

# Aktualne trendy w wytwarzaniu przyrostowym kompozytów wzmacnianych włóknami

**Interreg**



Spolufinancovaný  
EURÓPSKOU ÚNIOU

**Poľsko – Slovensko**

**SPÁJAME REGIÓN BESKYDY PROSTREDNÍCTVOM TECHNICKÉHO VZDELÁVANIA  
ŁĄCZYMY REGION BESKIDÓW POPRZEC EDUKACJĘ TECHNICZNĄ**

Miesto konania/ Miejsce wydarzenia: **Žilinská Univerzita v Žiline (SK)**

<https://www.uniza.sk/> | <http://kame.uniza.sk/inter/inter.php>

Termín/Termin: **22.–24. 04. 2026**



Žilinská univerzita  
v Žiline



# Cel

- Przegląd podstawowych metod druku 3D, w tym opis zasad działania, zalet i ograniczeń poszczególnych technologii.
- Przegląd praktycznych zastosowań druku 3D: motoryzacja, lotnictwo, narzędzia.
- Zasady projektowania części drukowanych 3D: wpływ orientacji druku na wytrzymałość i zachowanie materiału.
- Możliwości wytwarzania kompozytów termoplastycznych wzmocnianych włóknami za pomocą druku 3D.
- Szczegółowy opis drukarki Markforged MarkTwo wraz z praktyczną demonstracją urządzenia.
- Praca w oprogramowaniu slicer: ustawianie parametrów druku dla nylonu wzmocnianego ciętymi włóknami węglowymi oraz ciągłymi włóknami szklanymi, węglowymi i Kevlarowymi.
- Przeprowadzenie wybranych pomiarów eksperymentalnych na wydrukowanych próbkach w warunkach laboratoryjnych.
- Prezentacja aktualnych wyników badań prowadzonych w miejscu pracy.

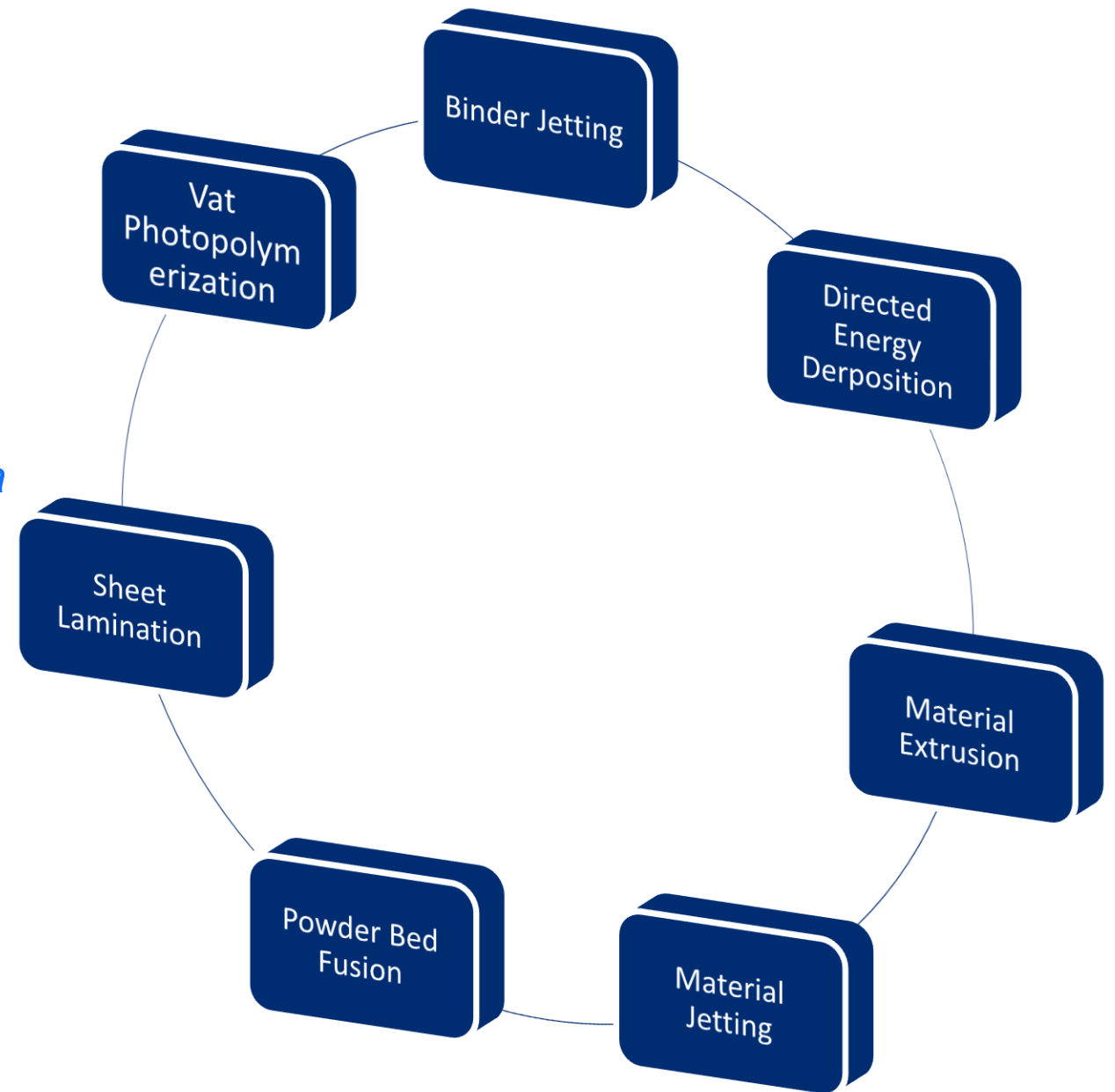
Pojęcia związane z wytwarzaniem przyrostowym są dokładniej określone w normie ASTM/ISO 52900.

## Wytwarzanie przyrostowe

„Proces łączenia materiałów w celu wytworzenia części na podstawie danych modelu 3D, zazwyczaj warstwa po warstwie, w przeciwieństwie do technologii wytwarzania ubytkowego i kształtującego.”

## Druk 3D

„Wytwarzanie obiektów poprzez nanoszenie materiału za pomocą głowicy drukującej, dyszy lub innej technologii drukowania.”

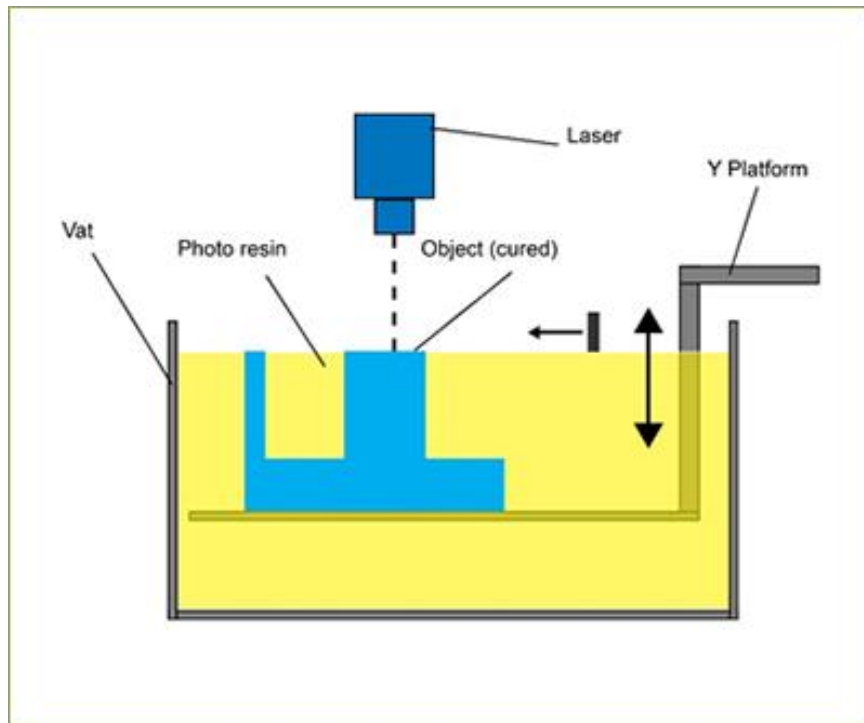


# Fotopolimeryzacja w kadzi

„Proces, w którym ciekły fotopolimer znajdujący się w kadzi jest selektywnie utwardzany poprzez polimeryzację aktywowaną światłem.”

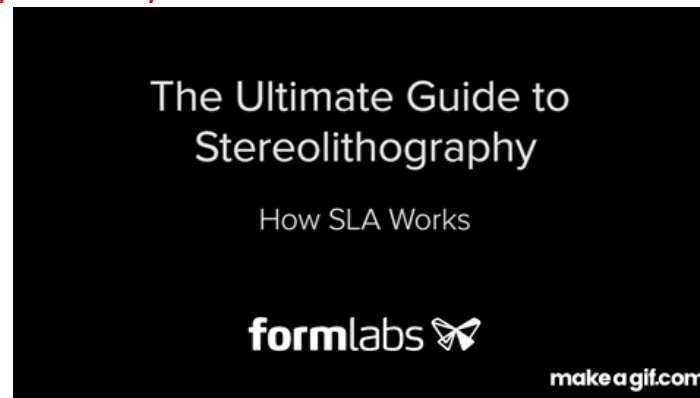
Proces wytwarzania:

- 1) Ciekła żywica fotopolimerowa jest wlewana do kadzi.
- 2) Źródło światła UV selektywnie naświetla wybrany obszar.
- 3) Naświetlona żywica polimeryzuje, czyli twardnieje w miejscu działania światła.
- 4) Proces jest powtarzany warstwa po warstwie aż do utworzenia całej części.



+ bardzo wysoka dokładność i rozdzielczość detali,  
+ gładka powierzchnia, niska chropowatość,  
+ odpowiednia technologia dla małych i złożonych geometrii.

- materiały są bardziej kruche,  
- wymagane jest przetwarzanie końcowe,  
- żywica jest wrażliwa na światło i warunki przechowywania.



Aktualne trendy badawcze:

- opracowywanie nowych żywic,
- zwiększanie prędkości druku,
- druk wielomateriałowy,
- druk struktur w skali mikro i nano.

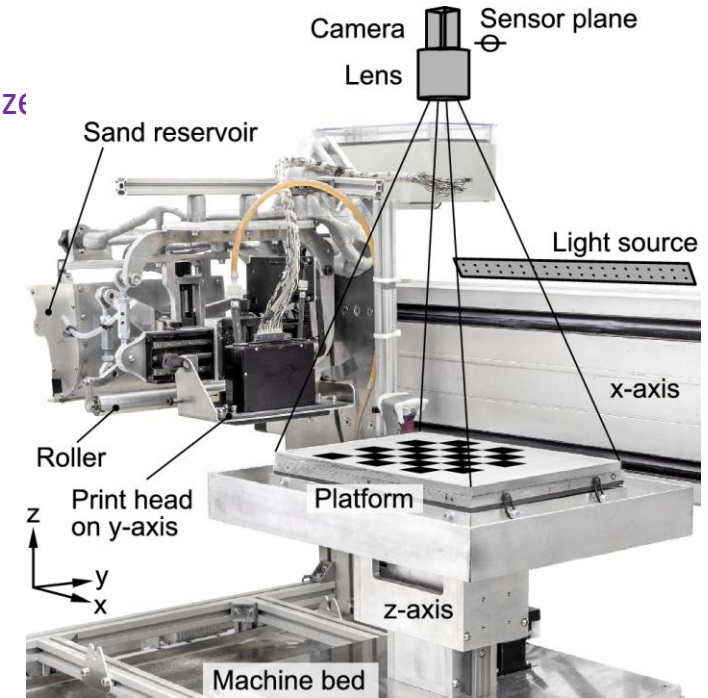
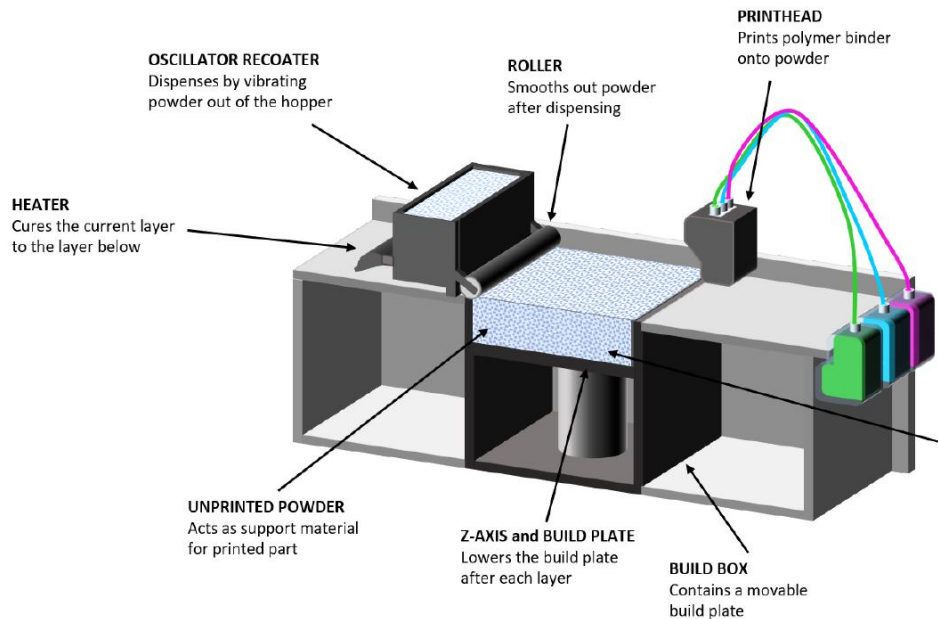
# Binder Jetting

„Proces, w którym ciekły środek wiążący jest selektywnie наносzony w celu połączenia materiałów proszkowych.”

Proces wytwarzania:

- 1) Cienka warstwa proszku, np. metalu, ceramiki lub piasku, jest rozprowadzana na platformie roboczej
- 2) Głowica drukująca selektywnie nanosi spoiwo w miejscach, w których ma powstać część.
- 3) Warstwa jest łączona tylko w wymaganych obszarach.
- 4) Proces jest powtarzany warstwa po warstwie.

- + możliwość jednoczesnego drukowania wielu części,
- + brak potrzeby stosowania struktur podporowych,
- + stosunkowo niskie koszty produkcji.
- niższa dokładność w porównaniu z niektórymi innymi technologiami druku 3D,
- konieczność obróbki końcowej, np. spiekania,
- niższa wytrzymałość bez dodatkowej obróbki.



Aktualne trendy badawcze:

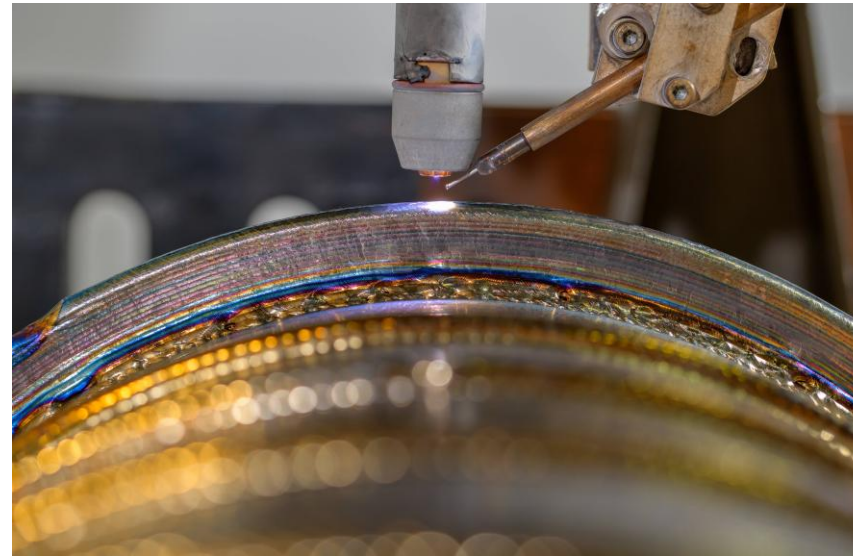
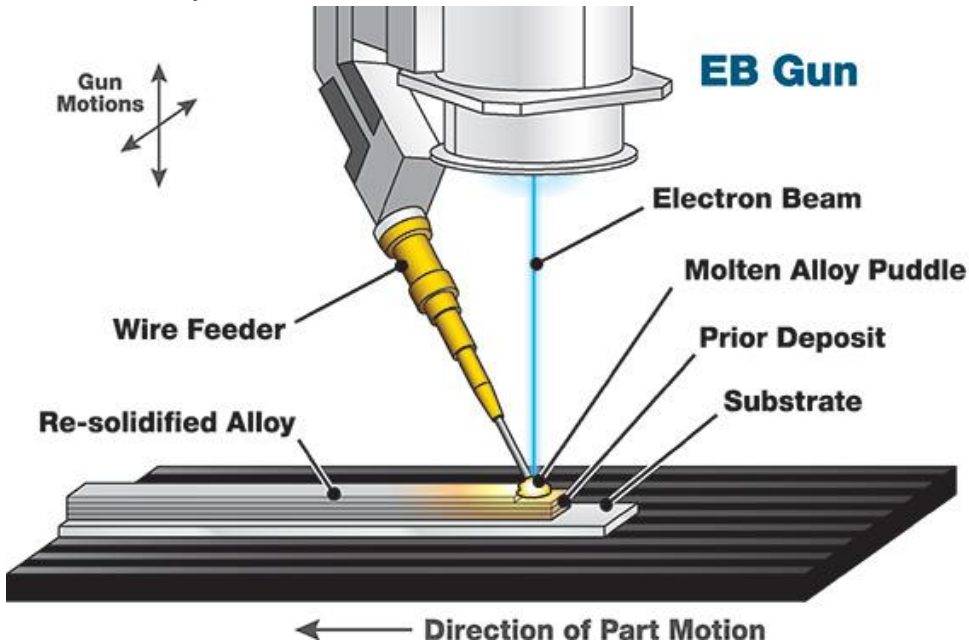
- opracowywanie nowych spoiw,
- wpływ parametrów druku na właściwości materiału,
- skurcz podczas spiekania,
- poprawa wytrzymałości międzywarstwowej.

# Bezpośrednie osadzanie energii

„Proces, w którym skupiona energia cieplna jest wykorzystywana do stapiania materiałów podczas ich nanoszenia.”

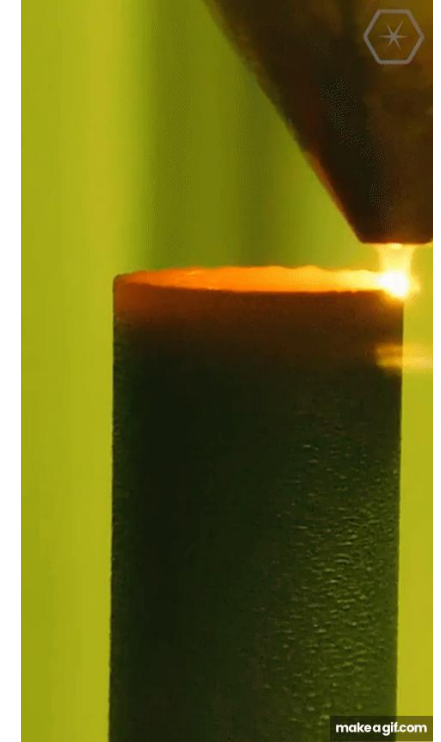
Proces wytwarzania:

- 1) Materiał, w postaci proszku lub drutu, jest stale doprowadzany do obszaru roboczego.
- 2) Źródło energii, np. laser, wiązka elektronów lub plazma, tworzy lokalne jezioro stopionego materiału na powierzchni podłoża.
- 3) Doprowadzany materiał topi się w jeziorce i łączy z podłożem.
- 4) Stopiony materiał krzepnie, a proces jest powtarzany warstwa po warstwie.



+ możliwość naprawy i regeneracji części,  
+ dobre połączenie międzywarstwowe,  
+ możliwość druku wielomateriałowego.

- niższa dokładność i jakość powierzchni,  
- występowanie defektów,  
- kosztowne urządzenia i eksploatacja.



Aktualne trendy badawcze:

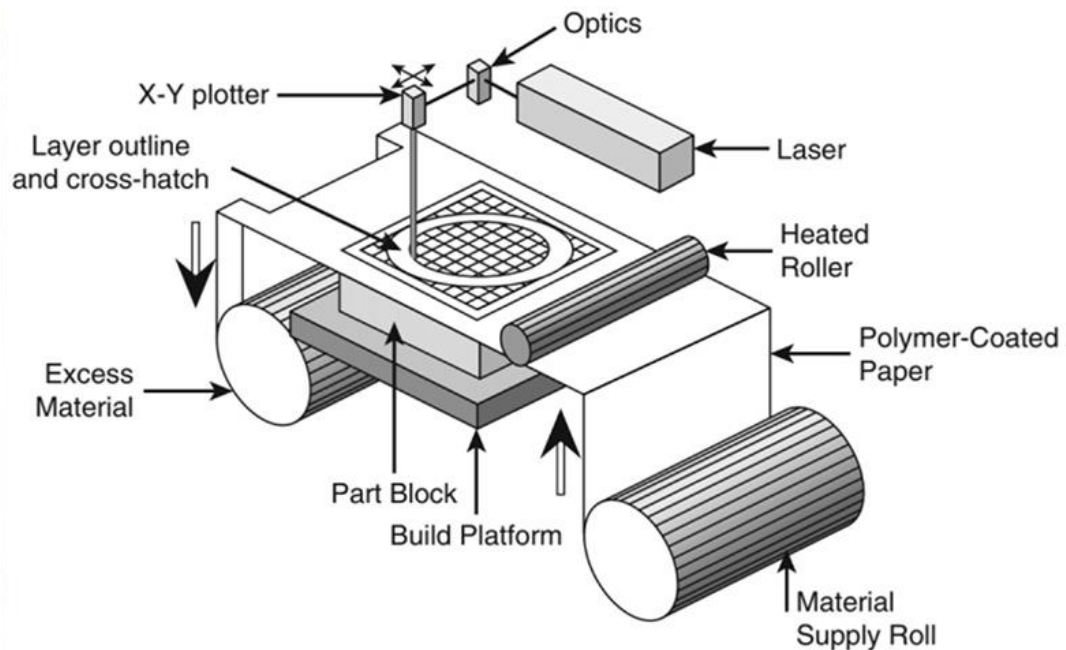
- dynamika jeziora ciekłego metalu,
- zmiany materiału podczas druku,
- monitorowanie procesu w czasie rzeczywistym,
- możliwości naprawy i regeneracji części.

# Laminowanie arkuszy

„Proces, w którym arkusze materiału są łączone w celu utworzenia części.”

Proces wytwarzania:

- 1) Cienka warstwa materiału w postaci arkusza jest umieszczana na platformie roboczej.
- 2) Warstwa jest łączona z poprzednią warstwą za pomocą kleju, ciepła lub zgrzewania ultradźwiękowego.
- 3) Po połączeniu warstwa jest wycinana do wymaganego kształtu za pomocą lasera, noża lub frezowania.
- 4) Nadmiar materiału pozostaje jako podpora albo jest usuwany.
- 5) Proces jest powtarzany warstwa po warstwie aż do utworzenia całej części.



- + stosunkowo niski koszt,
- + wysoka prędkość produkcji,
- + brak potrzeby stosowania konwencjonalnych podpr.
- niższa dokładność,
- konieczność dodatkowej obróbki końcowej,
- widoczne warstwy i gorsza jakość powierzchni,
- ograniczony zakres materiałów.



Current research trends:

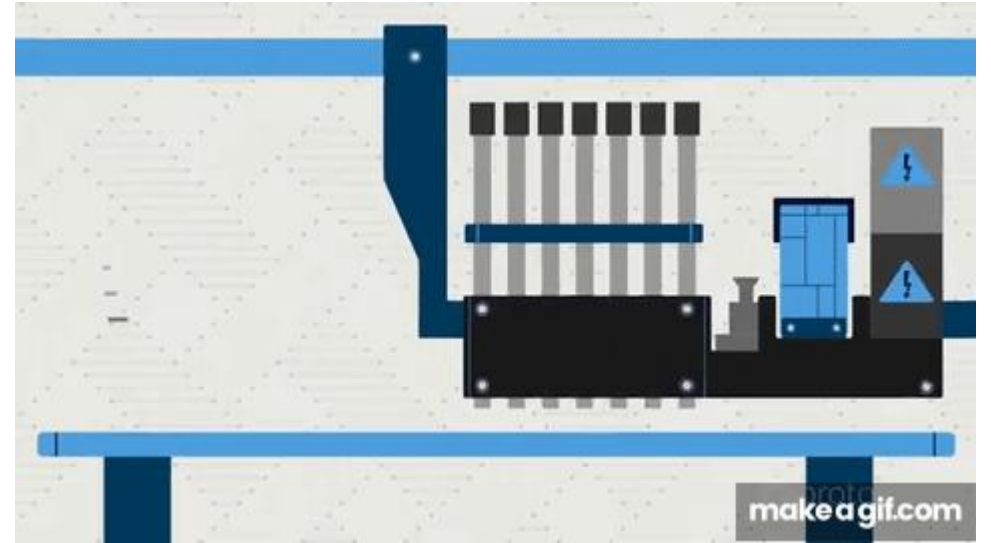
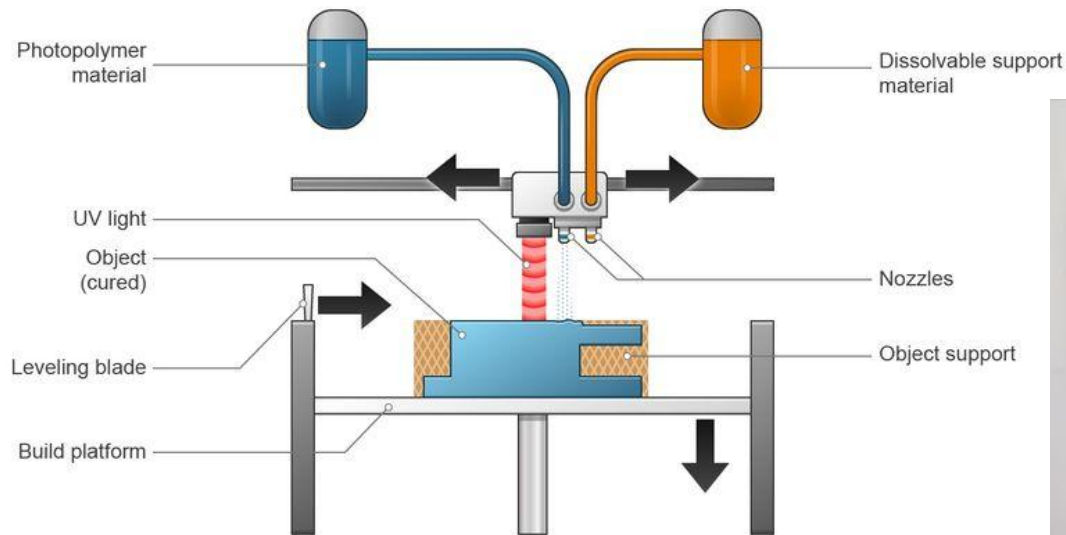
- nowe materiały, w tym kompozyty,
- druk wielomateriałowy,
- poprawa wytrzymałości międzywarstwowej,
- dokładność cięcia.

# Material Jetting

„Proces, w którym krople materiału wejściowego są selektywnie nanoszone.”

Proces wytwarzania:

- 1) Ciekły fotonopolimer, czyli żywica, jest przechowywany w zbiornikach drukarki.
- 2) Głowica drukująca nanosi mikrokrople materiału na platformę roboczą.
- 3) Każda naniesiona warstwa jest natychmiast utwardzana za pomocą światła UV.
- 4) Materiał krzepnie, a proces jest powtarzany warstwa po warstwie.



- + wysoka dokładność,
- + doskonała jakość powierzchni.
- materiały są wrażliwe na promieniowanie UV,
- wyższe koszty materiałów,
- ograniczony zakres materiałów.

Aktualne trendy badawcze:

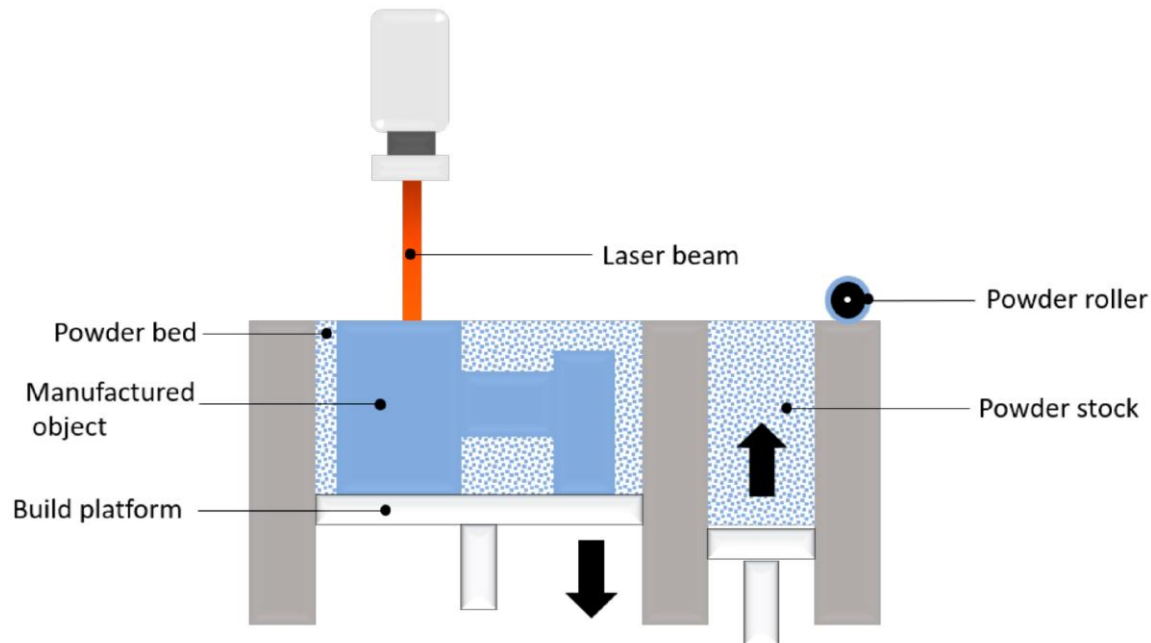
- druk materiałów biokompatybilnych,
- rozmiar i kształt kropli,
- dokładność nanoszenia kropli,
- poprawa właściwości mechanicznych.

# Stapianie w złożu proszkowym

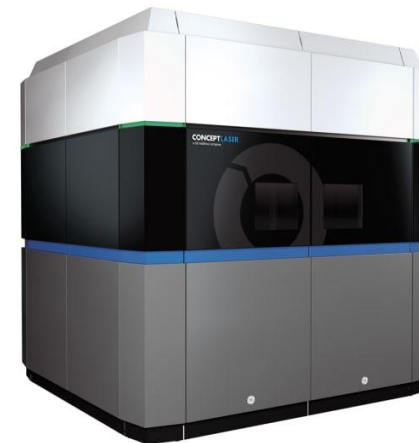
„Proces, w którym energia cieplna selektywnie stapia obszary złoża proszkowego.”

Proces wytwarzania:

- 1) Cienka warstwa proszku, metalowego lub polimerowego, jest rozprowadzana na platformie roboczej.
- 2) Źródło energii, np. laser lub wiązka elektronów, selektywnie topi albo spieka proszek.
- 3) Materiał krzepnie, a proces jest powtarzany warstwa po warstwie.



- + bardzo wysoka dokładność i rozdzielczość detali,
- + możliwość wytwarzania złożonych geometrii,
- + dobre właściwości mechaniczne.
- wysokie koszty urządzeń i materiałów,
- wymagana obróbka końcowa.



Aktualne trendy badawcze:

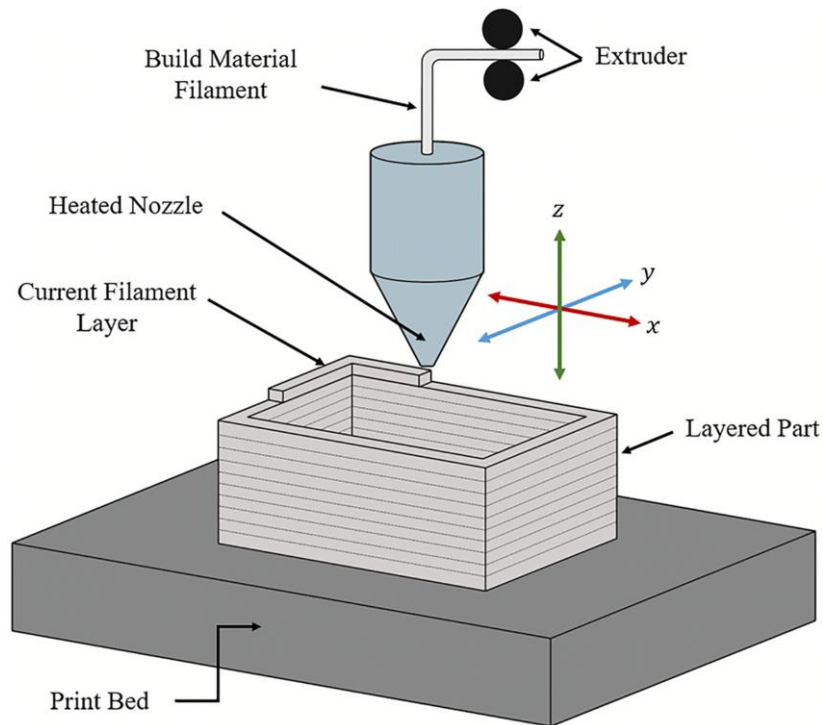
- kontrola jeziora stopionego materiału,
- powstawanie defektów,
- opracowywanie nowych materiałów,
- ponowne wykorzystanie proszku.

# Ekstruzja materiału

„Proces, w którym materiał jest selektywnie dozowany przez dyszę lub otwór.”

Proces wytwarzania:

- 1) Materiał termoplastyczny, czyli filament, jest podawany do ekstrudera.
- 2) Materiał jest ogrzewany w dyszy do temperatury topnienia.
- 3) Stopiony materiał jest wytłaczany przez dyszę na platformę roboczą.
- 4) Naniesiony materiał krzepnie, a proces jest powtarzany warstwa po warstwie.

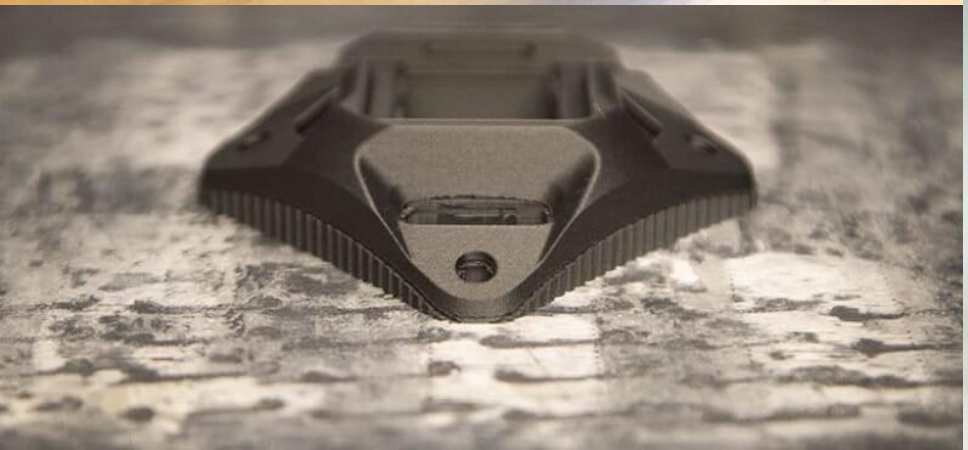
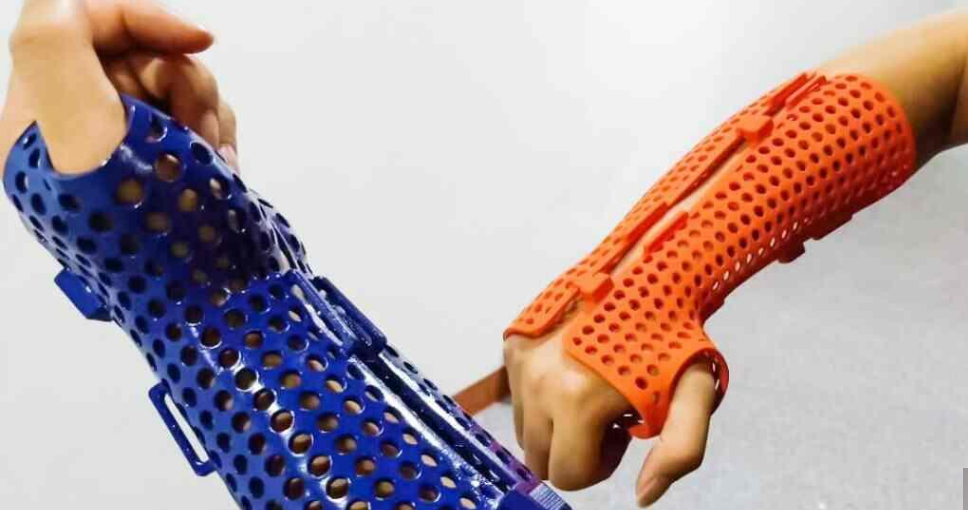


Aktualne trendy badawcze:

- kompozyty wzmacniane,
- recykling materiałów,
- łączenie międzywarstwowe,
- dokładność druku.

+ niskie koszty urządzeń i materiałów,  
+ szeroki zakres materiałów,  
+ prosta i dostępna technologia.

- niższa dokładność i jakość powierzchni,  
- potrzeba stosowania struktur podporowych,  
- anizotropowe właściwości mechaniczne.



# Normy w wytwarzaniu przyrostowym

- Normy dotyczące wytwarzania przyrostowego są stopniowo opracowywane i publikowane.
- Większość z nich jest oznaczana jako ASTM/ISO 529xx.
- W zakresie terminologii i klasyfikacji podstawową normą jest ISO/ASTM 52900.
- Nadal jednak występuje problem niewystarczającej standaryzacji.
- W takich przypadkach często stosuje się normy przeznaczone dla materiałów wytwarzanych konwencjonalnie.
- W niektórych przypadkach przydatność tych norm dla materiałów drukowanych 3D jest dyskusyjna.

STN EN ISO/ASTM 52924: 2023

Úrad pre normalizáciu, metrologiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky

INTERNATIONAL STANDARD ISO/ASTM 52924

First edition  
2023-08

**Additive manufacturing of  
polymers — Qualification principles  
— Classification of part properties**

*Fabrication additive des polymères — Principes de qualification —  
Classification des propriétés de la pièce*

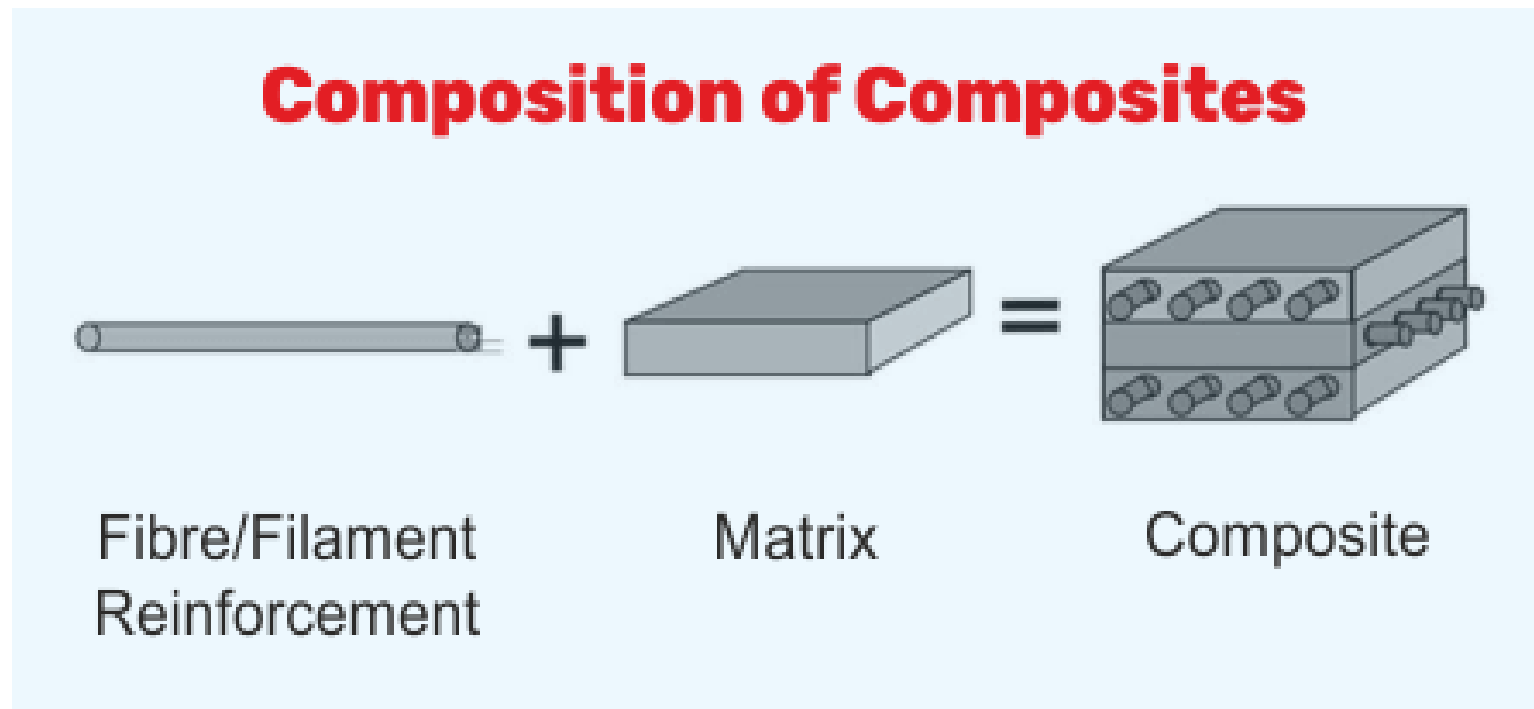


Reference number  
ISO/ASTM 52924:2023(E)

© ISO/ASTM International 2023

# Kompozyty

Materiał kompozytowy to materiał składający się z dwóch lub większej liczby różnych składników, które razem zapewniają lepsze właściwości niż każdy z poszczególnych składników osobno.



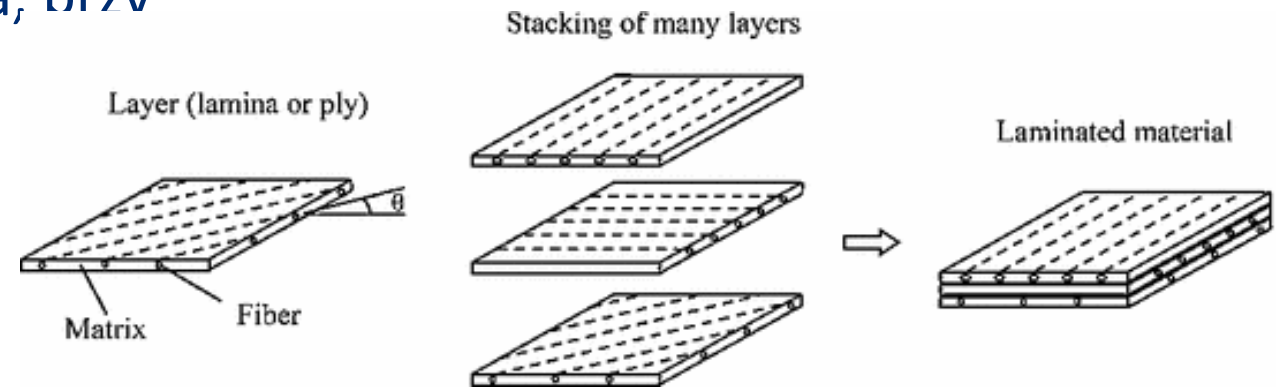
Kompozyt składa się z matrycy i wzmocnienia, przy czym każdy składnik pełni określoną funkcję.

## Matryca:

- utrzymuje kształt,
- chroni wzmocnienie,
- przenosi obciążenie,
- materiały: polimer, metal, ceramika.

## Wzmocnienie:

- poprawia właściwości mechaniczne kompozytu,
- materiały: włókna naturalne, Kevlarowe, szklane lub węglowe.

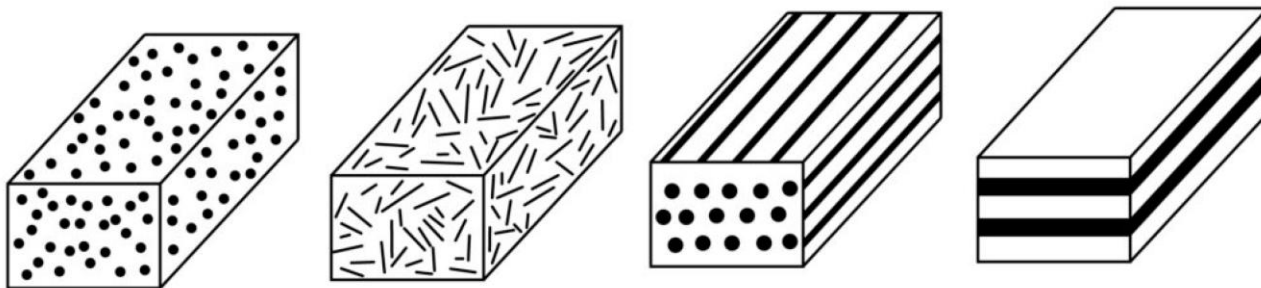


## Zalety:

- wysoka wytrzymałość przy niskiej masie,
- dobra odporność na korozję,
- możliwość dostosowania właściwości poprzez zmianę orientacji wzmocnienia.

## Wady:

- złożona produkcja,
- wyższe koszty produkcji,
- problemy z recyklingiem.



Particles

Short Fibres or whiskers

Continuous fibres

Sheet laminates

# Technologie wytwarzania kompozytów

## Ręczne laminowanie

Warstwy włókien są ręcznie układane i impregnowane żywicą.

### Zalety:

- niski koszt,
- prosta technologia

### Wady:

- niska powtarzalność,
- zależność od operatora,
- niższa jakość.



# RTM / VARTM

Proces, w którym żywica jest wprowadzana do formy zawierającej wzmocnienie, czyli włókna, w celu utworzenia kompozytu.

## Proces wytwarzania:

- 1) Suche włókna, np. węglowe lub szklane, są umieszczane w formie.
- 2) Forma jest zamykana, w przypadku RTM, albo przykrywana workiem próżniowym, w przypadku VARTM.
- 3) Żywica jest wtryskiwana lub wprowadzana próżniowo, impregnowując włókna.
- 4) Materiał utwardza się w podwyższonej temperaturze lub w temperaturze pokojowej, a następnie jest wyjmowany z formy.

## Zalety:

- mniej odpadów i lepsza powtarzalność.

## Wady:

- bardziej złożona technologia w porównaniu z ręcznym laminowaniem.



# Nawijanie włókien

Proces, w którym włókna są nawijane na obracającą się formę.

## Zalety:

- wysoka wytrzymałość,
- dobra kontrola orientacji włókien,
- minimalne straty materiału.

## Wady:

- ograniczenie do kształtów obrotowych.



# Autoklaw

Proces, w którym wstępnie impregnowane włókna są utwardzane pod wpływem ciepła i ciśnienia.

Prepreg = pre-impregnated material

fibers (e.g., carbon) are already impregnated with a precise amount of resin

## Proces wytwarzania:

- 1) Warstwy prepregu są układane w formie.
- 2) Część jest przykrywana workiem próżniowym i uszczelniana.
- 3) Element jest umieszczany w autoklawie.
- 4) Działanie ciepła powoduje utwardzanie żywicy, a ciśnienie usuwa pęcherze i pustki.

## Zalety:

- bardzo wysoka wytrzymałość i jakość,
- minimalna porowatość.


## Wady:

- wysokie koszty eksploatacji,
- drogie wyposażenie.



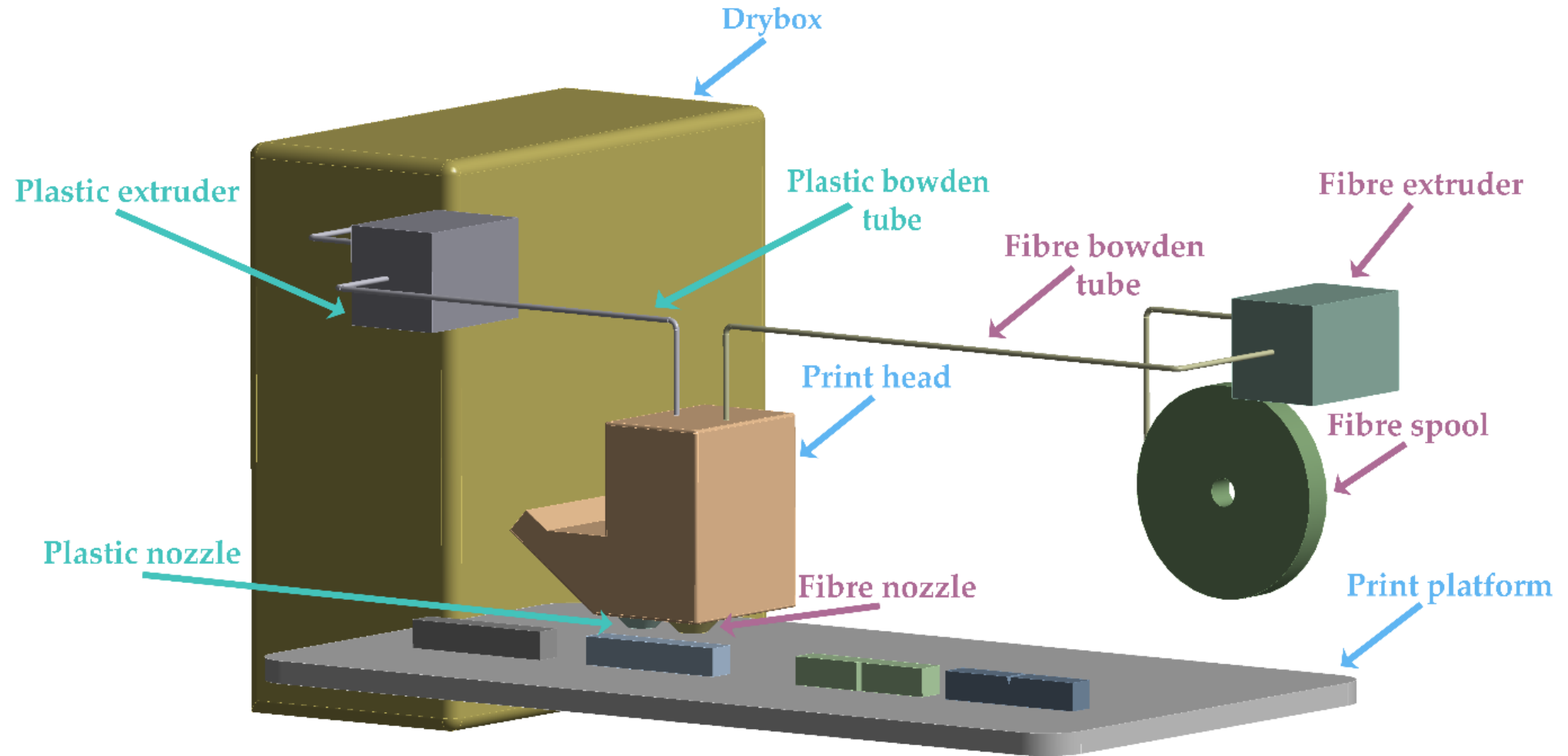
# Druk 3D kompozytów

- Stereolitografia, spiekanie, ekstruzja.
- Wytwarzanie metodą stapiania filamentu, czyli Fused Filament Fabrication.

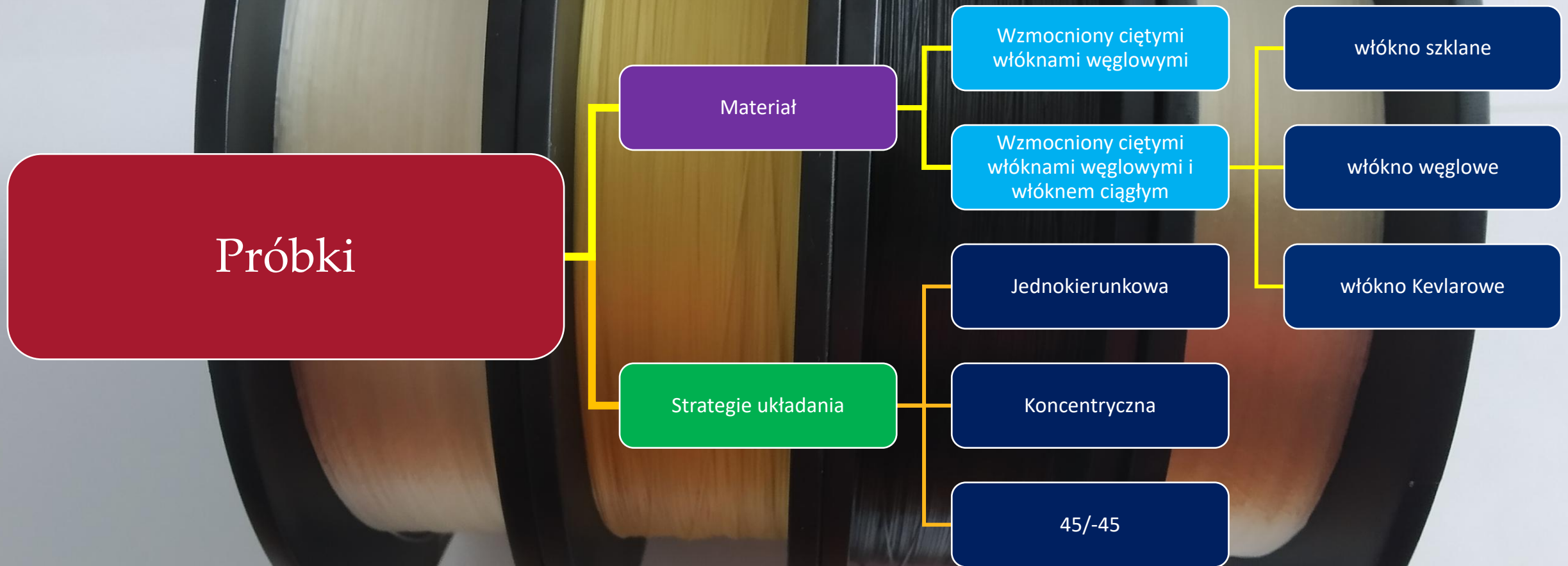
 Markforged

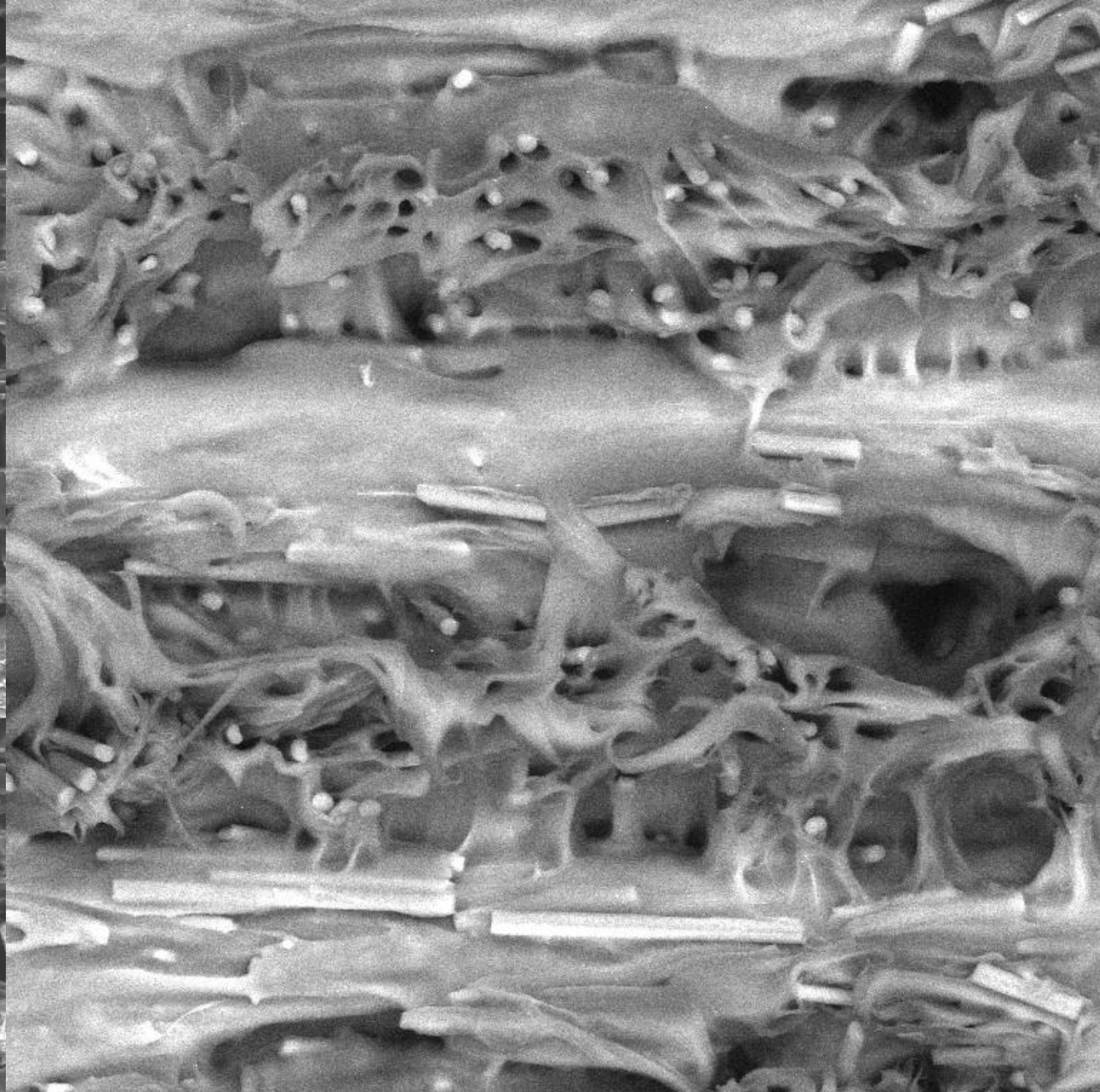
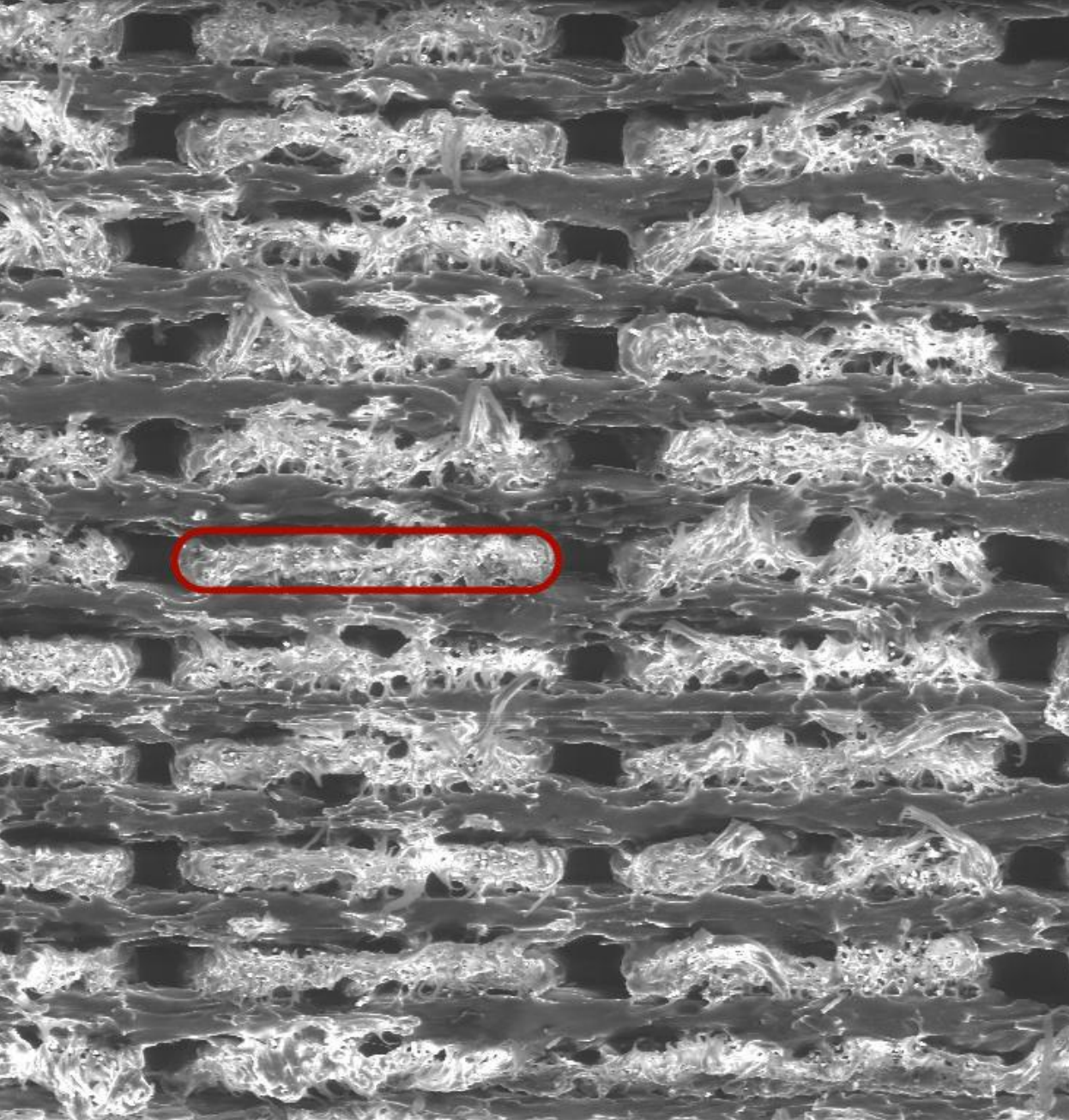


# Zasada metody Fused Filament Fabrication

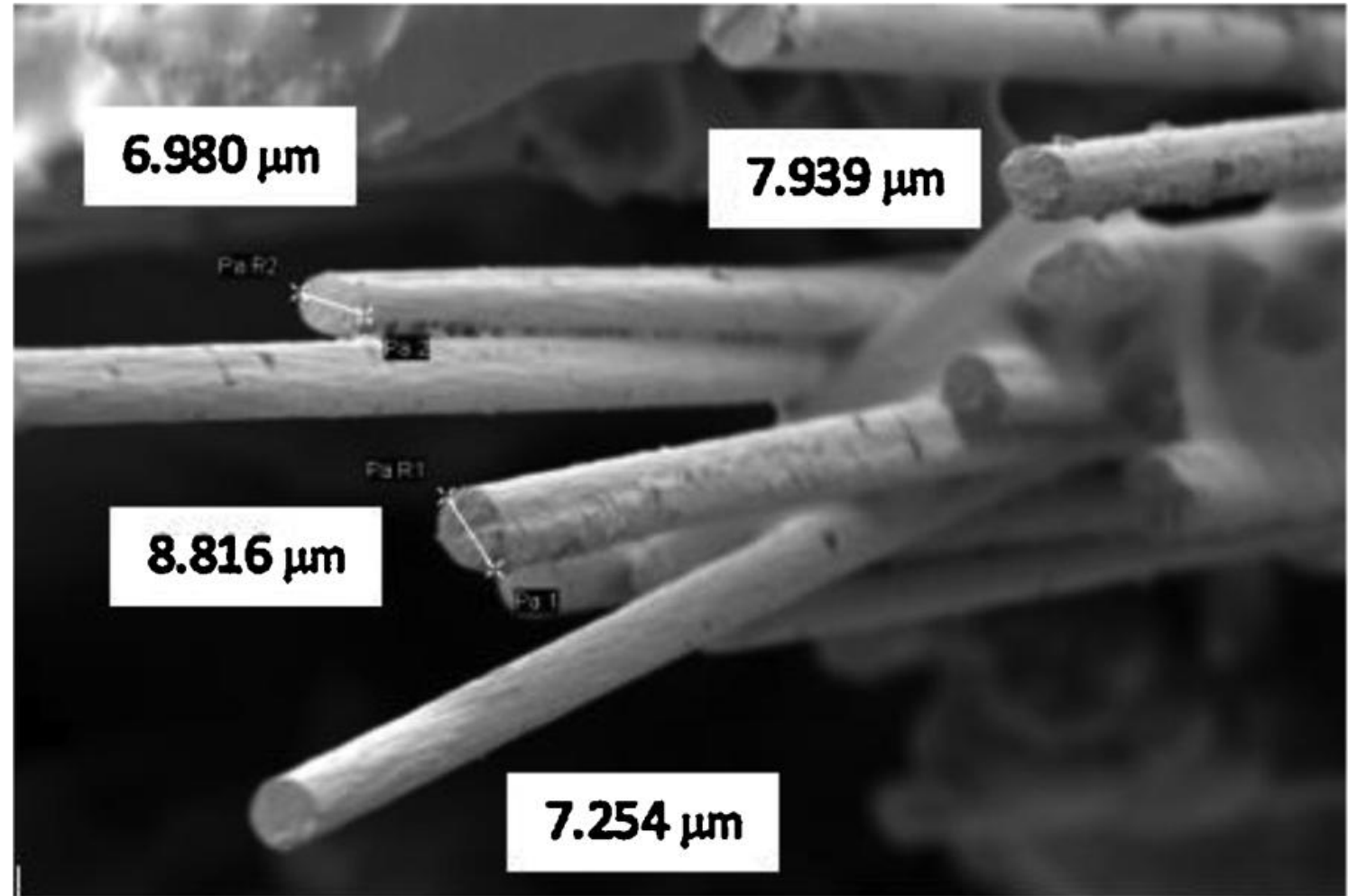


# Przegląd typów próbek

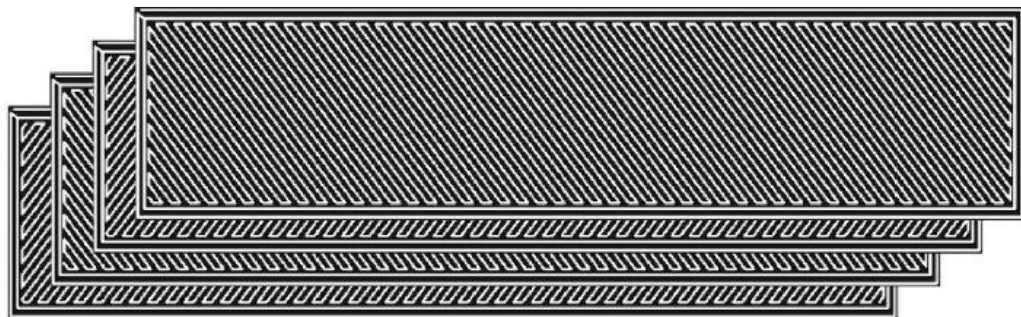




# Nylon wzmocniany ciętymi włóknami węglowymi



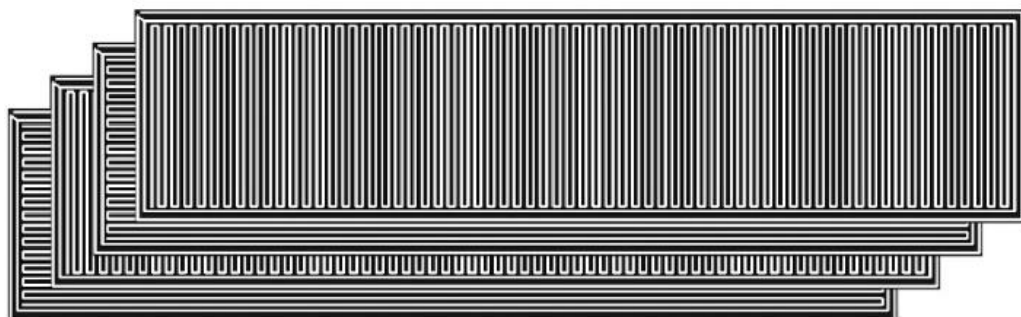
# Ułożenie materiału



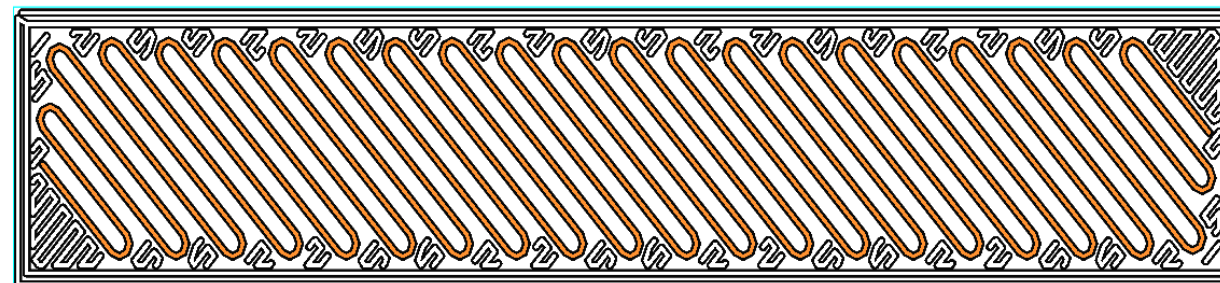
45/-45



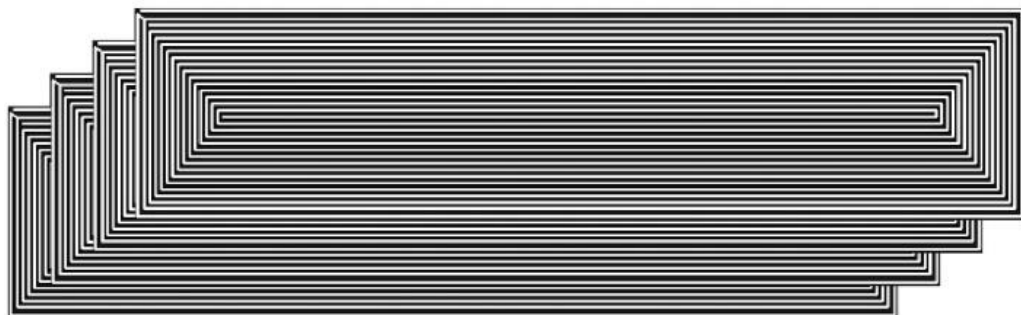
Jednokierunkowe



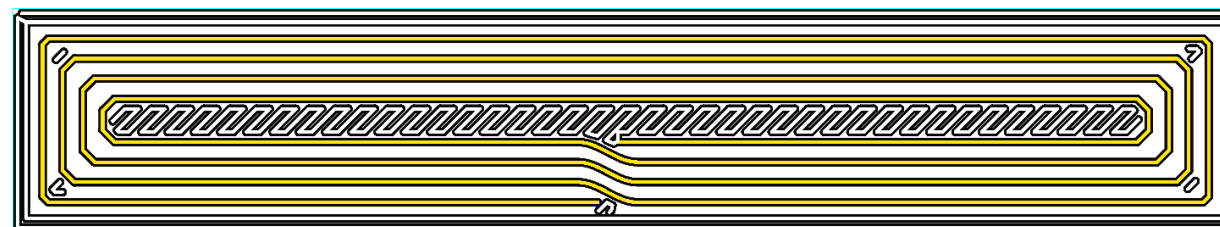
0/90



45/-45

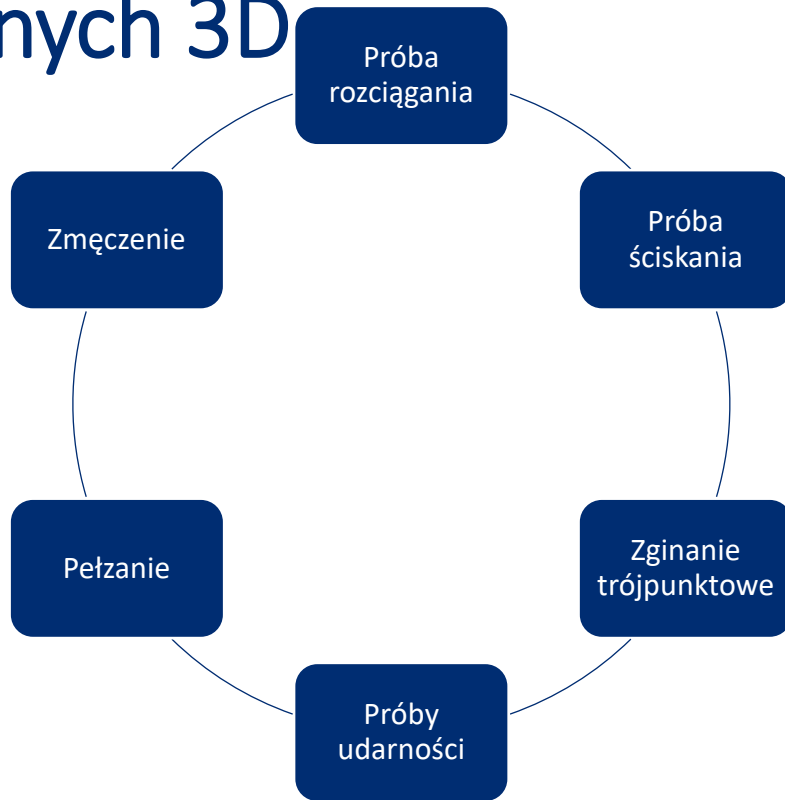


0



pierścienie koncentryczne

# Badania mechaniczne kompozytów drukowanych 3D



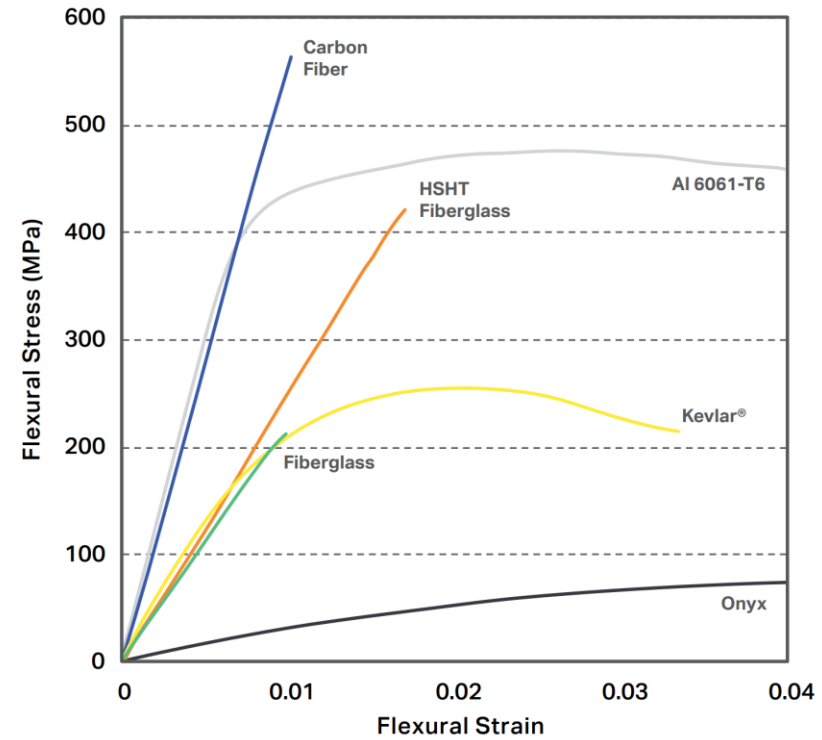
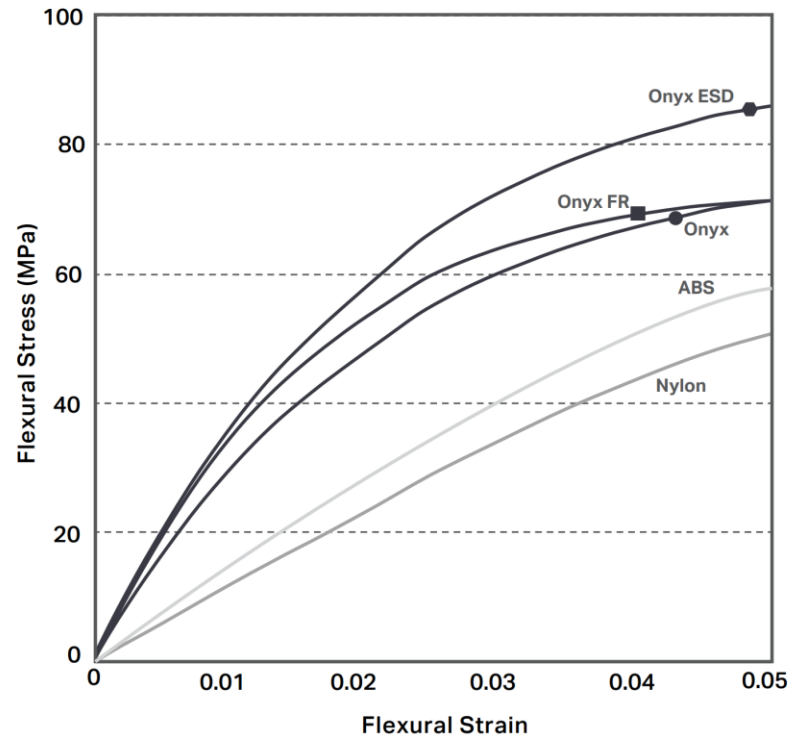
## Wyzwania badawcze

- anizotropia,
- orientacja włókien,
- wpływ warunków środowiskowych,
- brak norm.



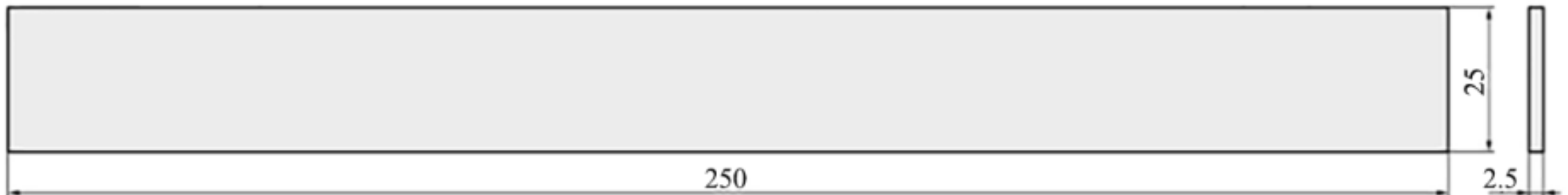
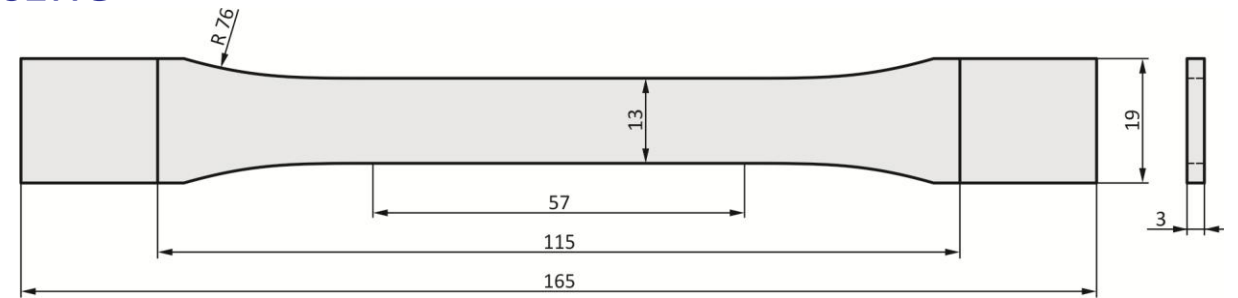
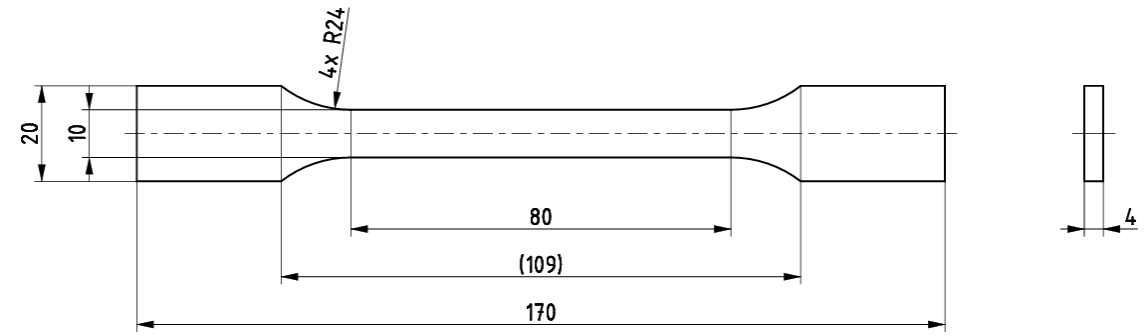
Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD	Nylon
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2	1.7
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52	51
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50	36
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25	150
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	71	71	83	50
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	3.0	3.6	3.7	1.4
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	138	41

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon	Carbon FR	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	760	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	57	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	1.6	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	540	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	51	50	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 <sup>1</sup>	1.2	1.6	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	420	300	130	180	216
Compressive Modulus (GPa)	D6641	62	59	25	24	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	0.5	1.5	—	0.8



# Próba rozciągania

- Opublikowano około 50 artykułów dotyczących badań rozciągania kompozytów FRTP wytwarzanych metodą FFF.
- Niektóre badania wskazują na problematyczne pękanie próbek.
- W wielu przypadkach brak informacji o rodzajach zniszczenia lub zdjęć próbek.
- Najczęściej stosowane geometrie próbek to geometrie określone w normach ASTM D3039 i ASTM D638.
- Norm nie należy stosować bezkrytycznie; należy wdrożyć dodatkowe środki w celu zapewnienia właściwego i reprezentatywnego zniszczenia próbki.



# Nylon z ciętymi włóknami węglowymi



ASTM D638

0 degrees



ISO/ASTM 52924



ASTM D638

45/-45 degrees

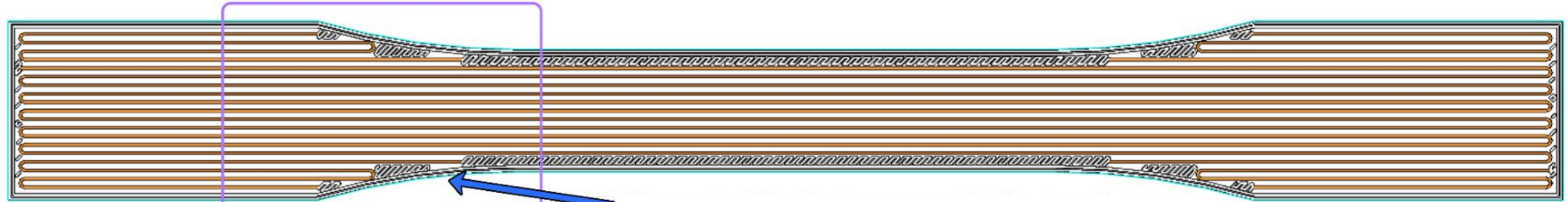
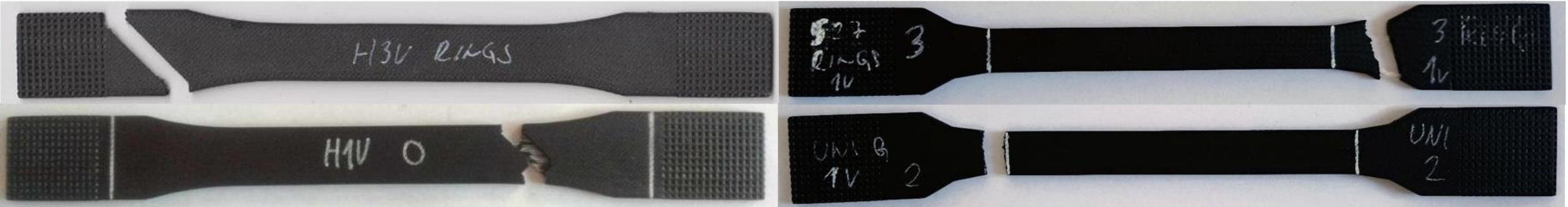
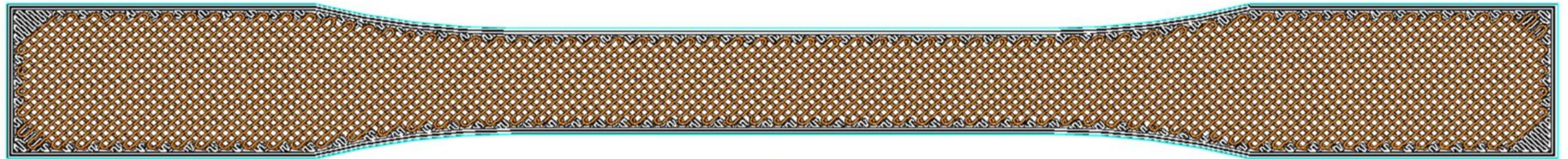
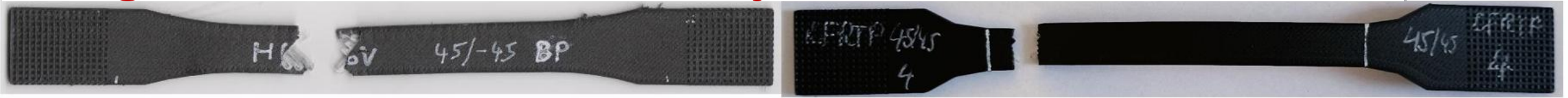


ISO/ASTM 52924



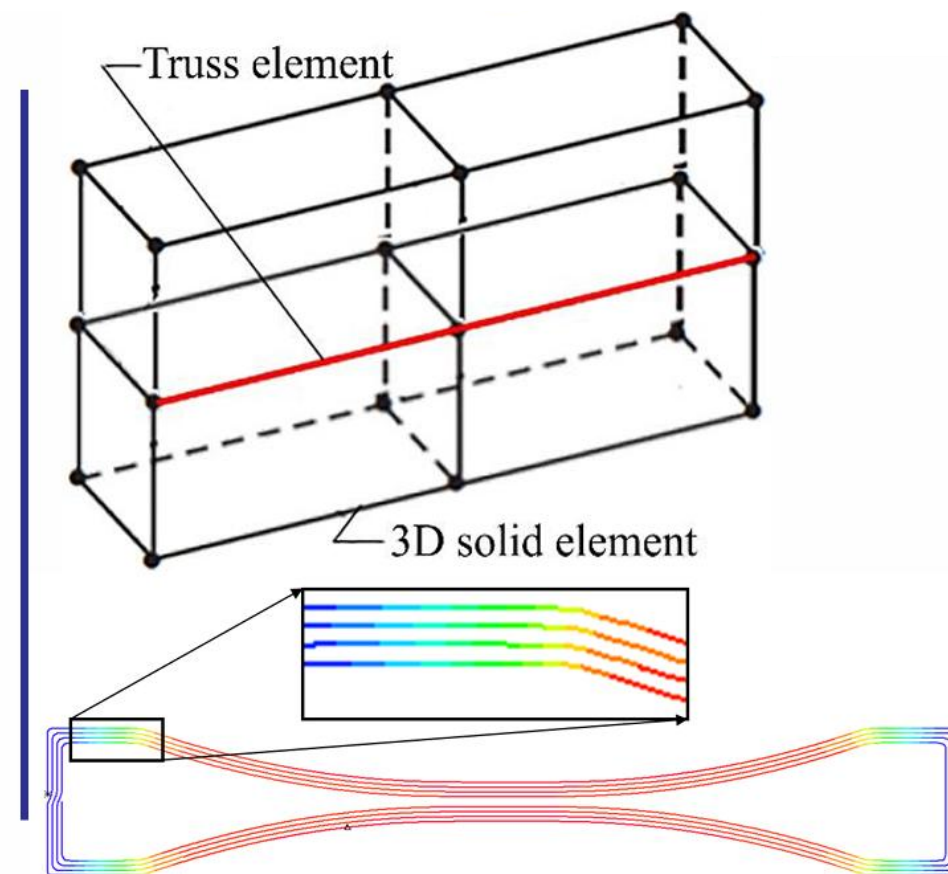
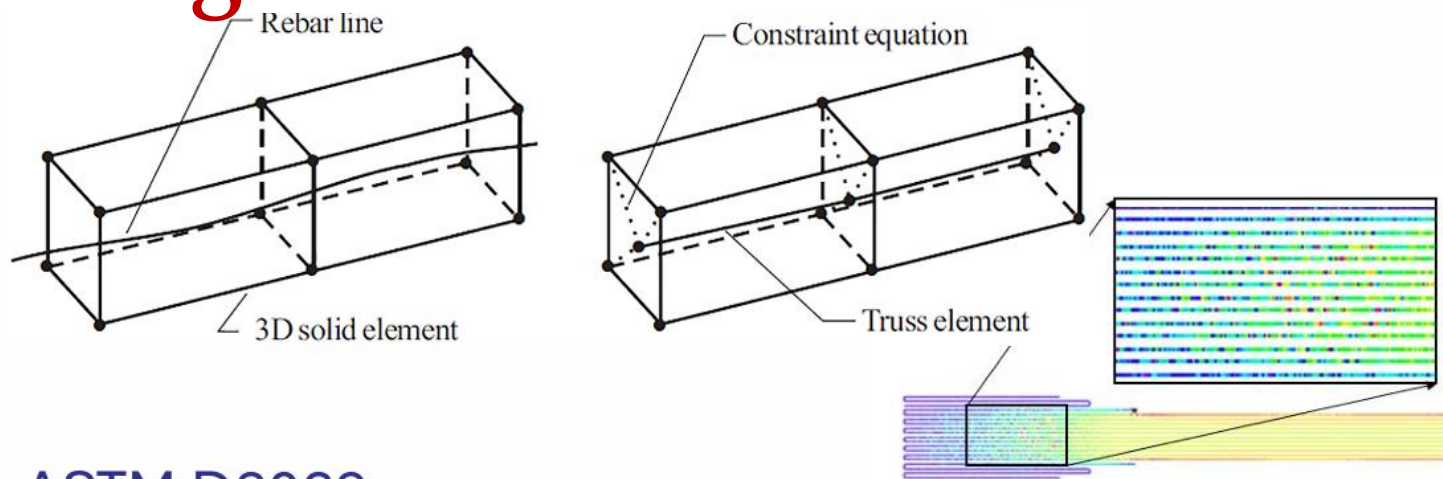
ASTM D3039

# Nylon z ciętymi włóknami węglowymi i długimi włóknami szklanymi

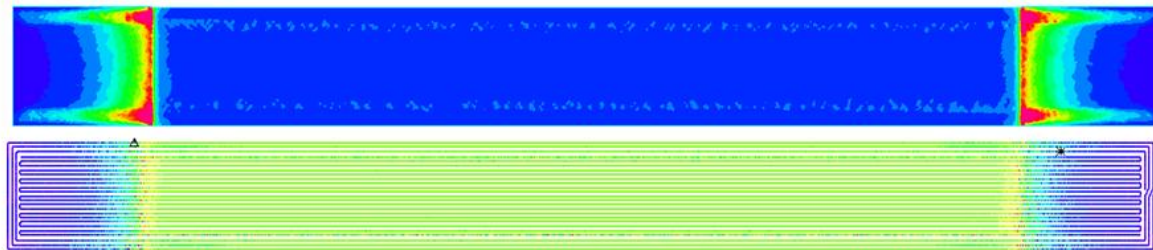


Najwięcej pęknięć występuje w sekcji zaokrąglenia.

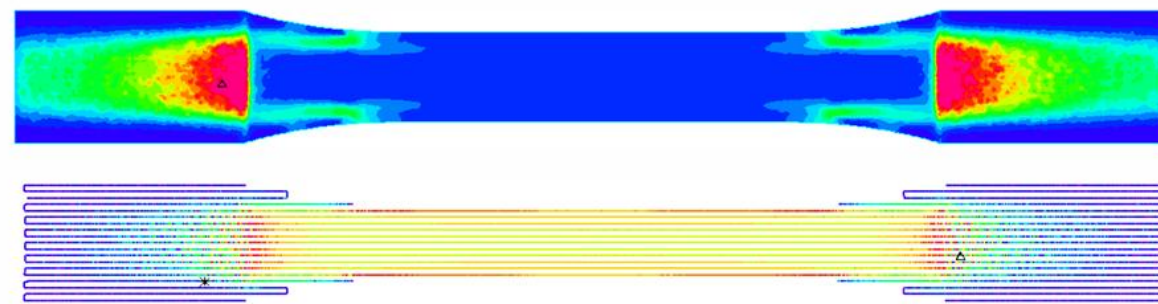
# Modelowanie MES kompozytów termoplastycznych z długimi włóknami



ASTM D3039



ASTM D638



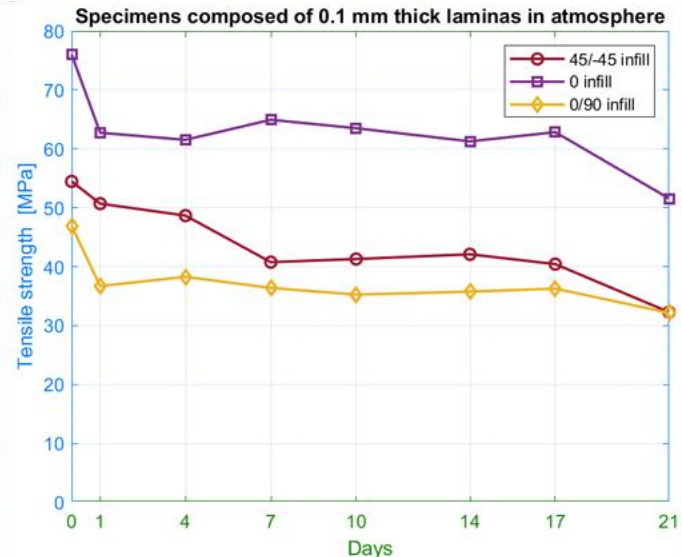
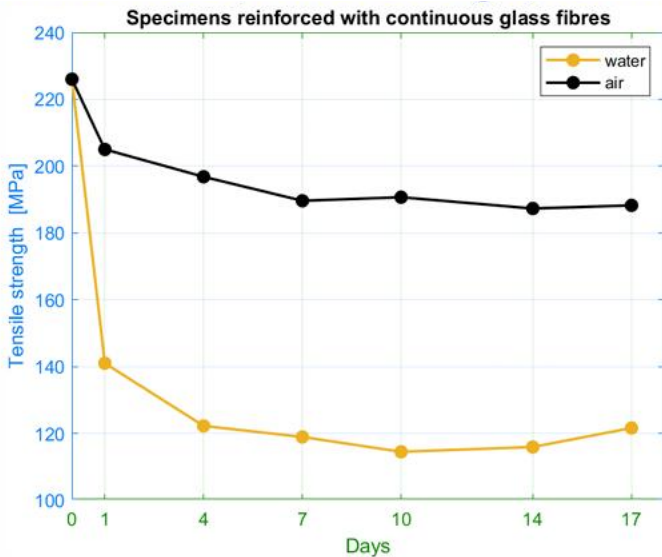
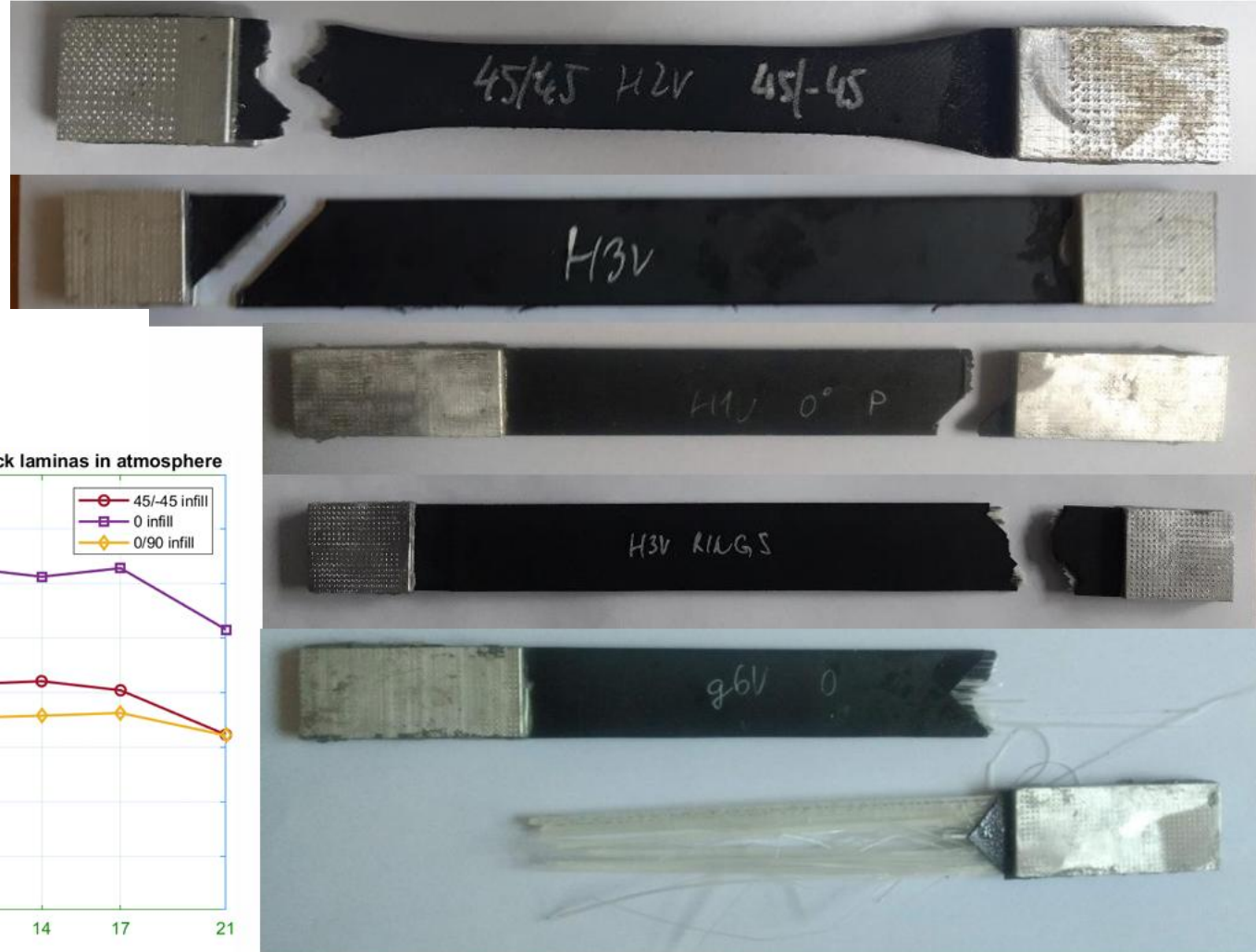
# Jak zapobiegać niepożądanym trybom zniszczenia?

Proponujemy trzy rozwiązania:

- 1) Pole przekroju poprzecznego obszaru uchwytu znacznie większe niż w wąskiej części pomiarowej.
- 2) Eliminacja ostrych naroży.
- 3) Zwiększenie promienia zaokrąglenia.

## A) Nakładki

Wady: materiał nakładek, typ kleju, grubość kleju, projekt nakładek, czas utwardzania kleju.



## B) Zwężenia

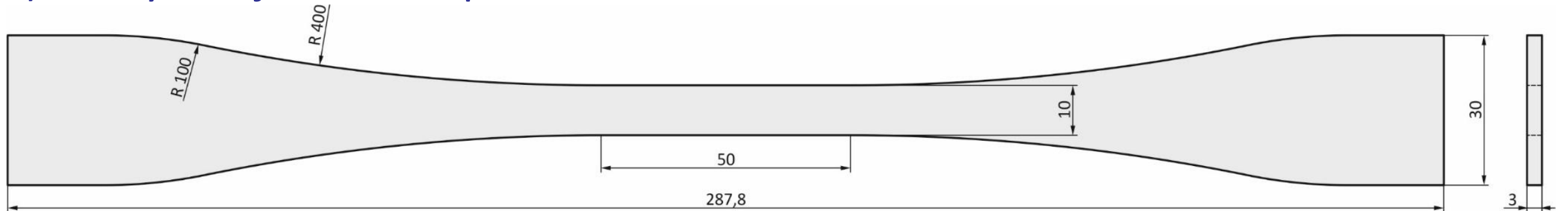
Wady: konieczność stosowania struktur podporowych i ich późniejszego usuwania, zwiększone zużycie materiału, ryzyko przesuwania się laminy podczas badania.



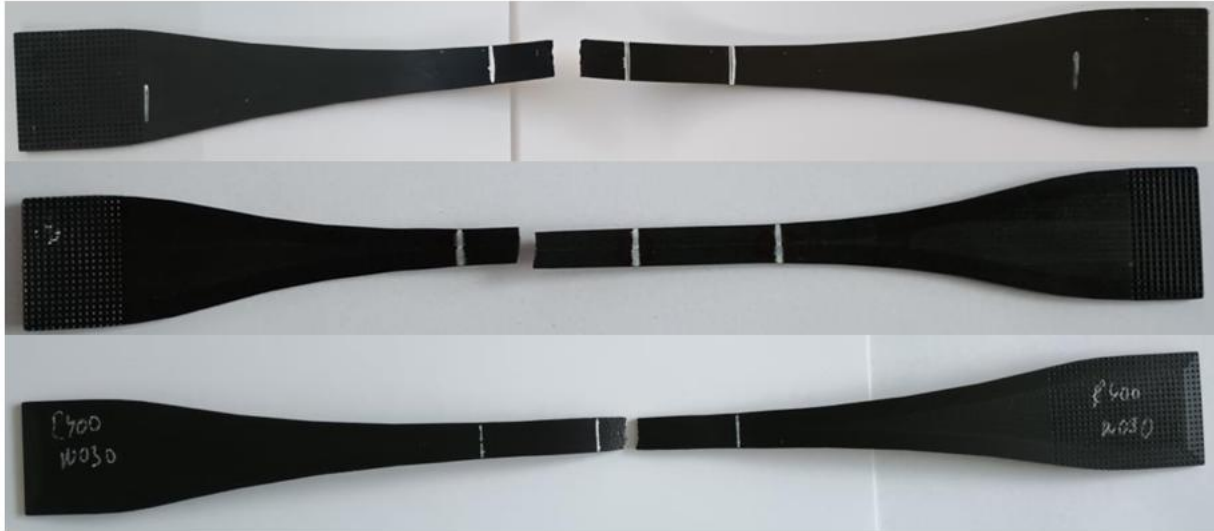
Widok z boku



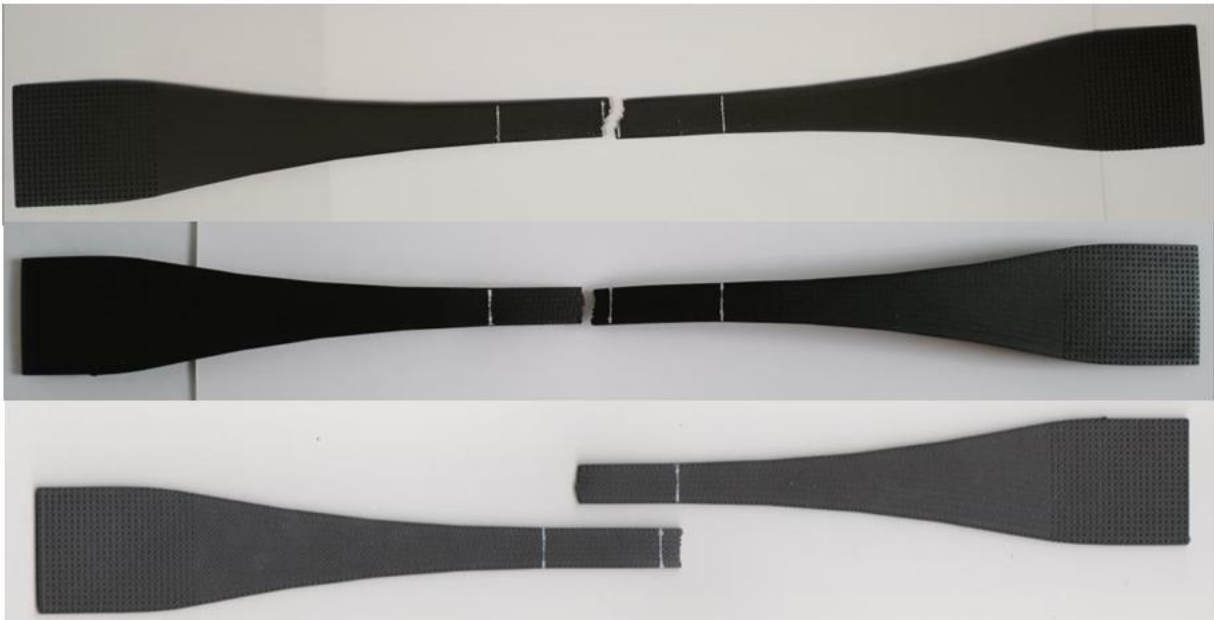
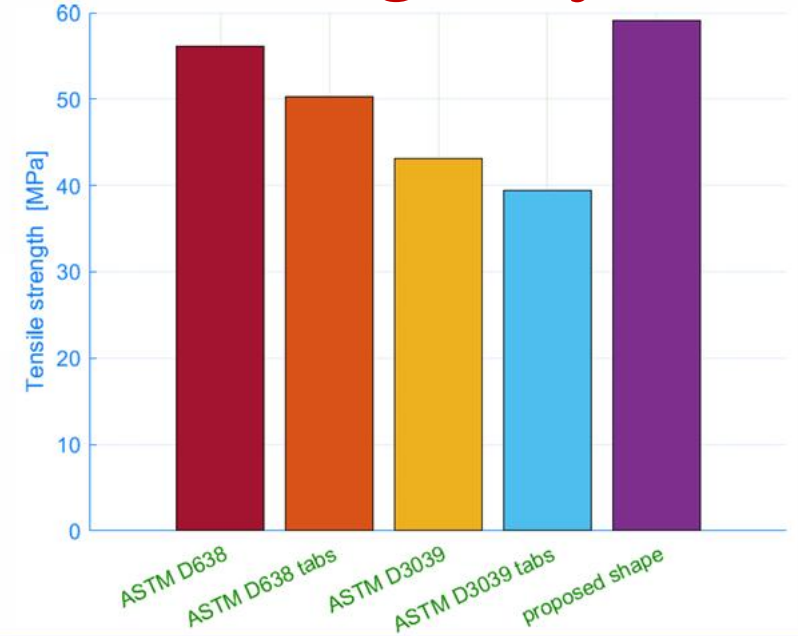
## C) Modyfikacja kształtu próbki



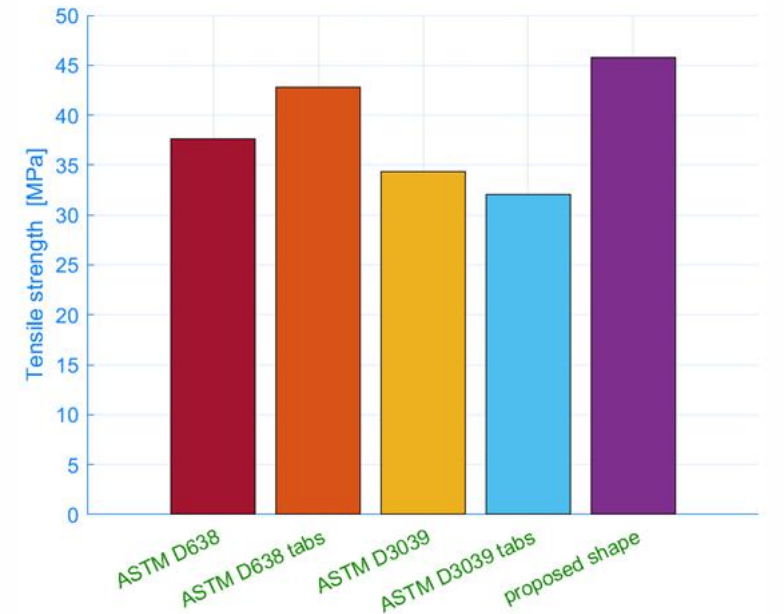
# Wyniki – nylon wzmocniany ciętymi włóknami węglowymi



0 stopni

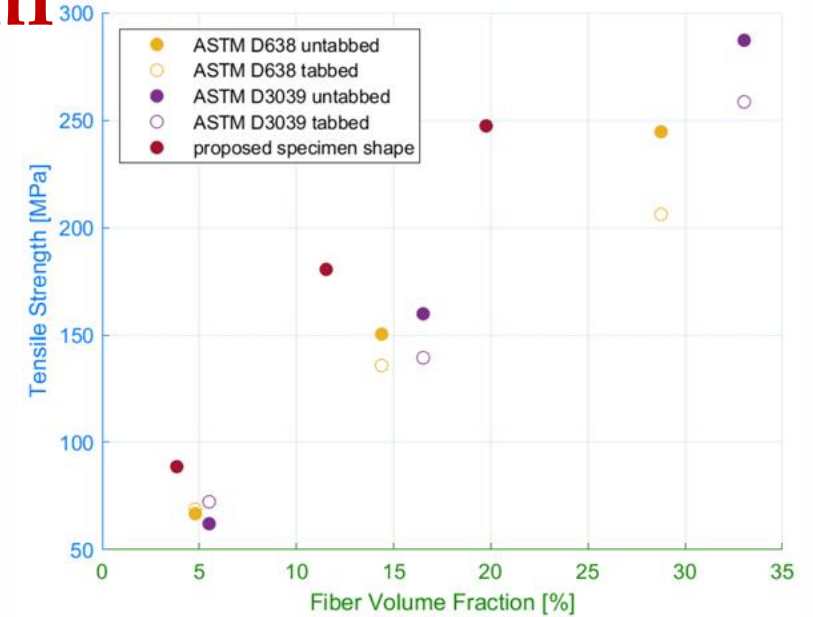


45/-45  
stopni

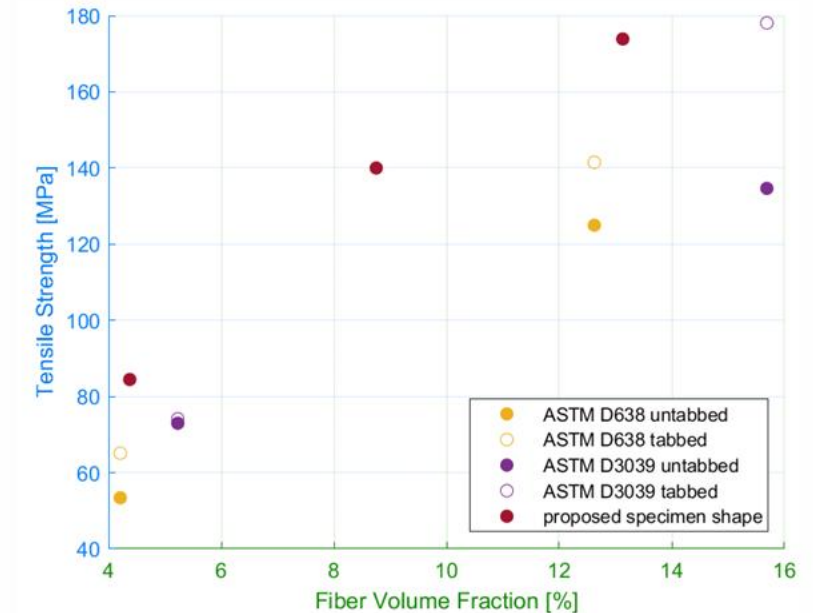
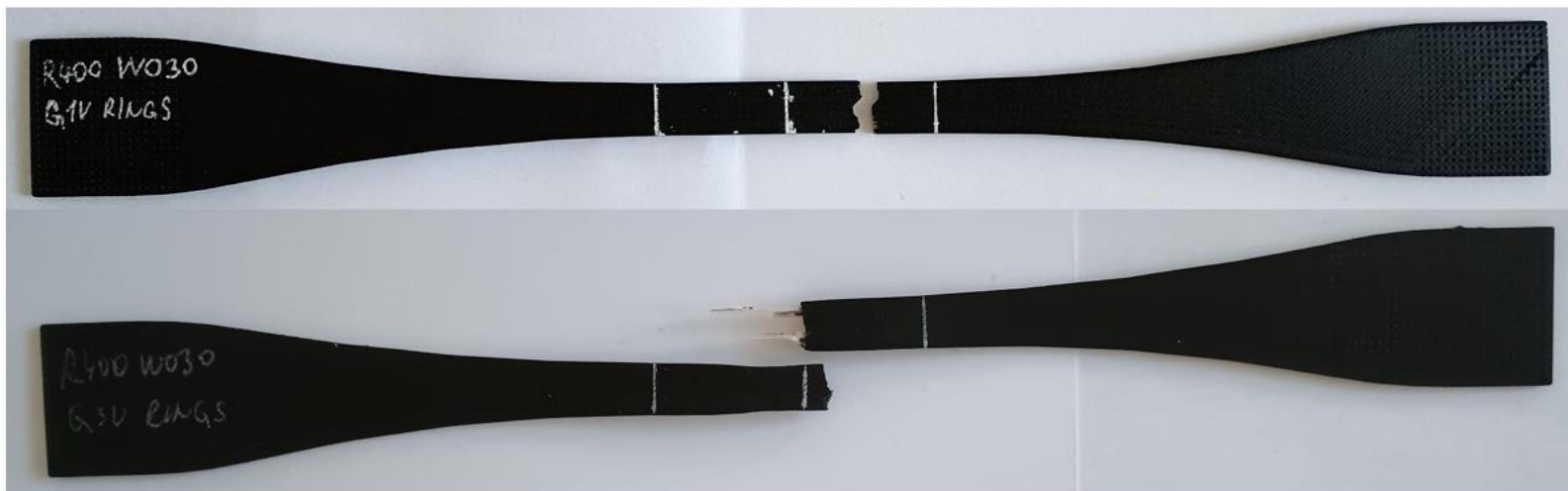


# Wyniki – nylon wzmocniany ciętymi włóknami węglowymi i długimi włóknami szklanymi

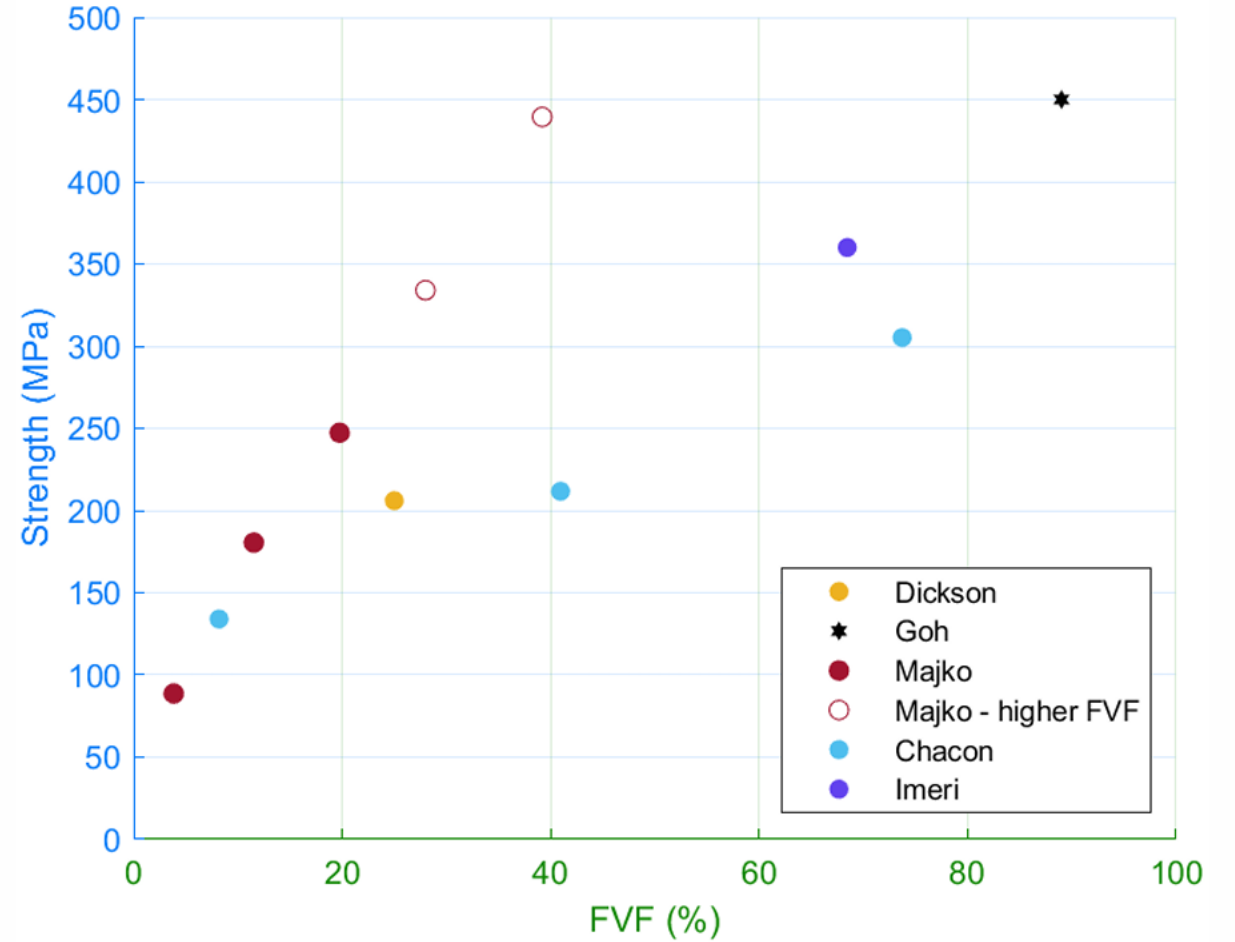
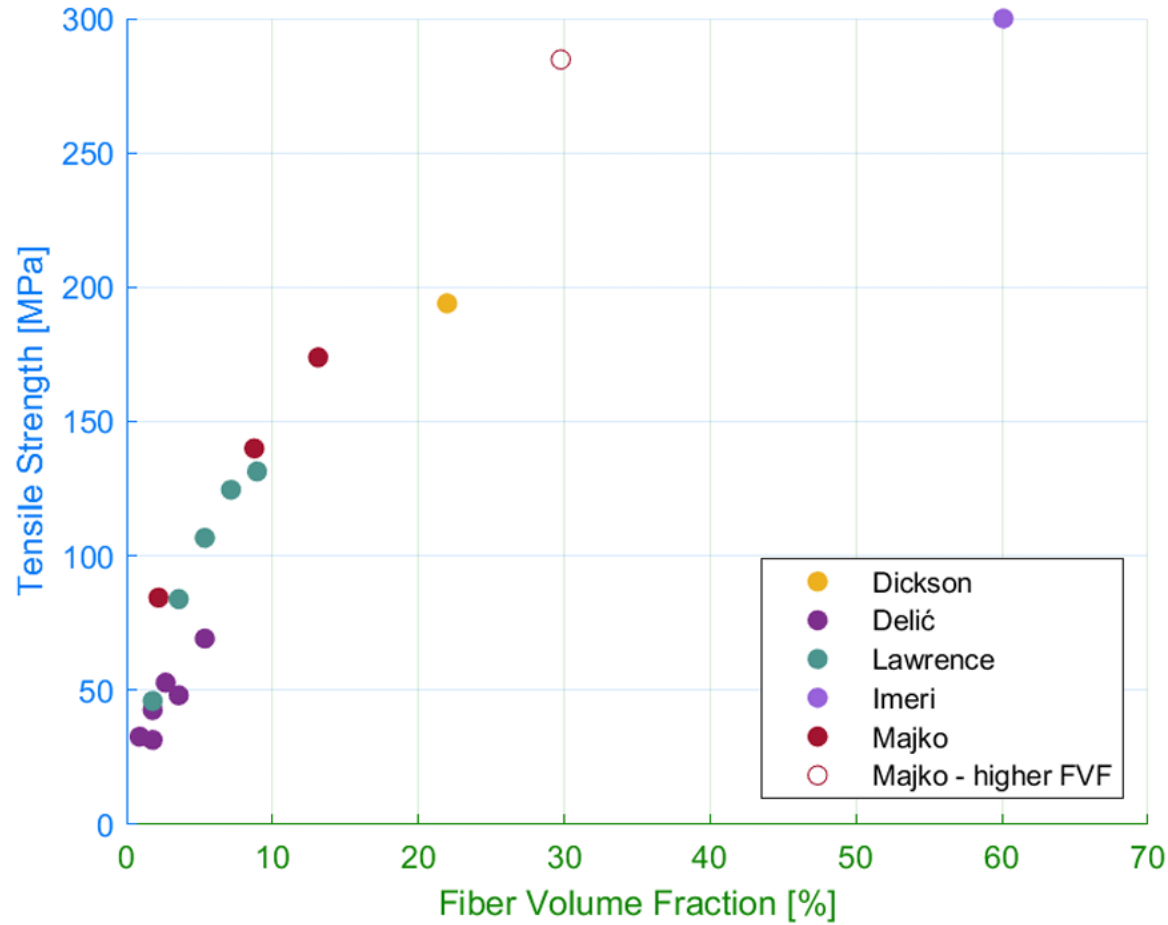
## Ułożenie jednokierunkowe



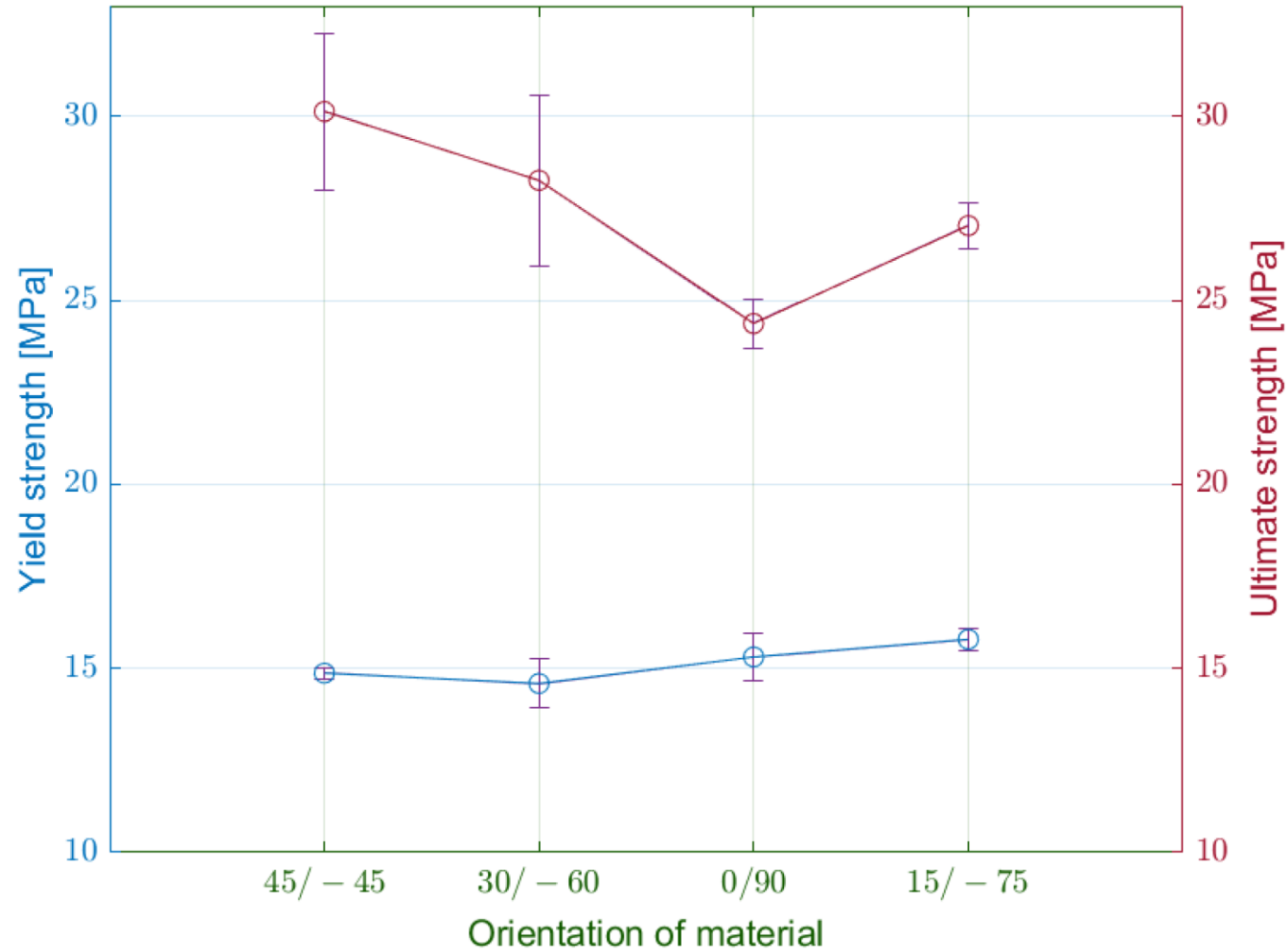
## Pierścienie koncentryczne



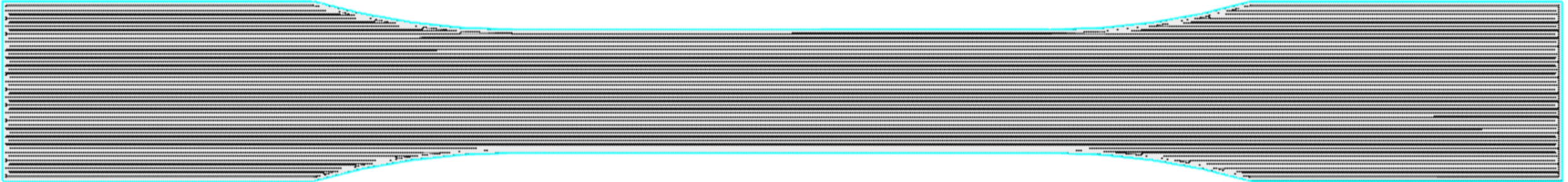
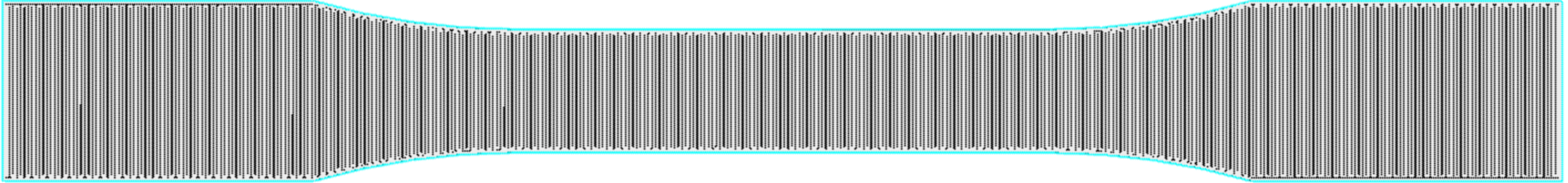
# Porównanie wyników z innymi badaniami



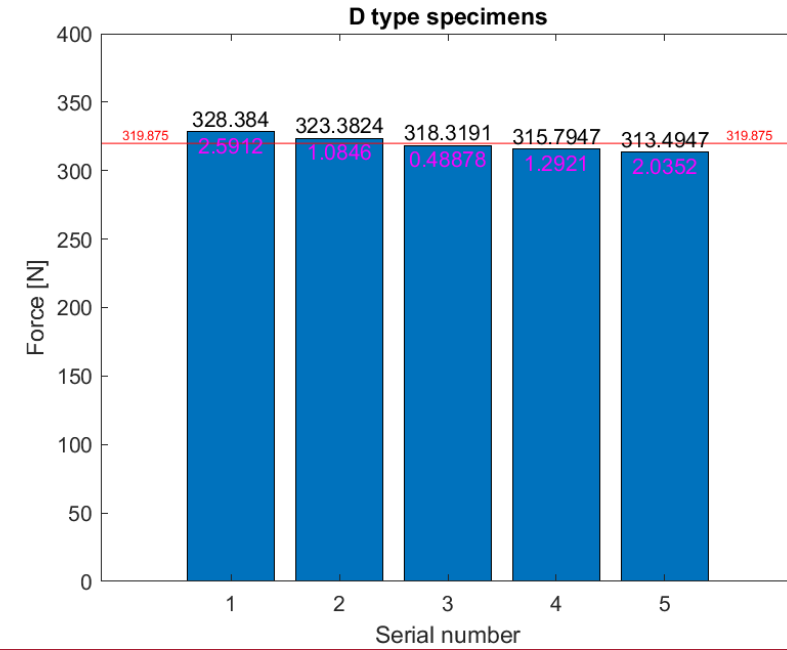
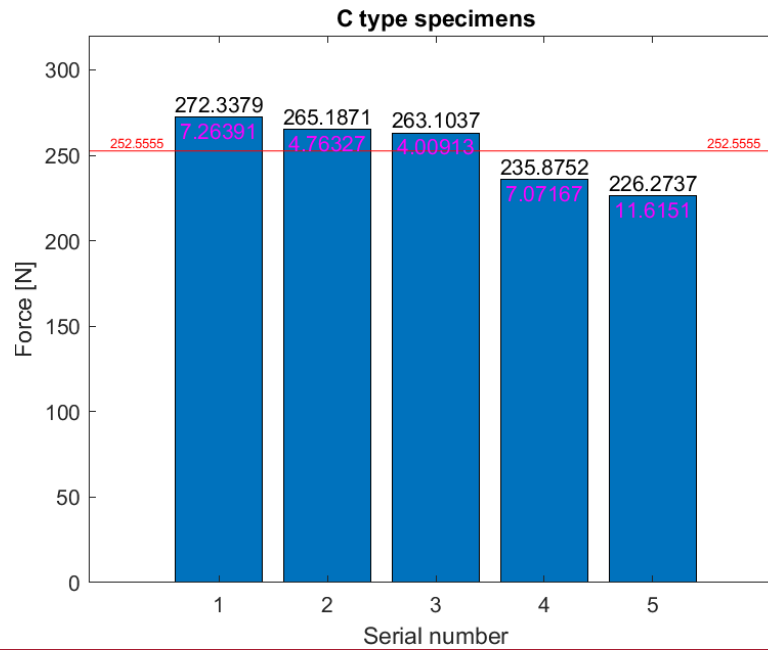
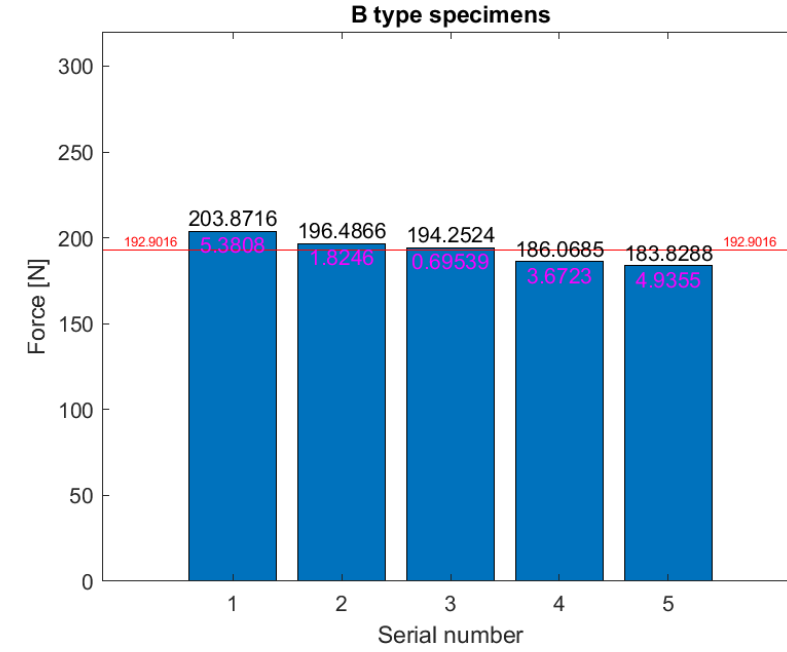
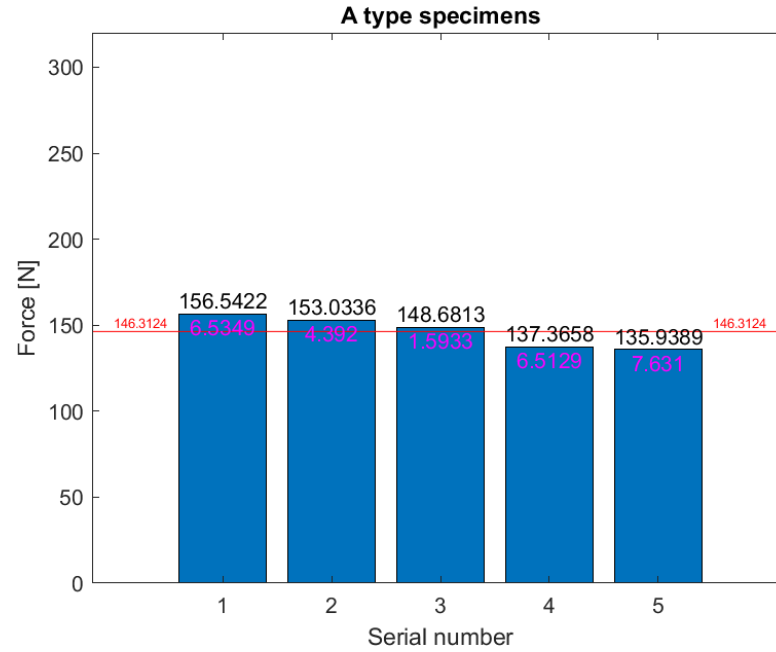
# Wyniki próby rozciągania próbek z nylonu wzmocnianego ciętymi włóknami węglowymi – ASTM D638



<b>Parametr</b>	<b>Wartość</b>
<b>Grubość warstwy [mm]</b>	<b>0.1, 0.125, 0.2</b>
<b>Płaszczyzna bazowa próbki</b>	<b>XY</b>
<b>Typ wzmocnienia</b>	<b>Włókna cięte</b>
<b>Materiał wzmocnienia</b>	<b>Węgiel</b>
<b>Ułożenie włókien wzmacniających [stopnie]</b>	<b>0/90</b>
<b>Liczba ścian</b>	<b>2</b>
<b>Gęstość wypełnienia [%]</b>	<b>100</b>
<b>Typ wypełnienia</b>	<b>Pełne wypełnienie</b>
<b>Warstwy górne i dolne</b>	<b>1</b>
<b>Całkowita liczba warstw</b>	<b>5, 7, 9, 11</b>



# Wyniki



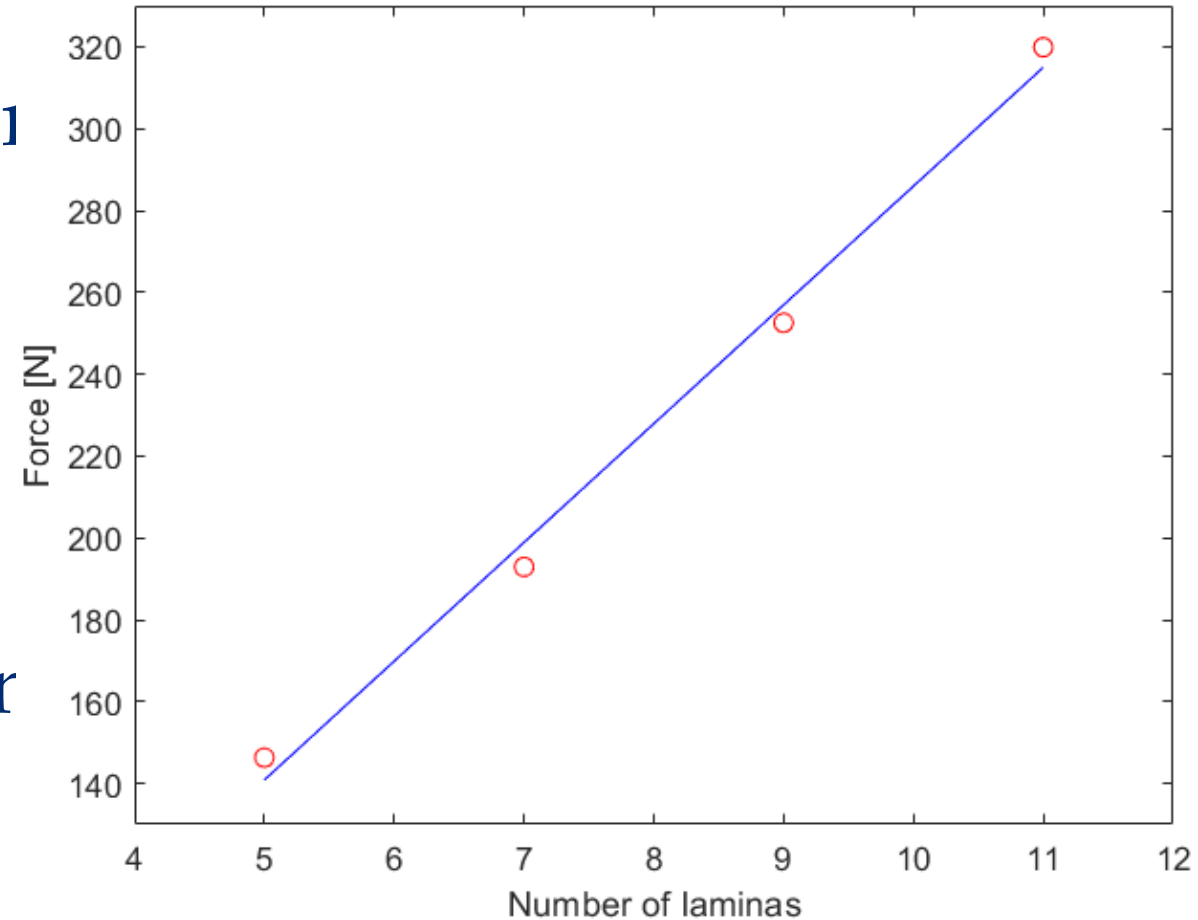
# Analiza korelacji

- Wykres rozrzutu
- Linia trendu opisana równaniem liniowym:

$$y = 29.017 * x - 4.2247$$

$$R^2 = 0.9936$$

- Współczynnik korelacji Pearsora  
 $r = 0.9968$



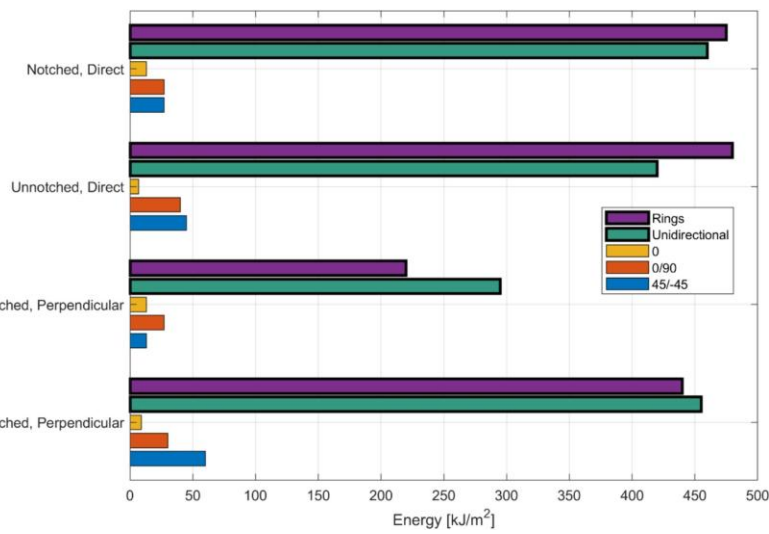
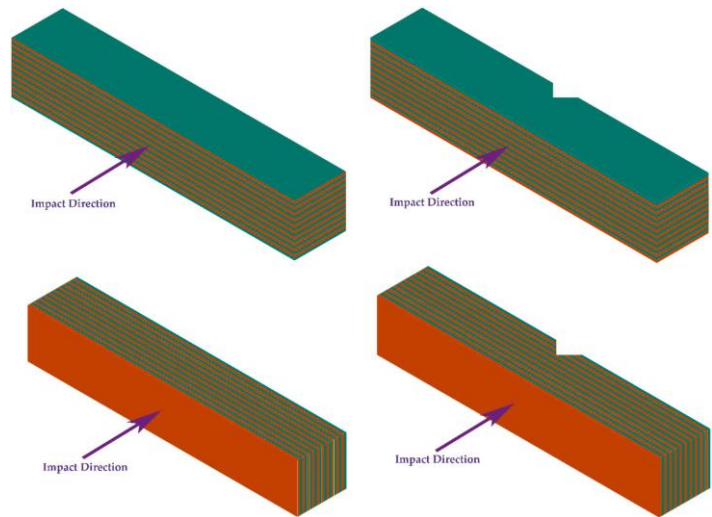
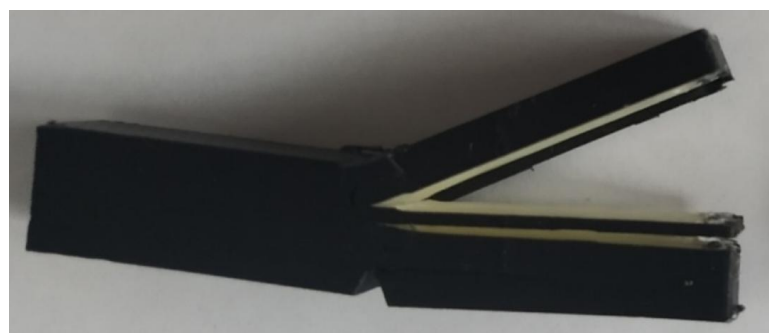
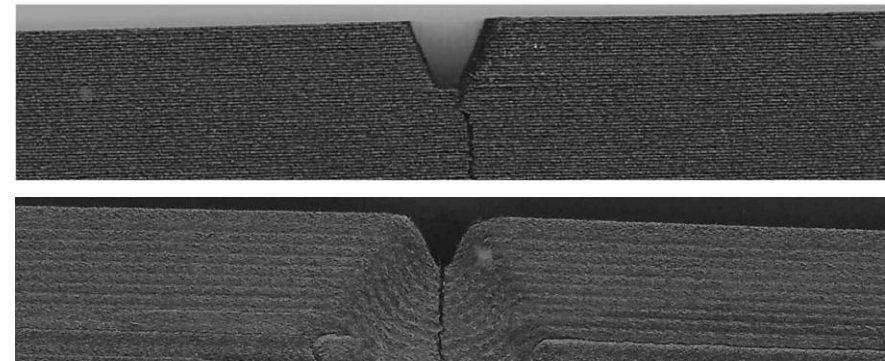
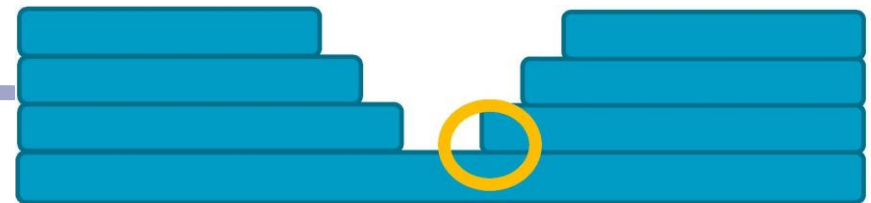
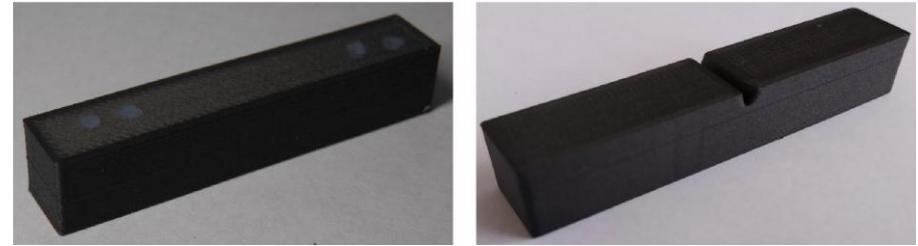
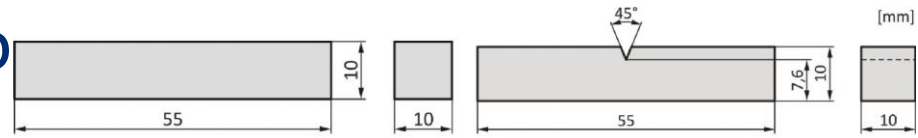
# Granica plastyczności laminy

Obliczenia wytrzymałości lamin przeprowadzono przy użyciu następującego równania:

$$P_{laminata} = x * P_0 + y * P_{90}$$

Grubość laminy [mm]	$P_0$ [N]	$P_{90}$ [N]	$\sigma_0$ [MPa]	$\sigma_{90}$ [MPa]
<b>0.1</b>	<b>38.81</b>	<b>20.56</b>	<b>29.85</b>	<b>15.81</b>
<b>0.125</b>	<b>43.10</b>	<b>29.62</b>	<b>26.52</b>	<b>18.23</b>
<b>0.2</b>	<b>79.09</b>	<b>46.69</b>	<b>30.42</b>	<b>17.96</b>

# Próba udarności Charpy'ego



# Dziękuję