierzchnie wymagające podpór od spodu. Często proponuje się kilka wariantów dla różnych kierunków budowy, pozwalając wybrać najlepszy balans między masą a kosztem wydruku.



# Optymalizacja topologiczna

## Ograniczenia produkcyjne dla druku 3D:

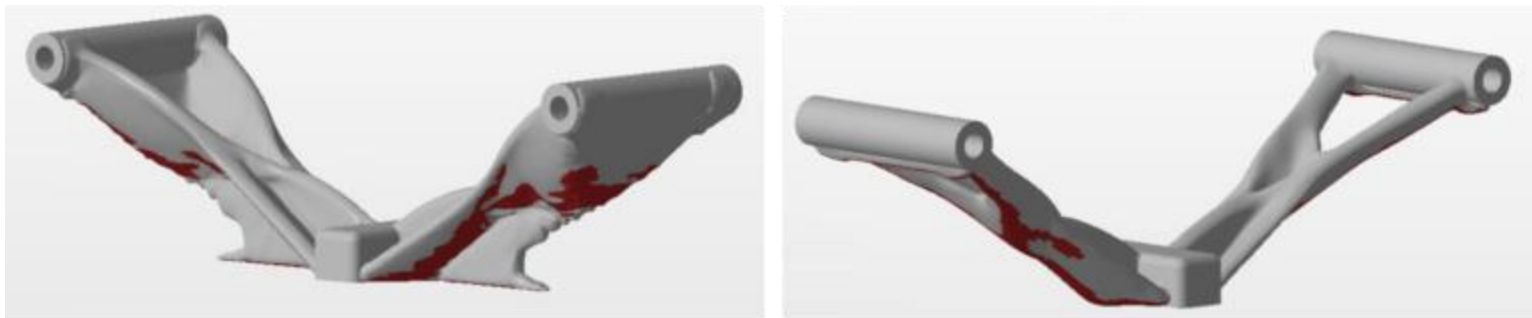
- Minimalna grubość ścianek i detali

Ustalenie dolnej granicy wymiaru dla struktur ażurowych i cienkich ścianek. Zapobiega to tworzeniu zbyt kruchych struktur, które mogłyby pęknąć pod wpływem skurczu termicznego (w metalu) lub sił zrywających warstwy (w żywicy/FDM).

Bez ograniczeń



Warianty optymalizacji topologicznej z ograniczeń kąta wysięgu i min. gr. ścianki 3mm





**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ  
BUDOWY MASZYN  
I LOTNICTWA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Dziękuję za uwagę!

dr inż. Michał Batsch