

# Súčasný trendy v aditívnej výrobe vláknami vystužených kompozitov

**Interreg**



Spolufinancovaný  
EURÓPSKOU ÚNIOU

**Poľsko – Slovensko**

**SPÁJAME REGIÓŇ BESKYDY PROSTREDNÍCTVOM TECHNICKÉHO VZDELÁVANIA  
ŁĄCZYMY REGION BESKIDÓW POPRZEZ 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



# Ciel'

- Prehľad základných metód 3D tlače vrátane opisu princípov činnosti, výhod a obmedzení jednotlivých technológií.
- Prehľad praktických aplikácií 3D tlače (automobilový priemysel, letectvo a kozmonautika, výroba nástrojov).
- Konštrukčné zásady pre 3D tlačené diely (vplyv orientácie tlače na pevnosť a správanie materiálu).
- Možnosti výroby vláknami vystužených termoplastických kompozitov pomocou 3D tlače.
- Podrobný opis tlačiarne Markforged Mark Two vrátane praktickej ukážky zariadenia.
- Práca v slicovacom softvéri - nastavenie parametrov tlače pre nylon vystužený sekanými uhlíkovými vláknami a spojitými sklenenými, uhlíkovými a kevlarovými vláknami.
- Realizácia vybraných experimentálnych meraní na vytlačených vzorkách v laboratórnych podmienkach.
- Prezentácia aktuálnych výsledkov výskumu na pracovisku.

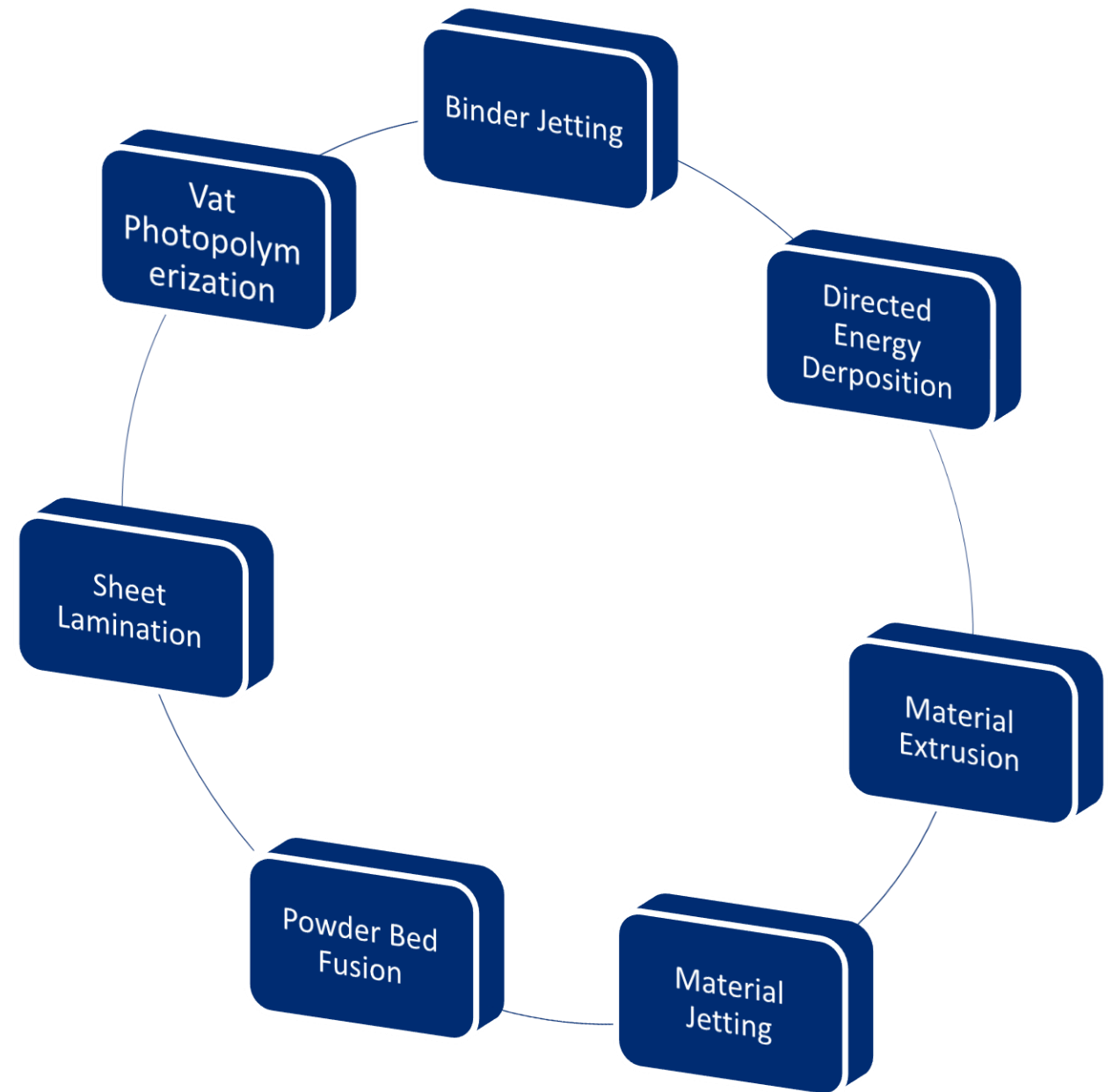
Pojmy súvisiace s aditívnou výrobou sú bližšie špecifikované v norme ASTM/ISO 52900.

## Aditívna výroba

„Proces spájania materiálov na vytváranie dielov z 3D modelových dát, zvyčajne vrstvu po vrstve, na rozdiel od subtraktívnych a formatívnych výrobných technológií.“

## 3D tlač

„Výroba objektov ukladaním materiálu pomocou tlačovej hlavy, dýzy alebo inej tlačovej technológie“

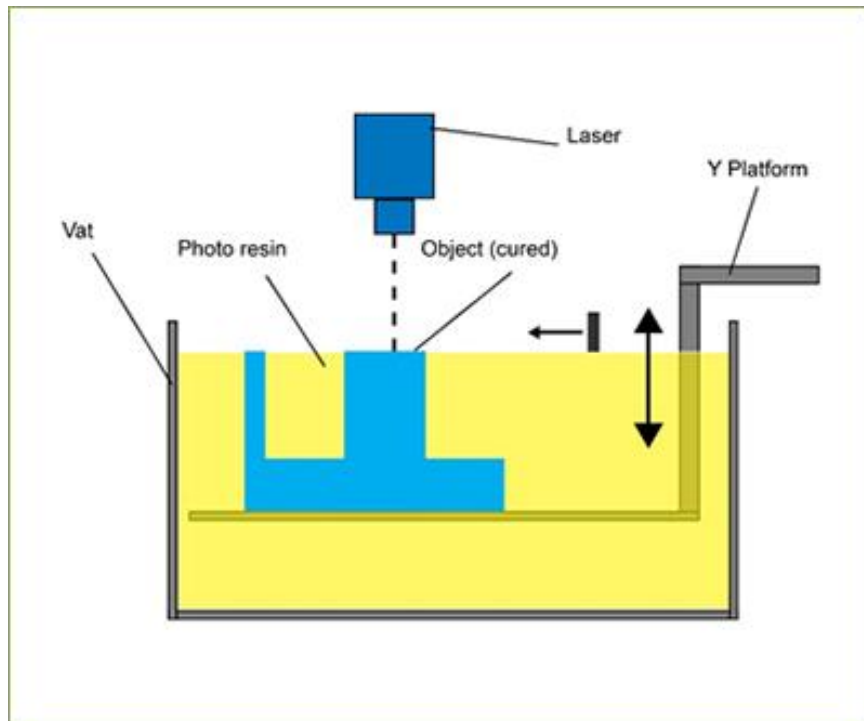


# Fotopolymerizácia

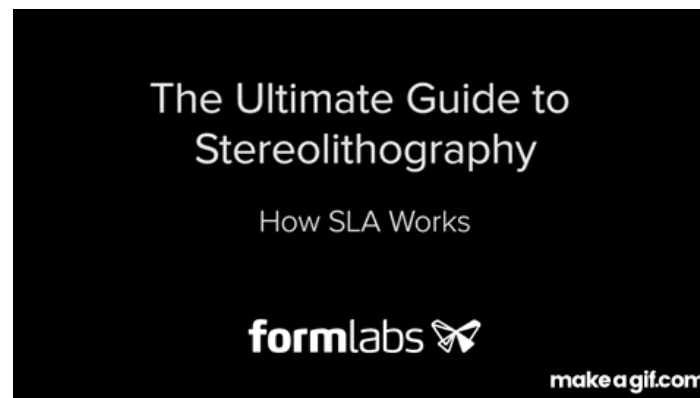
„Proces, pri ktorom sa kvapalný fotopolymér v nádrži selektívne vytvrdzuje polymerizáciou aktivovanou svetlom.“

Výrobný proces:

- 1) Kvapalná fotopolymérna živica sa naleje do nádrže.
- 2) Zdroj UV žiarenia selektívne ožiari požadovanú oblasť.
- 3) Ožiarená živica v mieste dopadu svetla polymerizuje (vytvrdne).
- 4) Proces sa opakuje vrstvu po vrstve, až kým nevznikne celý diel.



- + veľmi vysoká presnosť a rozlíšenie detailov,
- + hladký povrch (nízka drsnosť),
- + vhodné pre malé a zložité geometrie.
- materiály sú krehkejšie,
- vyžaduje sa následné spracovanie,
- živica je citlivá na svetlo a podmienky skladovania.



Súčasný trendy výskumu:

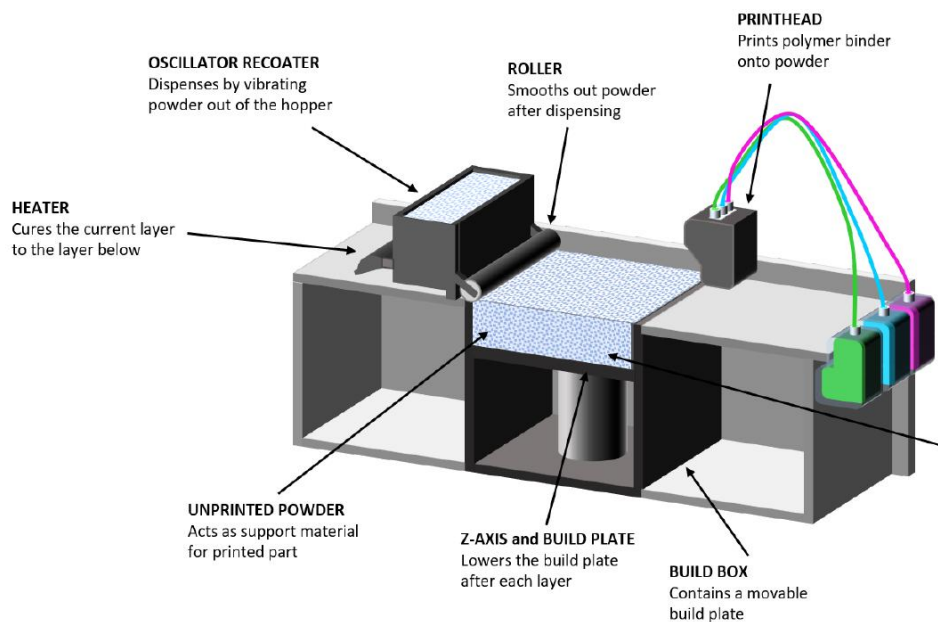
- vývoj nových živíc,
- zvyšovanie rýchlosti tlače,
- multimateriálová tlač,
- tlač mikro- a nanoštruktúr.

# Binder Jetting

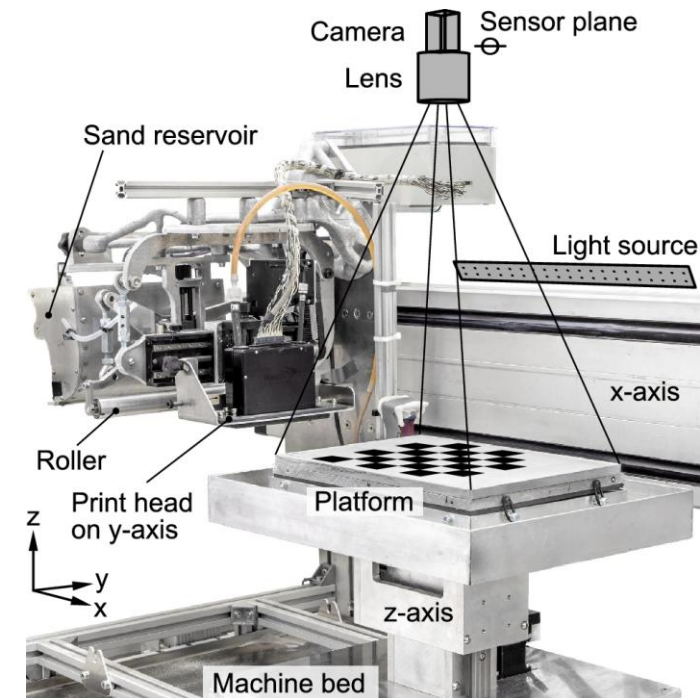
„Proces, pri ktorom sa kvapaln  spojivo selektívne nan sa na spájanie pr skov ch materiálov“

V robn  proces:

- 1) Na stavebn  platformu sa rozprestrie tenk  vrstva pr sku (kov, keramika, piesok).
- 2) Tla ov  hlava selektívne nanese spojivo v miestach, kde sa má vytvoriť diel.
- 3) Vrstva sa spojí iba v požadovaných oblastiach.
- 4) Proces sa opakuje vrstvu po vrstve.



- + možnosť tlačiť viac dielov naraz,
- + nie sú potrebn  podporn  štruktúry,
- + relatívne nízke v robn  náklady.
- n i sa presnosť v porovnaní s niektorými inými technológiami 3D tlače,
- v žaduje n sledn  spracovanie (spekanie),
- n i sa pevnosť bez dodatočného spracovania.



S časn  trendy výskumu:

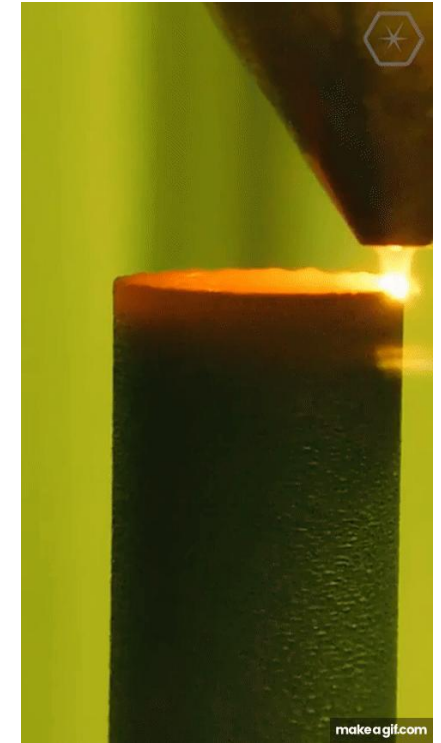
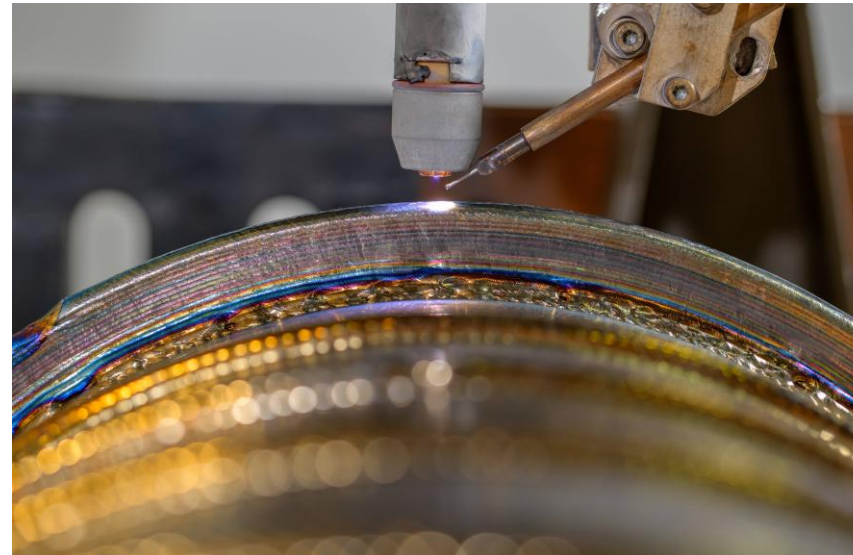
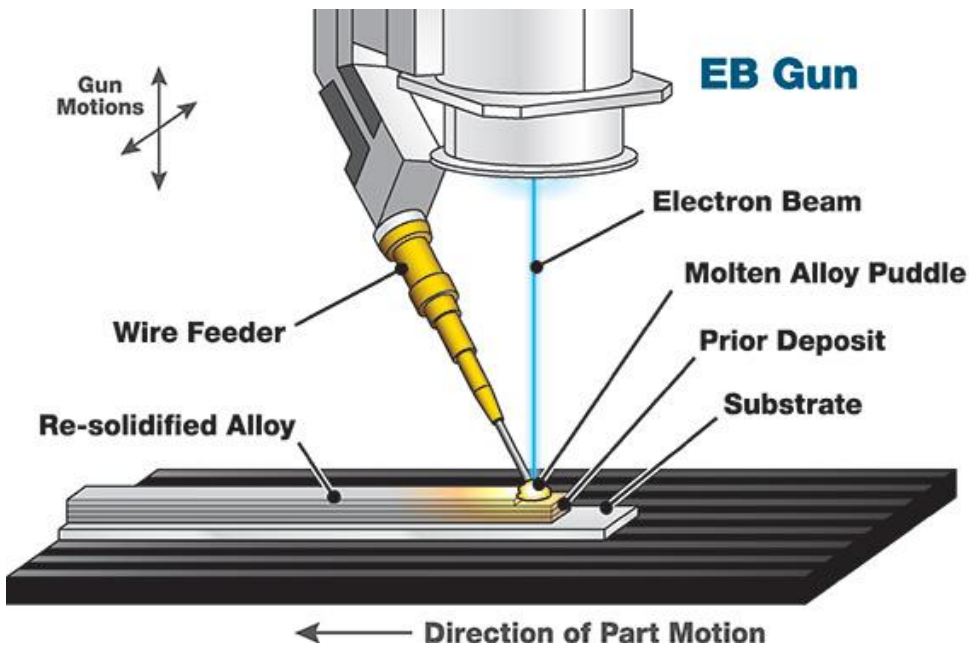
- vývoj nových spojív,
- vplyv parametrov tlače na materi lov  vlastnosti,
- zmrštenie počas spekania,
- zlepšenie medzivrstvovej pevnosti.

# Direct Energy Deposition

„Proces, pri ktorom sa sústredená tepelná energia používa na spájanie materiálov tavením počas ich nanášania.“

Výrobný proces:

- 1) Materiál (prášok alebo drôt) sa kontinuálne privádza do pracovnej oblasti.
- 2) Zdroj energie (laser, elektrónový lúč alebo plazma) vytvorí na povrchu substrátu lokálny tavný kúpeľ.
- 3) Privádzaný materiál sa v tavnom kúpeli roztaví a spojí so substrátom.
- 4) Tavenina stuhne a proces sa opakuje vrstvu po vrstve.



- + možnosť opráv a repasovania dielov,
- + dobré medzivrstvové spojenie,
- + možnosť multimateriálovej tlače.
- nižšia presnosť a kvalita povrchu,
- vznik defektov,
- drahé zariadenie a prevádzka.

Aktualne trendy badawcze:

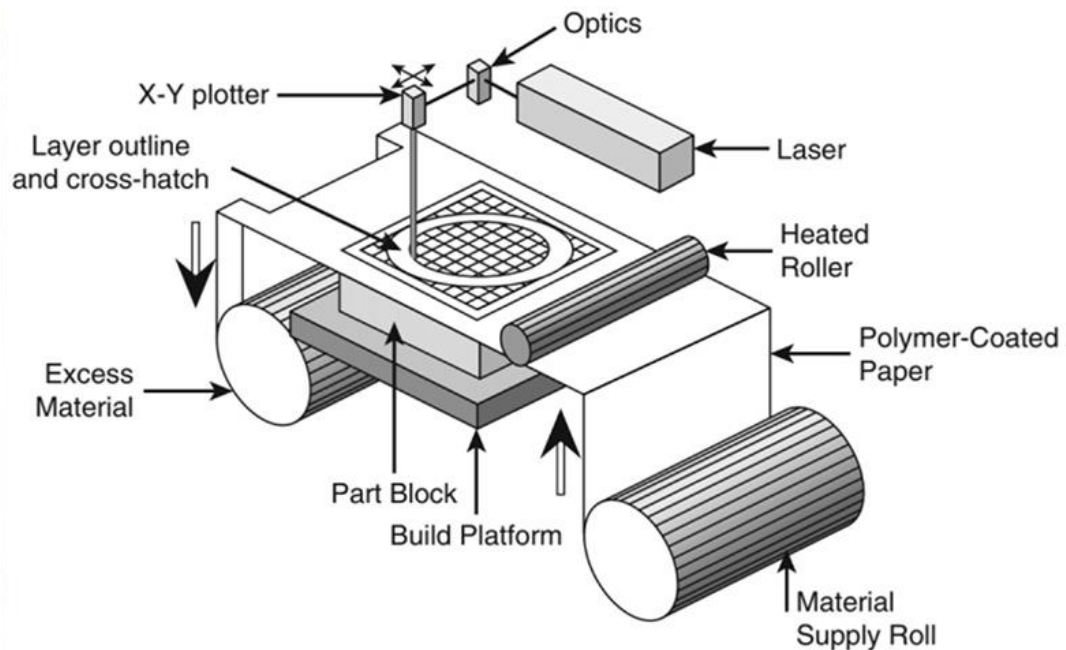
- dynamika tavného kúpeľa,
- zmeny materiálu počas tlače; monitorovanie
- procesu v reálnom čase,
- možnosti opráv a repasovania.

# Laminácia

„Proces, pri ktorom sa listy materiálu spájajú s cieľom vytvoriť diel.“

Výrobný proces:

- 1) Na stavebnú platformu sa položí tenká vrstva materiálu vo forme listu/fólie.
- 2) Vrstva sa spojí s predchádzajúcou vrstvou (lepidlom, teplom alebo ultrazvukovým zvarom).
- 3) Po spojení sa vrstva vyreže do požadovaného tvaru (laserom, nožom alebo frézovaním).
- 4) Prebytočný materiál zostáva ako podpora alebo sa odstráni.
- 5) Proces sa opakuje vrstvu po vrstve, až kým nevznikne celý diel.



- + relatívne nízke náklady,
- + vysoká výrobná rýchlosť,
- + nie sú potrebné konvenčné podporné štruktúry.
- nižšia presnosť,
- vyžaduje sa dodatočné spracovanie,
- viditeľné vrstvy (horšia kvalita povrchu),
- obmedzený rozsah materiálov.



Súčasný trendy výskumu:

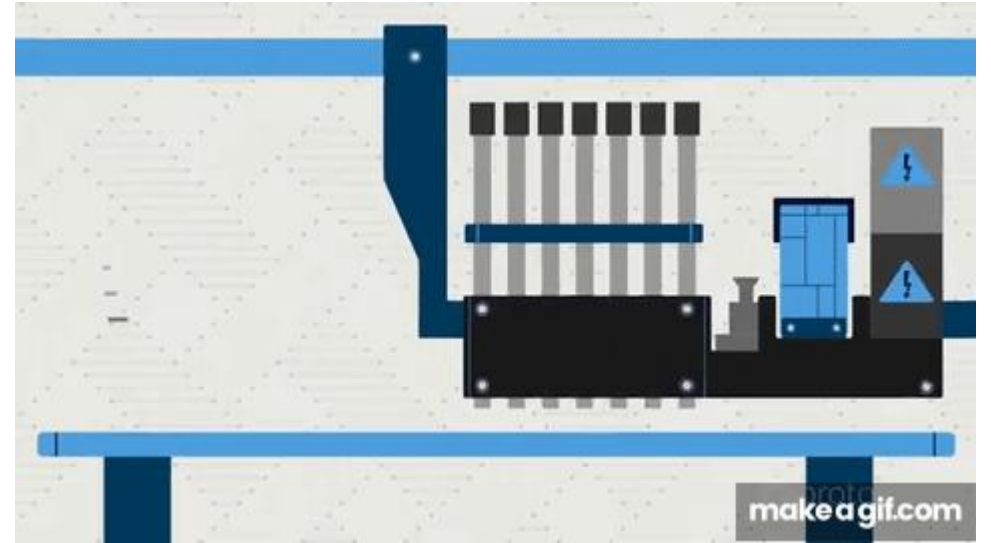
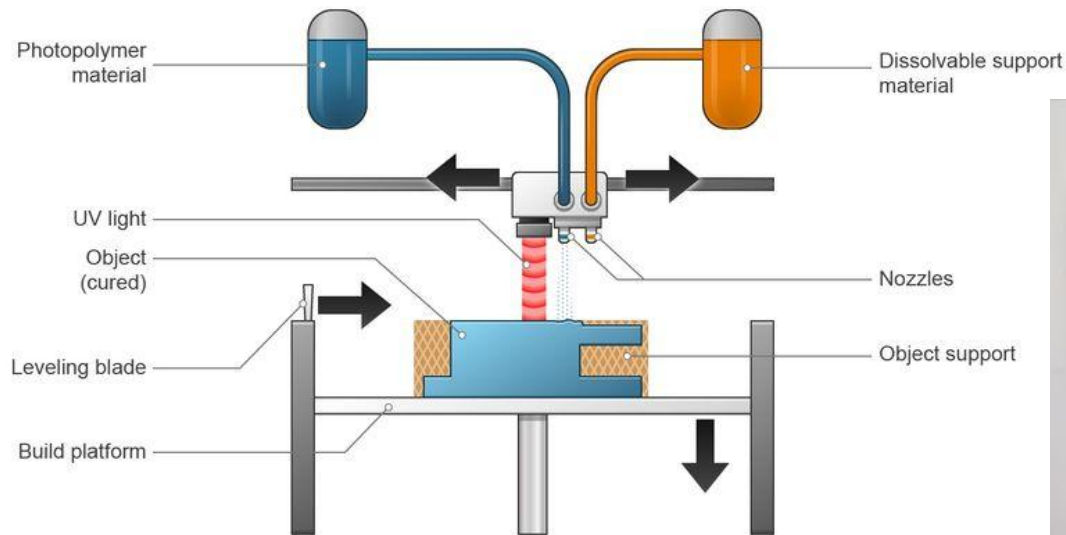
- nové materiály (kompozity),
- multimateriálová tlač,
- zlepšenie medzivrstvovej
- pevnosti,
- presnosť rezania.

# Material Jetting

„Proces, pri ktorom sa selektívne ukladajú kvapky východiskového materiálu.“

Výrobný proces:

- 1) Kvapalný fotopolymér (živica) je uložený v zásobníkoch tlačiarne.
- 2) Tlačová hlava vystrekuje mikrokvapky materiálu na stavebnú platformu.
- 3) Každá uložená vrstva sa okamžite vytvrdzuje UV žiarením.
- 4) Materiál stuhne a proces sa opakuje vrstvu po vrstve.



- + vysoká presnosť,
- + výborná kvalita povrchu.
- materiály sú citlivé na UV žiarenie,
- vyššie náklady na materiál,
- obmedzený rozsah materiálov.

Súčasný trendy výskumu:

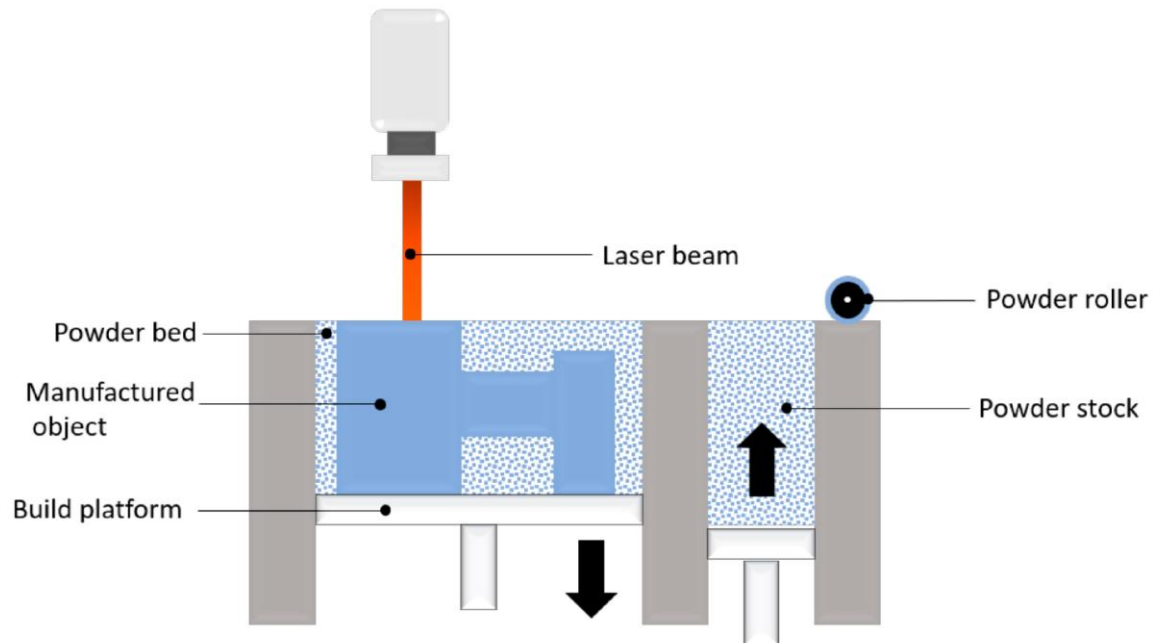
- tlač biokompatibilných materiálov,
- veľkosť a tvar kvapiek,
- presnosť ukladania kvapiek,
- zlepšenie mechanických vlastností.

# Spekanie/tavenie v práškovom lôžku

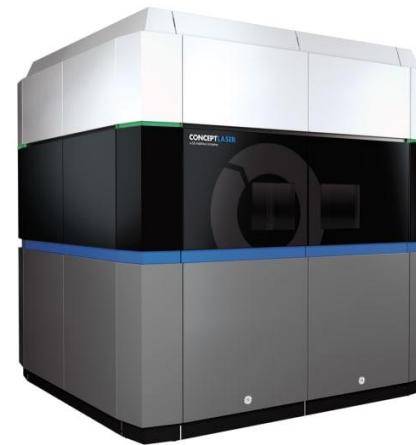
„Proces, pri ktorom tepelná energia selektívne spája oblasti práškového lôžka.“

Výrobný proces:

- 1) Na stavebnú platformu sa rozprestrie tenká vrstva prášku (kovového alebo polymérneho).
- 2) Zdroj energie (laser alebo elektrónový lúč) selektívne taví alebo speká prášok.
- 3) Materiál stuhne a proces sa opakuje vrstvu po vrstve.



- + veľmi vysoká presnosť a rozlíšenie detailov,
- + možnosť vyrábať zložité geometrie,
- + dobré mechanické vlastnosti.
- vysoké náklady na zariadenie a materiál,
- vyžaduje sa následné spracovanie.



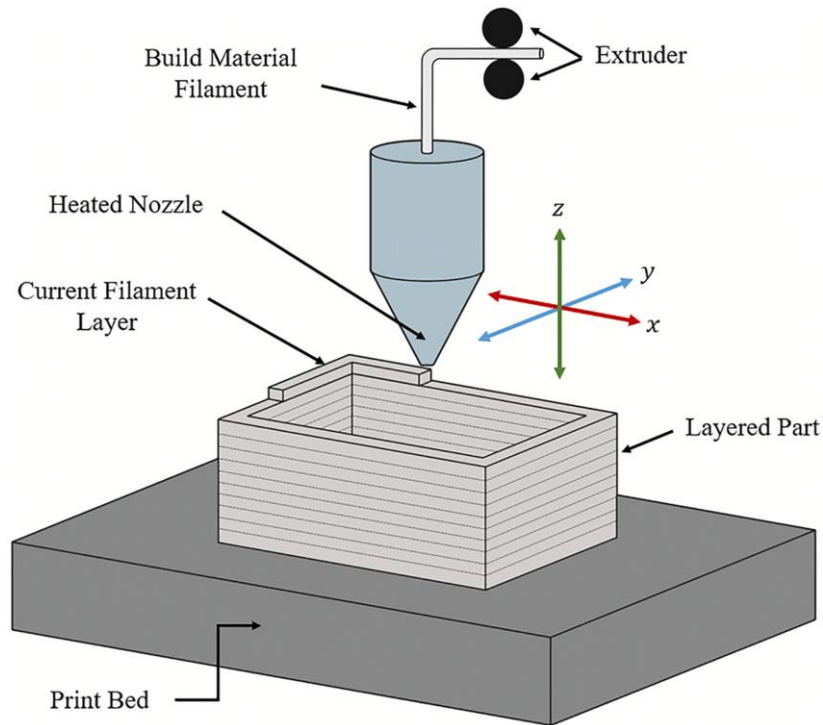
- Súčasný trendy výskumu:
- riadenie tavného kúpeľa,
  - vznik defektov,
  - vývoj nových materiálov,
  - opätovné použitie prášku.

# Extrúzia materiálu

„Proces, pri ktorom sa materiál selektívne dávkuje cez dýzu alebo otvor.“

Výrobný proces:

- 1) Termoplastický materiál (filament) sa privádza do extrudéra.
- 2) Materiál sa v dýze zahreje na teplotu tavenia.
- 3) Roztavený materiál sa vytláča cez dýzu na stavebnú platformu.
- 4) Uložený materiál stuhne a proces sa opakuje vrstvu po vrstve.

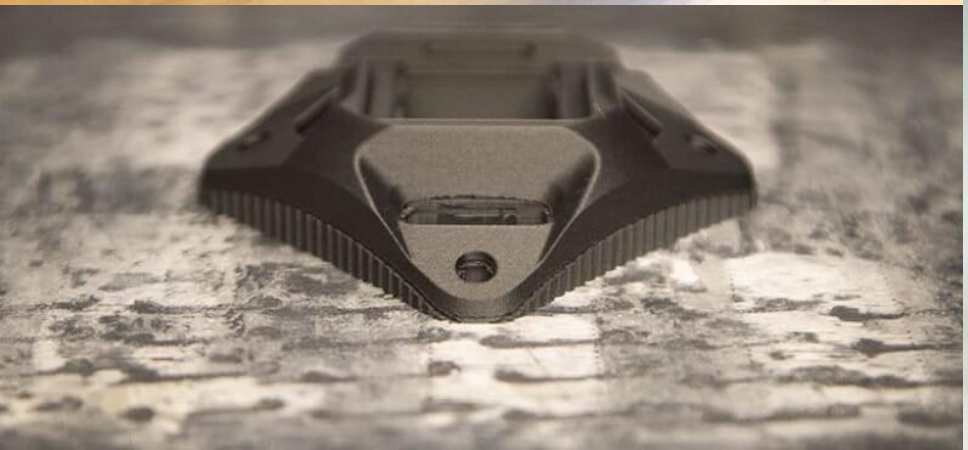
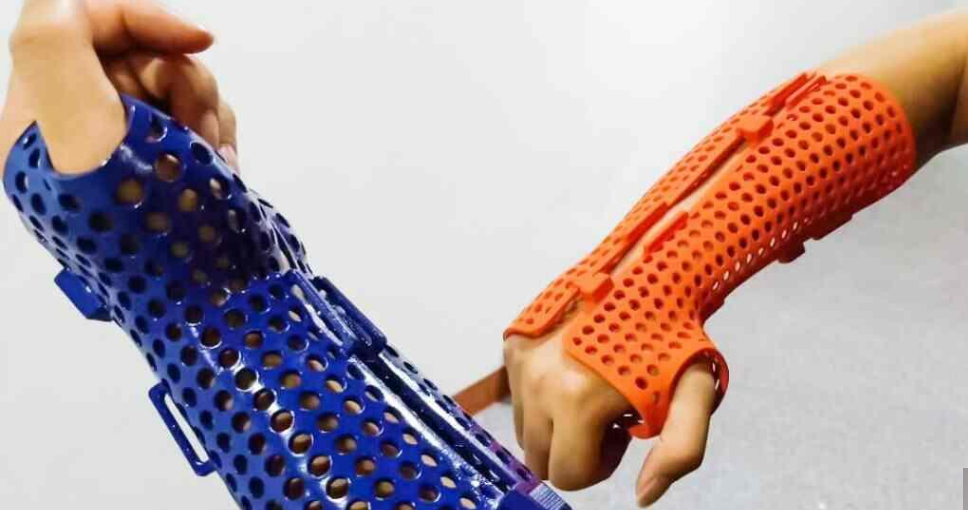


Súčasný trendy výskumu:

- vystužené kompozity,
- recyklácia materiálov,
- medzivrstvové spojenie,
- presnosť tlače.

+ nízke náklady na zariadenie a materiál,  
+ široký rozsah materiálov  
+ jednoduchá a dostupná technológia.

- nižšia presnosť a kvalita povrchu,  
- potreba podporných štruktúr,  
- anizotropné mechanické vlastnosti.



# Normy v aditívnej výrobe

- Normy pre aditívnu výrobu sa postupne vyvíjajú a publikujú.
- Väčšina týchto noriem je označená ako ASTM/ISO 529xx.
- V oblasti terminológie a klasifikácie je základnou normou ISO/ASTM 52900.
- Problém nedostatočnej štandardizácie však stále pretrváva.
- V takýchto prípadoch sa často používajú normy určené pre konvenčne vyrábané materiály.
- V niektorých prípadoch je vhodnosť týchto noriem pre 3D tlačené materiály otázná

STN EN ISO/ASTM 52924: 2023

Úrad pre normalizáciu, metrológiu 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*

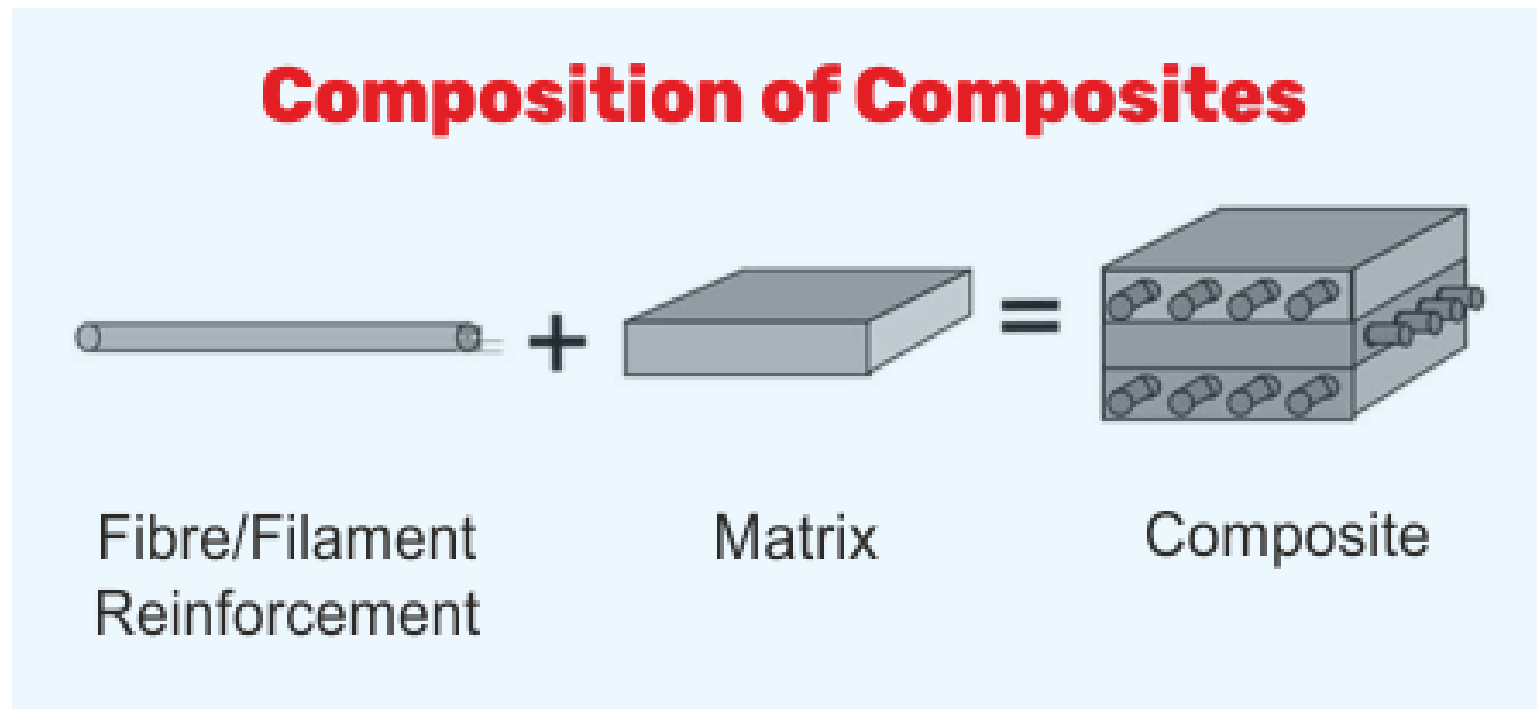


Reference number  
ISO/ASTM 52924:2023(E)

© ISO/ASTM International 2023

# Kompozity

Kompozitný materiál je materiál zložený z dvoch alebo viacerých rôznych zložiek, ktoré spolu poskytujú lepšie vlastnosti než každá z jednotlivých zložiek samostatne.



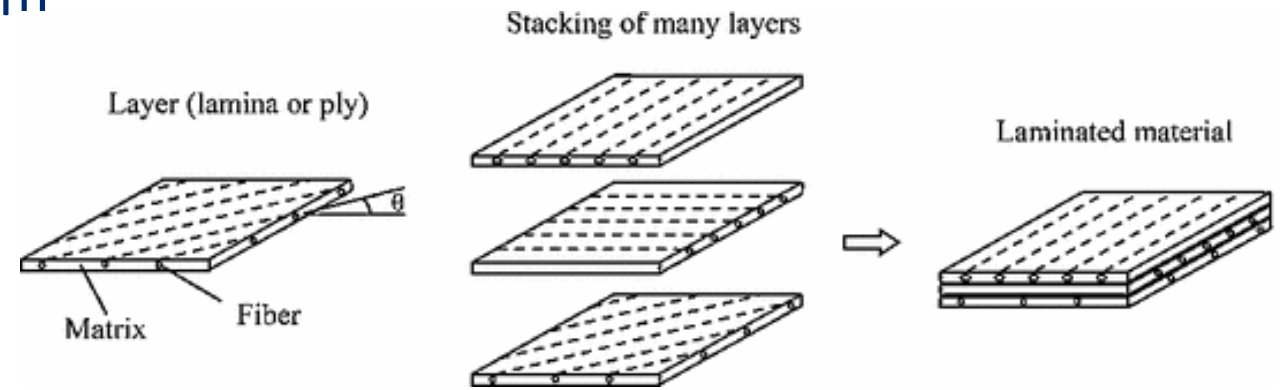
Kompozit sa skladá z matrice a výstuže, pričom každá zložka plní špecifickú funkciu.

## Matrica:

- udržiava tvar,
- chráni výstuž,
- prenáša zaťaženie,
- materiály: polymér, kov, keramika.

## Výstuž:

- zlepšuje mechanické vlastnosti kompozitu,
- materiály: prírodné, kevlarové, sklené alebo uhlíkové.

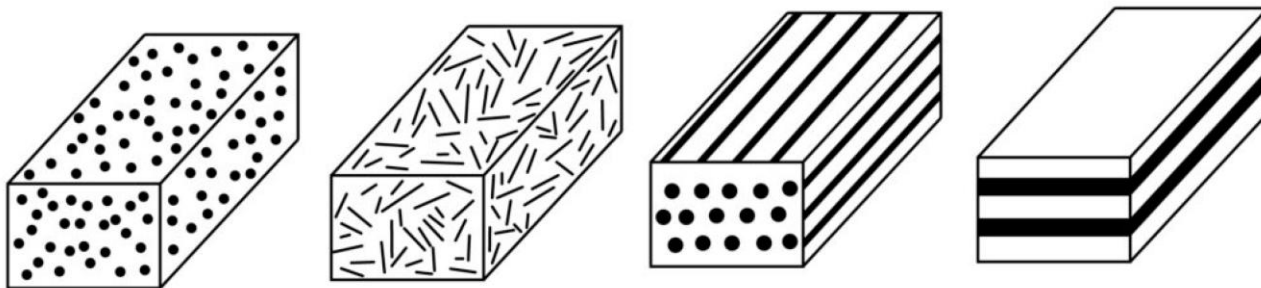


## Výhody:

- vysoká pevnosť pri nízkej hmotnosti,
- dobrá korózna odolnosť
- možnosť prispôbiť vlastnosti zmenou orientácie výstuže.

## Nevýhody:

- zložitá výroba,
- vyššie výrobné náklady,
- problémy s recykláciou.



Particles

Short Fibres or whiskers

Continuous fibres

Sheet laminates

# Technológie výroby kompozitov

## Ručné laminovanie

Vrstvy vlákien sa ručne ukladajú a impregnujú živicom.

### Výhody :

- nízke náklady,
- jednoduchá technológia.

### Nevýhody :

- nízka opakovateľnosť,
- závislosť od operátora
- nižšia kvalita.



# RTM / VARTM

Proces, pri ktorom sa živica zavádza do formy obsahujúcej výstuž (vlákna), aby sa vytvoril kompozit.

## Výrobný proces :

- 1) Suché vlákna (napr. uhlíkové alebo sklené) sa vložia do formy.
- 2) Forma sa uzavrie (RTM) alebo prekryje vákuovým vakom (VARTM).
- 3) Živica sa vstrekne alebo sa vákuovo infunduje, čím impregnuje vlákna.
- 4) Materiál vytvrdne (pri zvýšenej alebo izbovej teplote) a vyberie sa z formy.

## Výhody :

- menej odpadu a lepšia opakovateľnosť.

## Nevýhody :

- zložitejšia technológia v porovnaní s ručným kladením.



# Navíjanie vlákien

Proces, pri ktorom sa vlákna navíjajú na rotujúcu formu.

## Výhody :

- vysoká pevnosť,
- dobrá kontrola orientácie vlákien,
- minimálny materiálový odpad.

## Nevýhody :

- obmedzené na rotačné tvary.



# Autoclave

Proces, pri ktorom sa predimpregnované vlákna vytvrdzujú pôsobením tepla a tlaku.

Prepreg = predimpregnovaný material

vlákna (napr. uhlíkové) sú už impregnované presným množstvom živice.

## Výrobný proces :

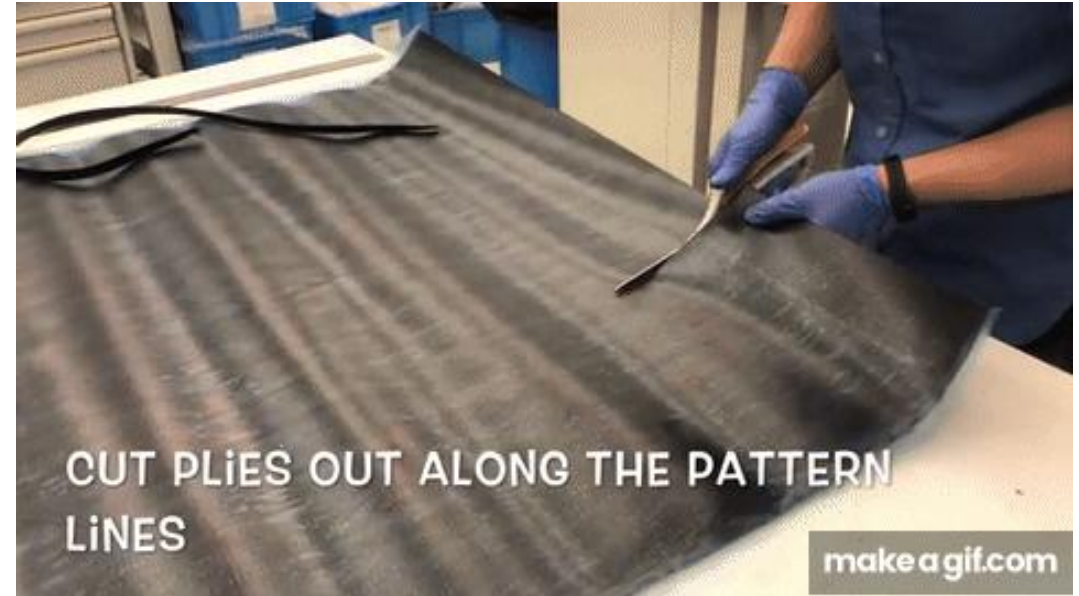
- 1) Vrstvy prepregu sa ukladajú do formy.
- 2) Diel sa prekryje vákuovým vakom a utesní.
- 3) Vloží sa do autoklávu.
- 4) Aplikuje sa teplo (vytvrdzovanie živice) a tlak (odstránenie pórov).

## Výhody:

- veľmi vysoká pevnosť a kvalita,
- minimálna pórovitosť.


## Nevýhody:

- vysoké prevádzkové náklady,
- drahé zariadenie.



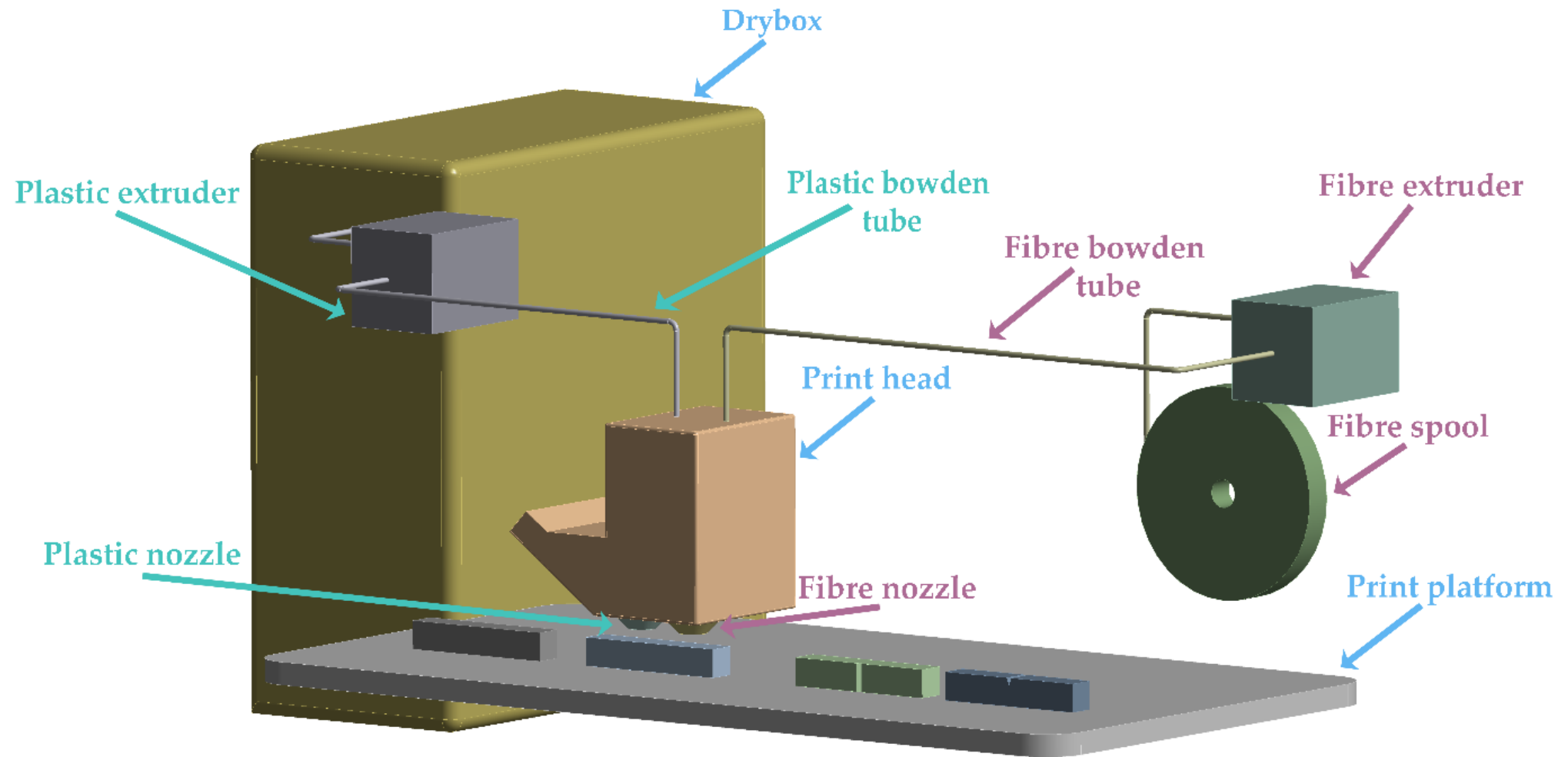
# 3D tlač kompozitov

- Stereolitografia, spekanie, extrúzia.
- Výroba taveným filamentom (Fused Filament Fabrication - FFF).

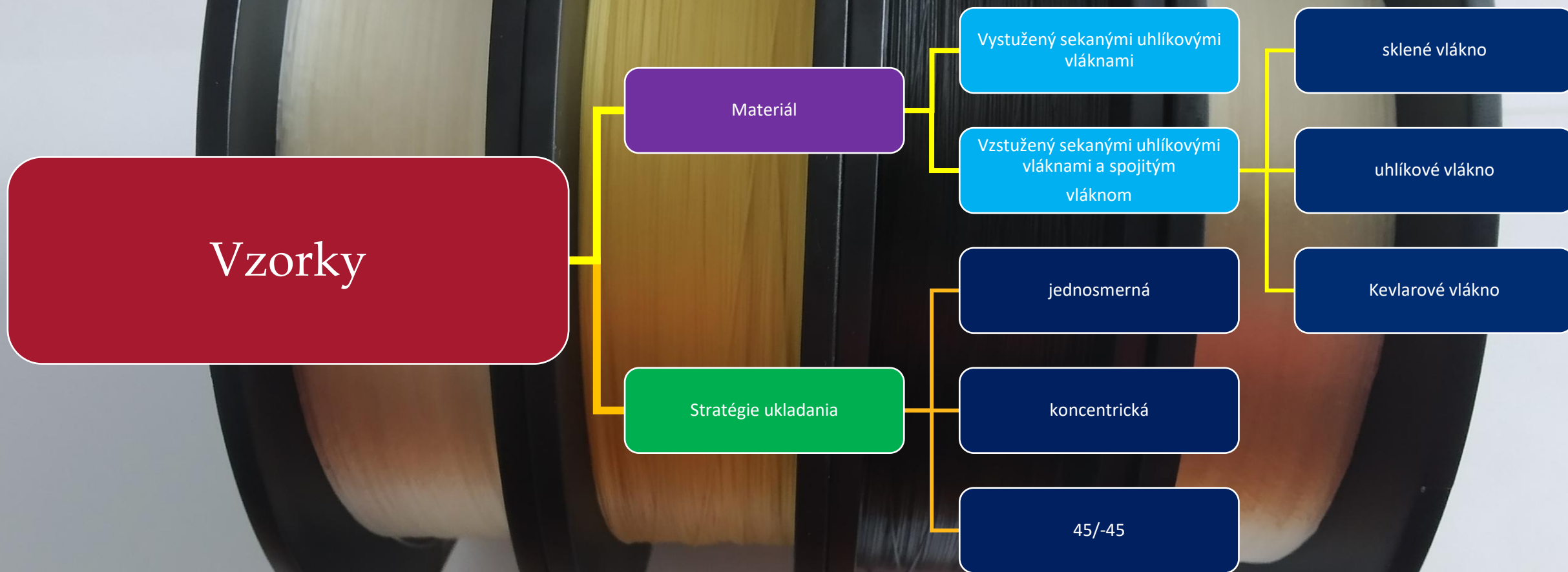
 Markforged

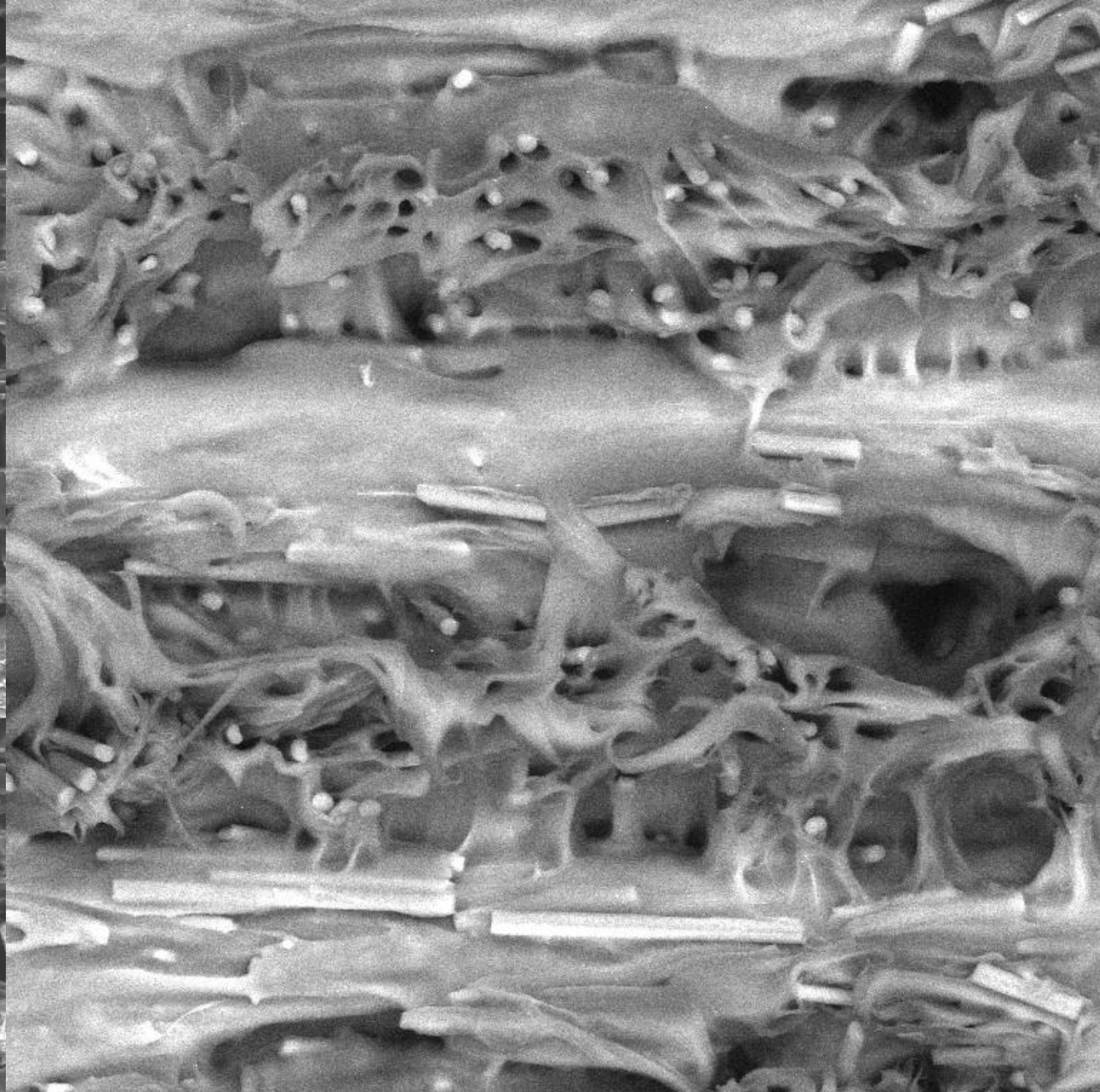
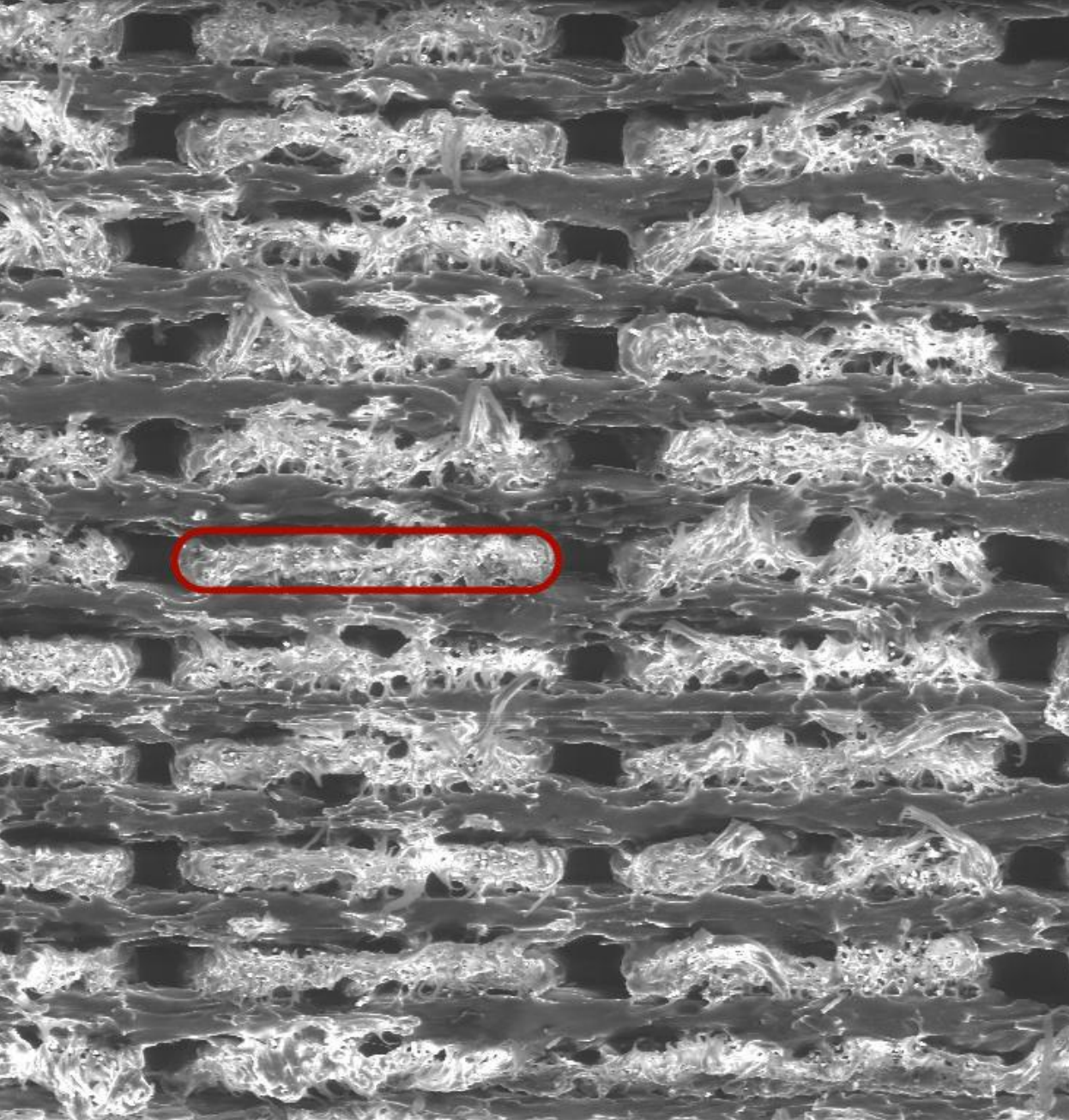


# Princíp metódy Fused Filament Fabrication

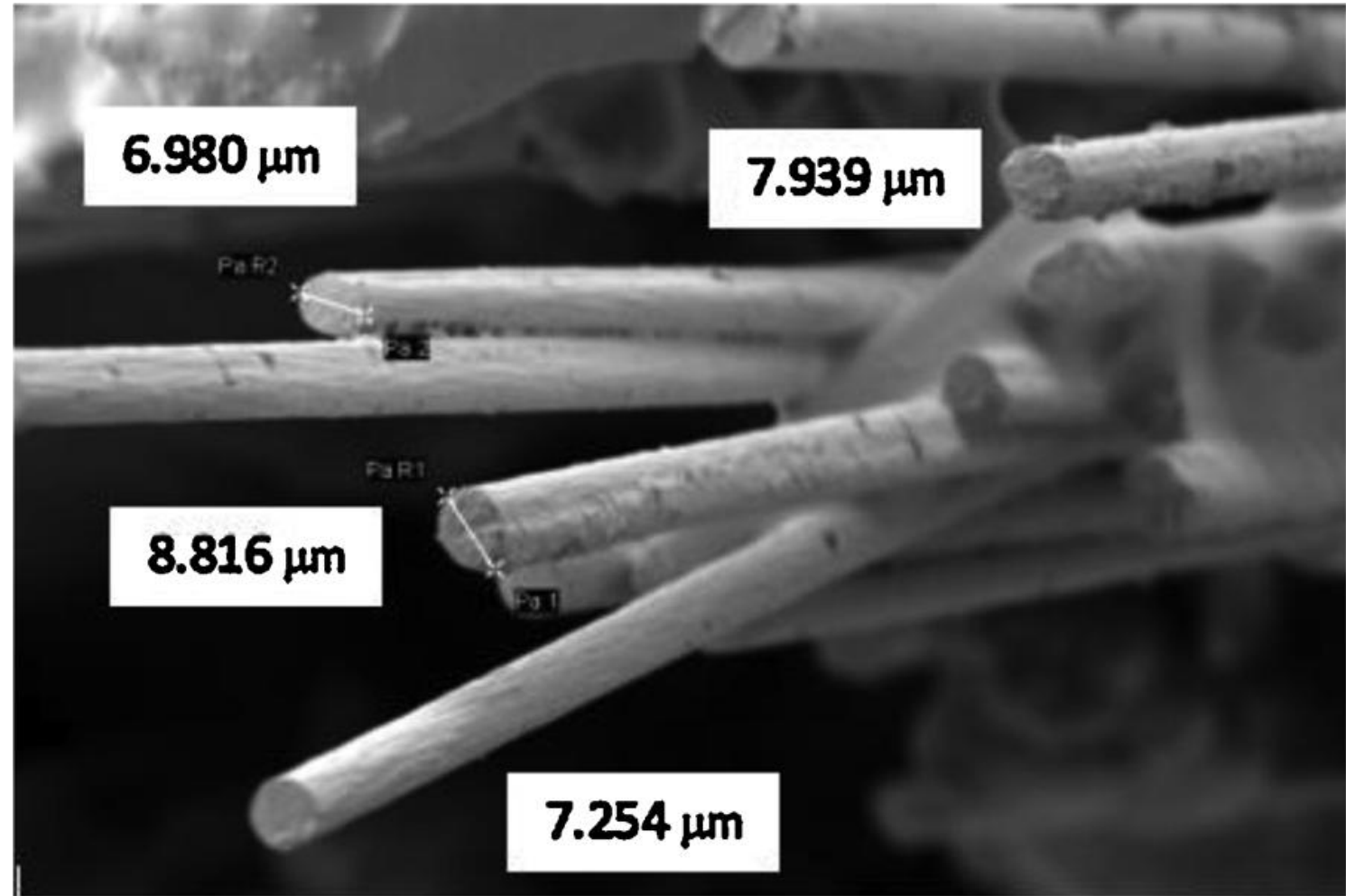


# Prehľad typov vzoriek

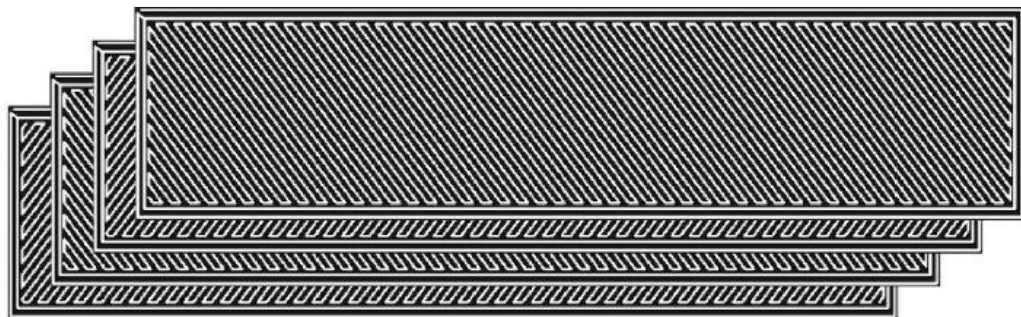




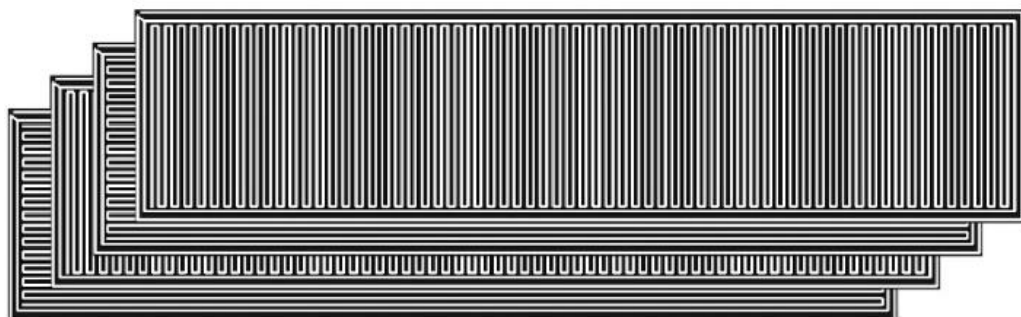
# Nylon vystužený sekanými uhlíkovými vlákny



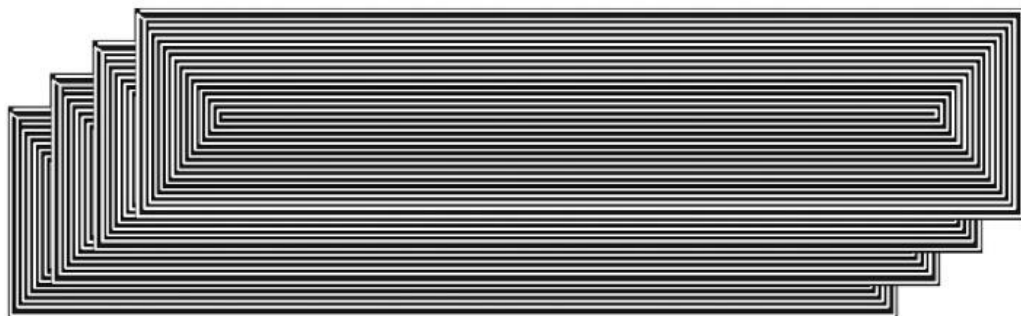
# Usporiadanie materiálu



45/-45



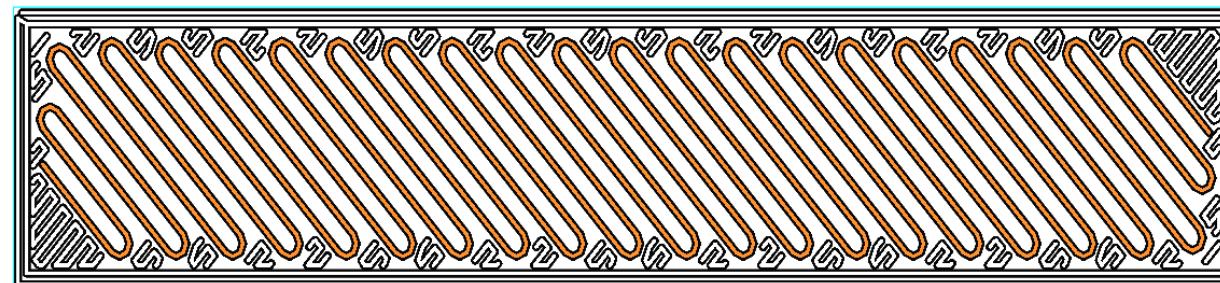
0/90



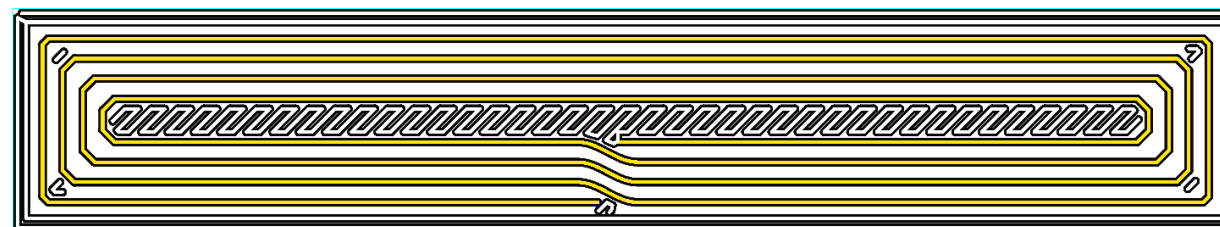
0



jednosmerné usporiadanie



45/-45



koncentrické okruhy

# Mechanické skúšanie 3D tlačných kompozitov



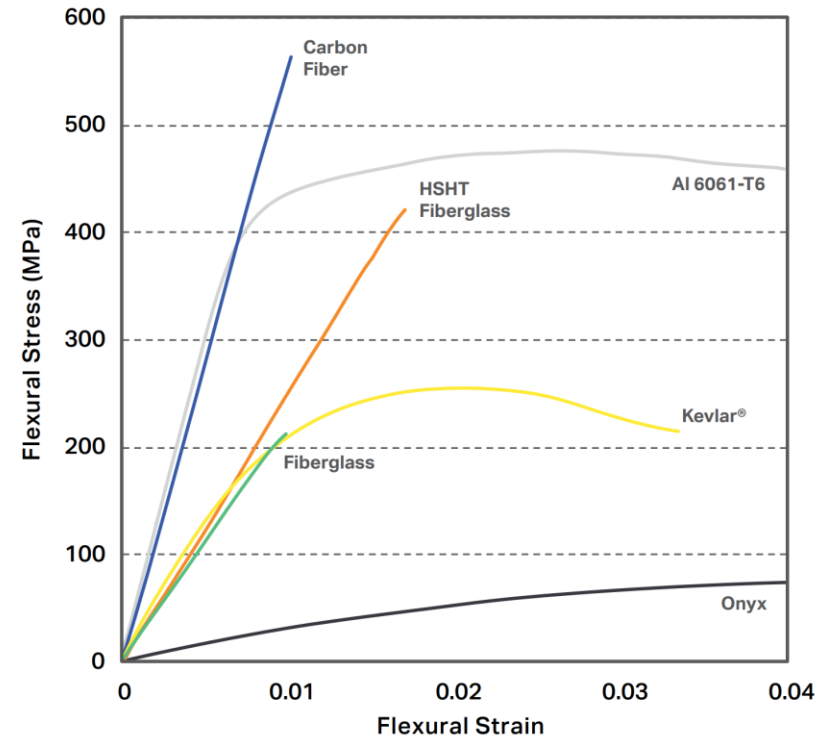
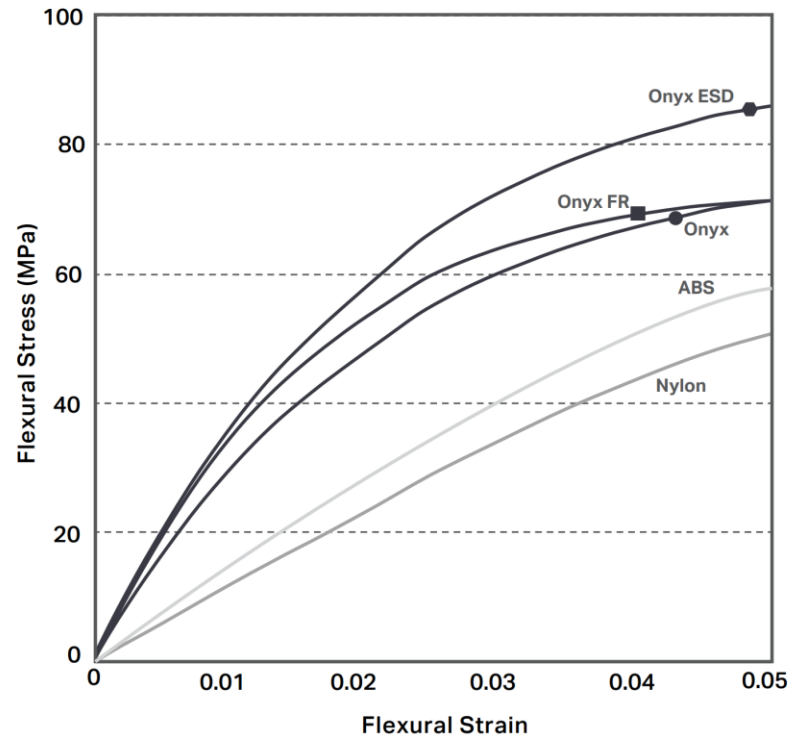
## Výskumné výzvy

- anizotropia,
- orientácia vlákien,
- vplyv podmienok prostredia,
- absencia noriem.



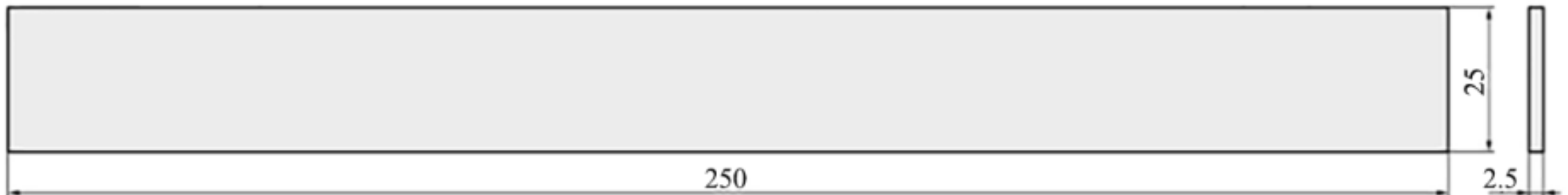
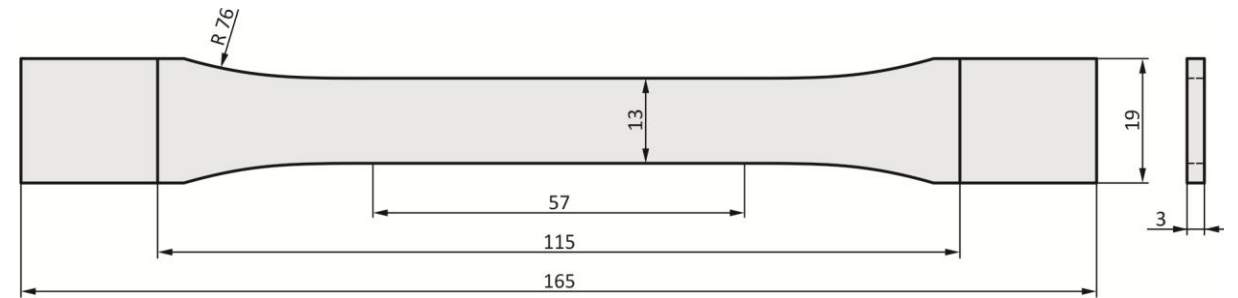
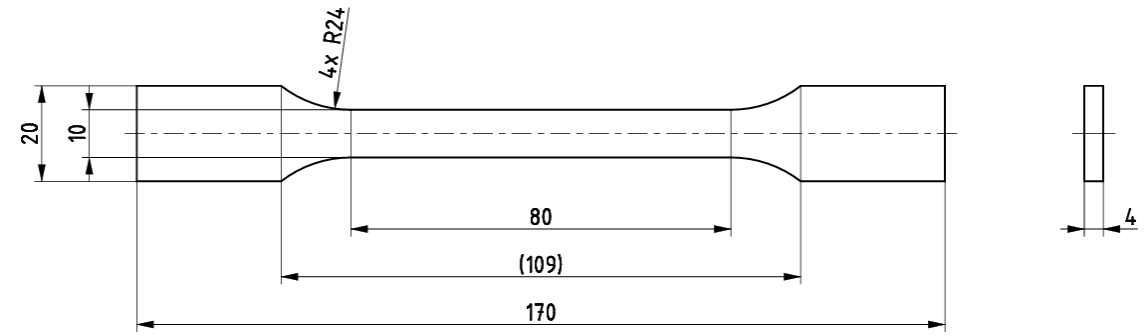
Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD	Nylon
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2	1.7
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52	51
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50	36
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25	150
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	71	71	83	50
Flexural 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



# Ťahová skúška

- Niektoré štúdie uvádzajú problematické porušenie skúšobných vzoriek.
- V mnohých prípadoch sa neuvádzajú módy porušenia ani fotografie vzoriek.
- Najčastejšie používané geometrie vzoriek sú definované normami ASTM D3039 a ASTM D638.
- Normy by sa nemali aplikovať nekriticky, namiesto toho je potrebné zaviesť dodatočné opatrenia na zabezpečenie správneho a reprezentatívneho porušenia vzoriek.



# Nylon so sekanými uhlíkovými vlákny



ASTM D638

0 degrees



ISO/ASTM 52924



ASTM D638

45/-45 degrees

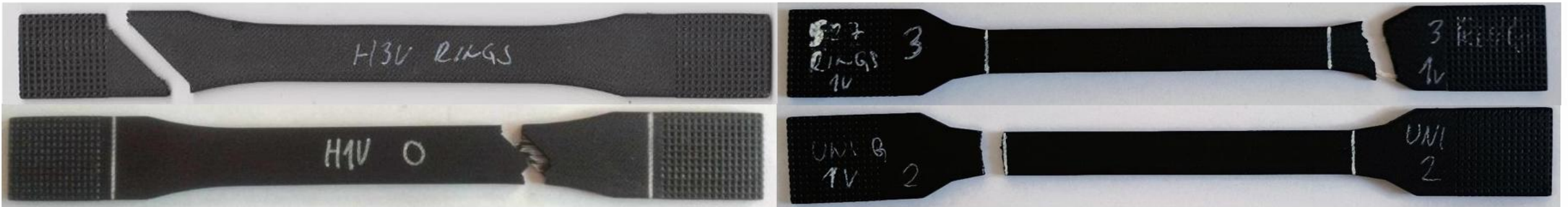
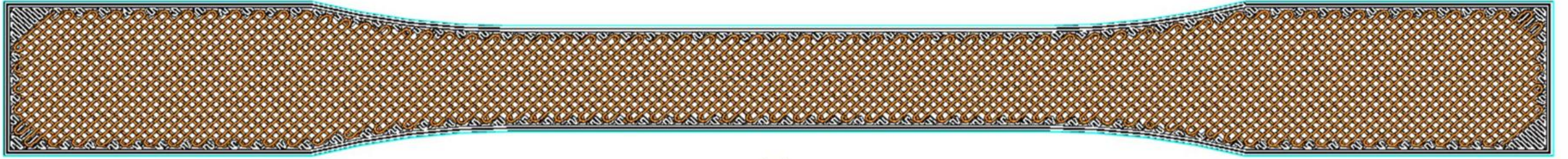


ISO/ASTM 52924



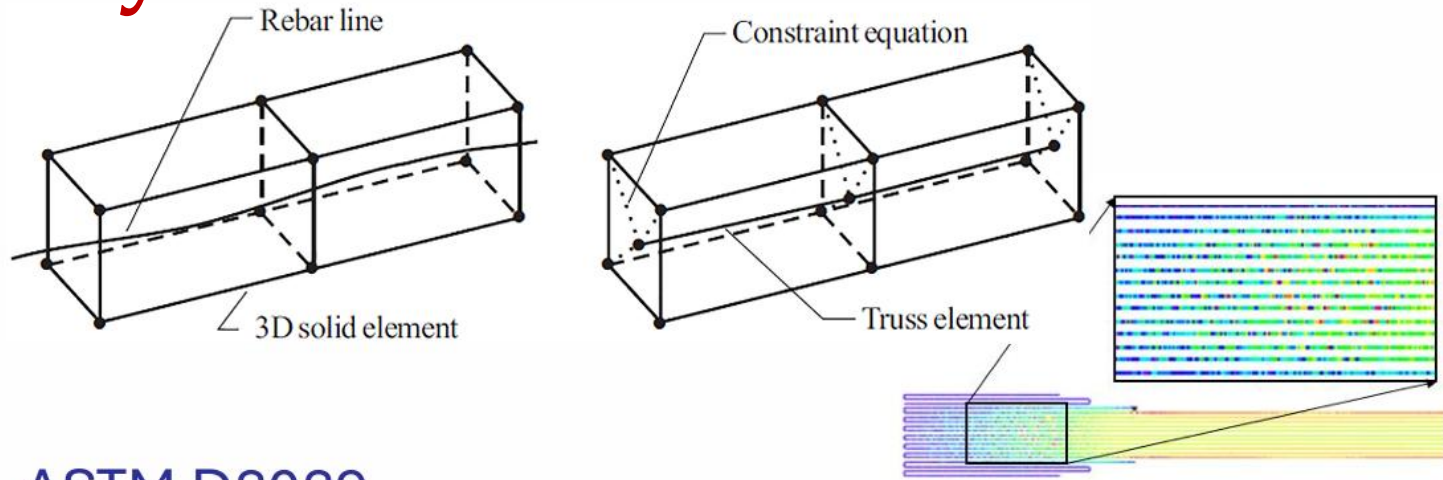
ASTM D3039

# Nylon so sekanými uhlíkovými vlákny a dlhými sklenými vlákny

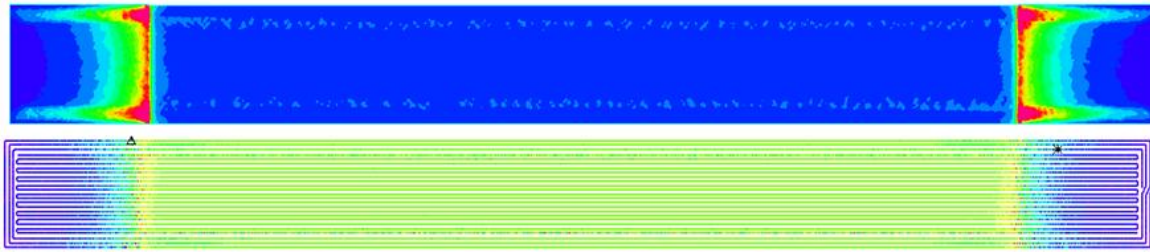


Väčšina lomov sa vyskytuje v zaoblenej časti vzorky.

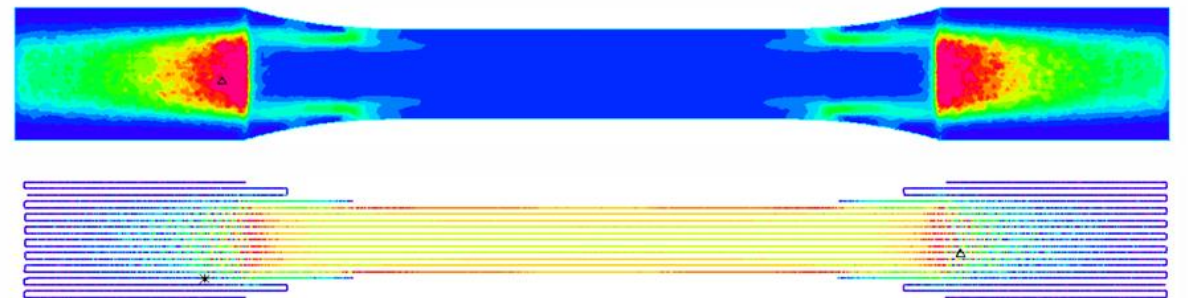
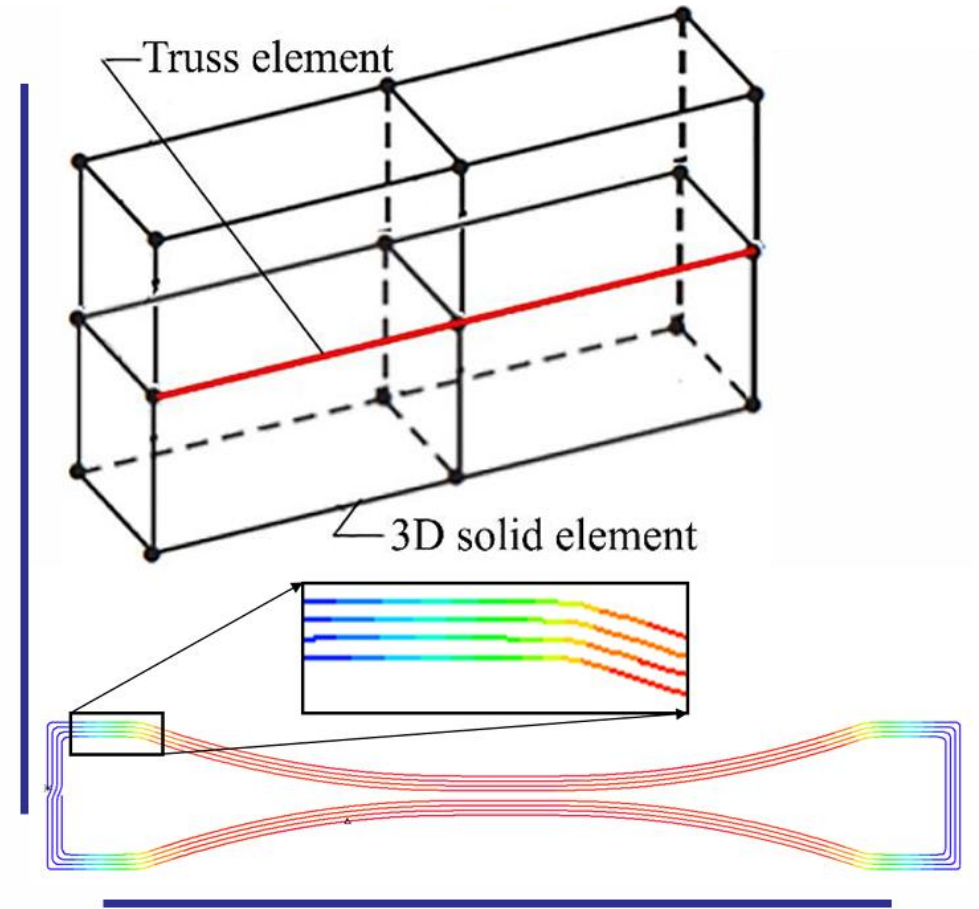
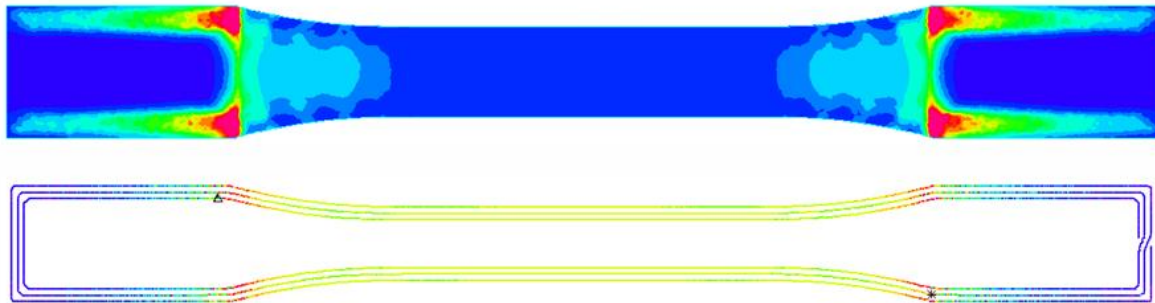
# MKP modelovanie termoplastických kompozitov s dlhými vláknami



ASTM D3039



ASTM D638



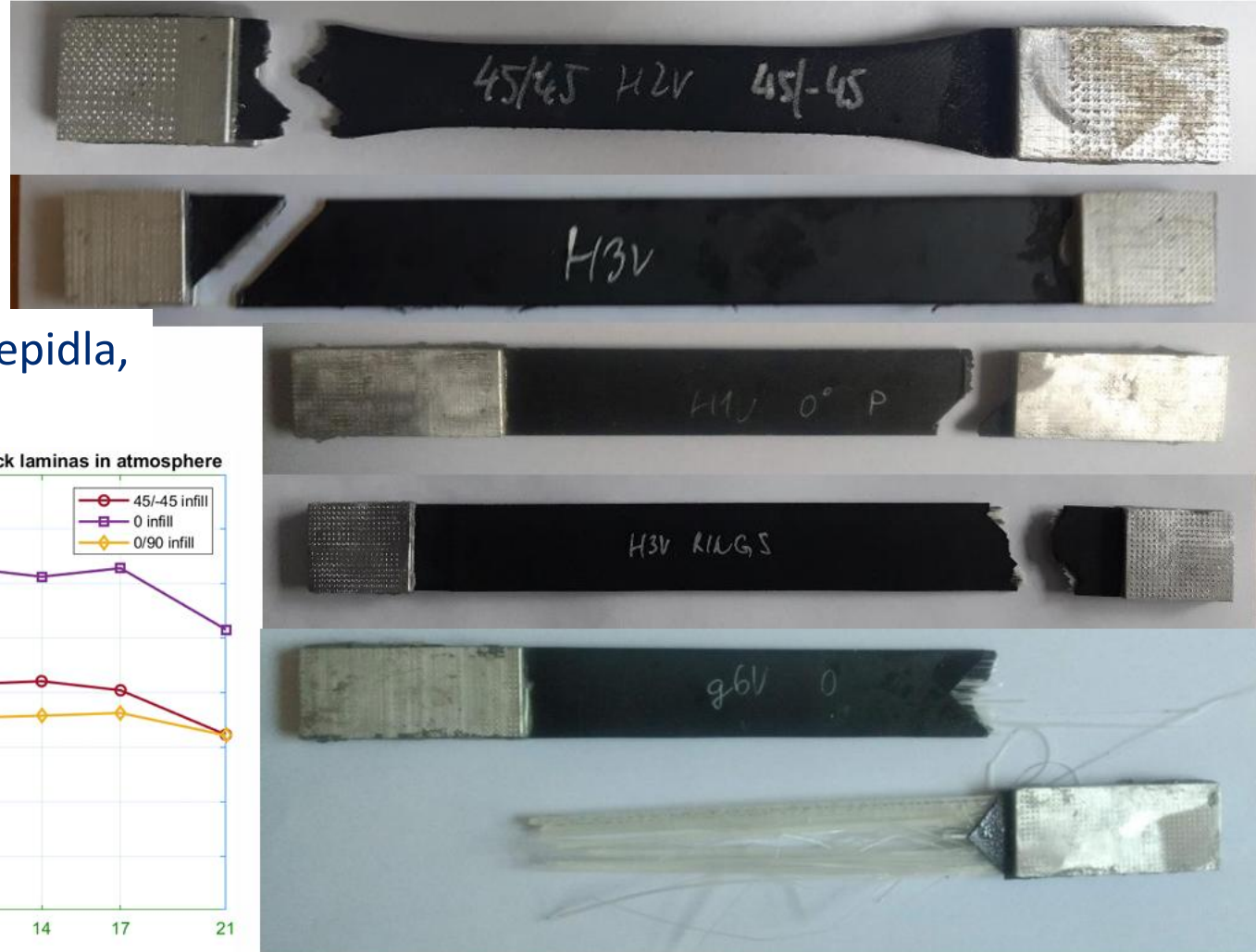
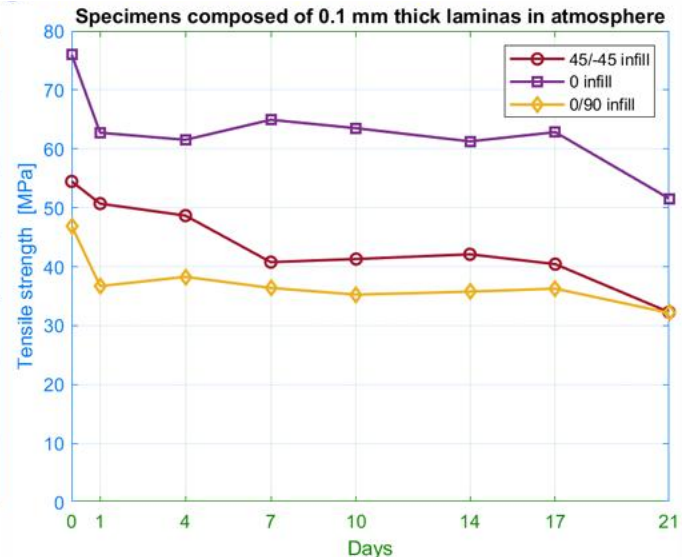
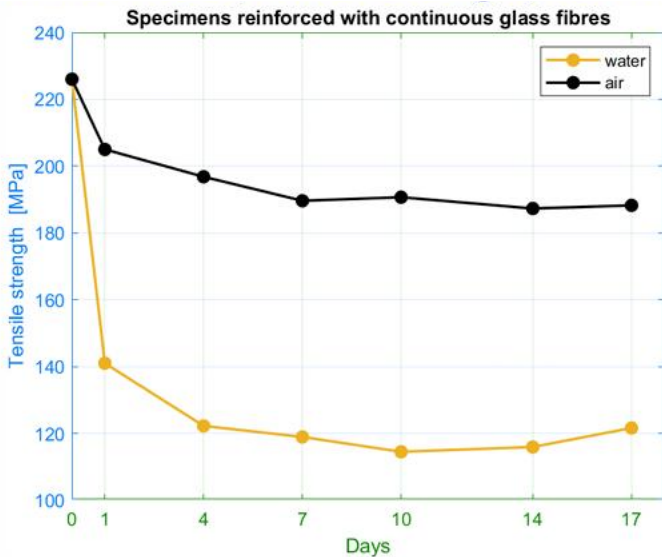
# Ako predchádzať nežiaducim módom porušenia?

Navrhujeme tri opatrenia :

- 1) Plocha prierezu v oblasti uchytenia má byť výrazne väčšia než v zúženej (meranej) časti.
- 2) Eliminácia ostrých rohov.
- 3) Zvýšenie polomeru zaoblenia.

## A) Pliešky

Nevýhody : materiál príložiek, typ lepidla, hrúbka lepidla, návrh príložiek, čas vytvrdzovania lepidla.

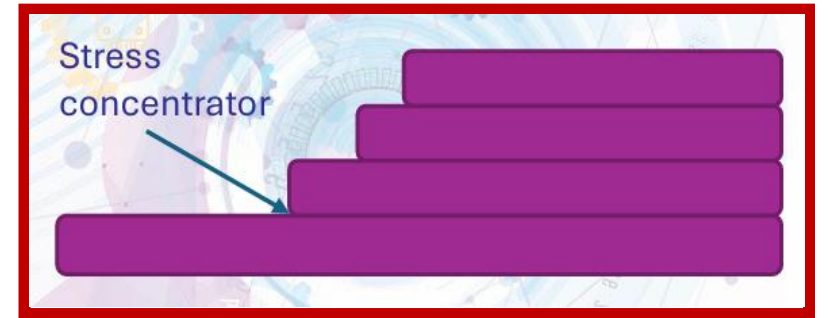


## B) Tapers

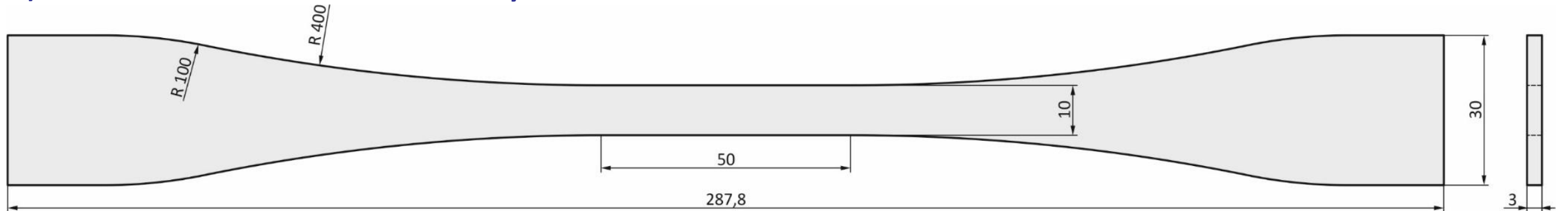
Nevýhody : potreba podporných štruktúr a ich následného odstránenia, zvýšená spotreba materiálu, riziko sklzu lamín počas skúšania.



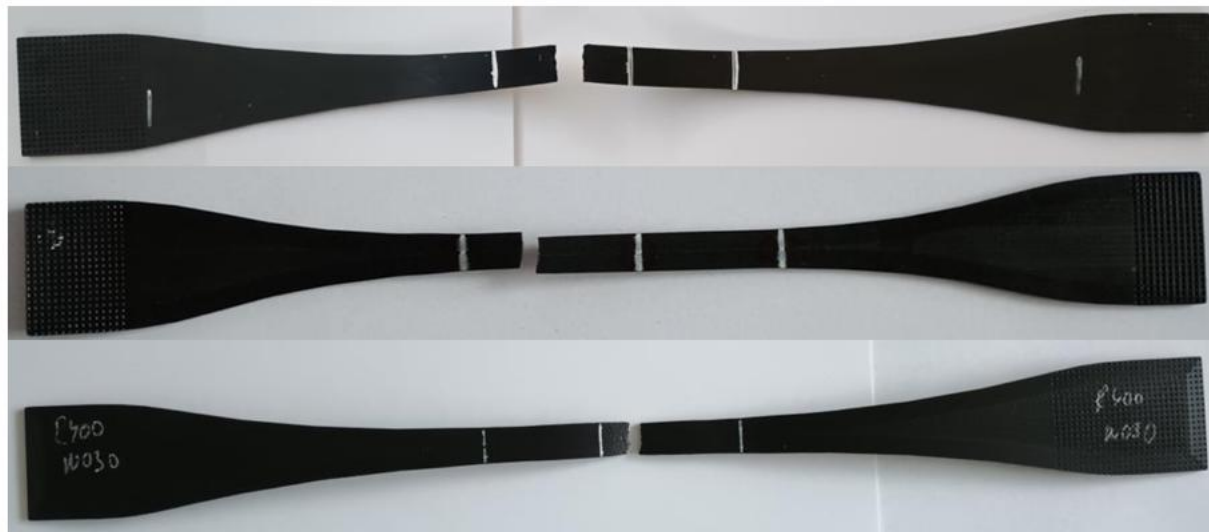
### Bočný pohľad



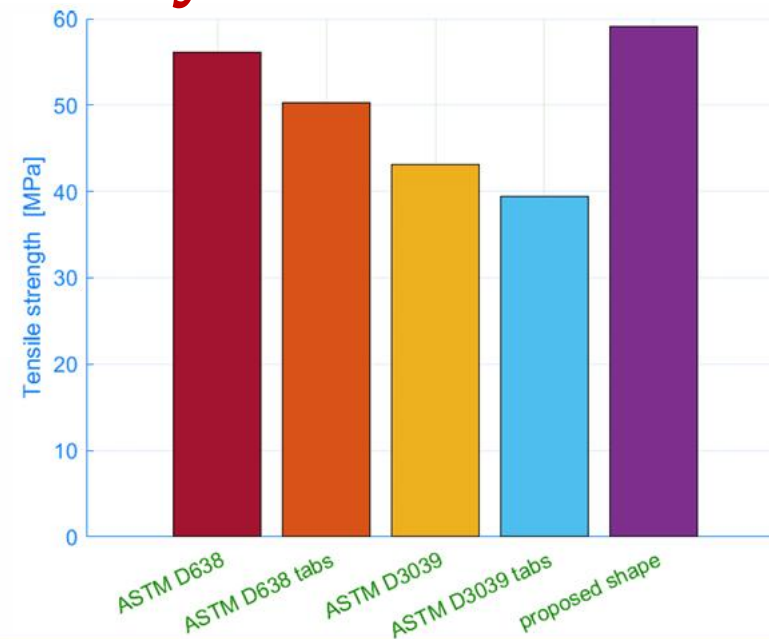
## C) Modifikácia tvaru vzorky



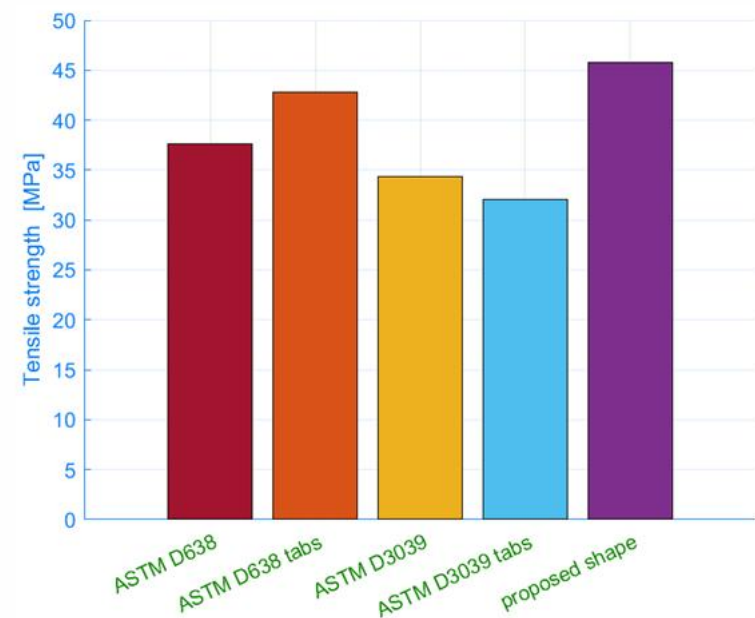
# Výsledky - nylon vystužený sekanými uhlíkovými vlákny



0 stupňov

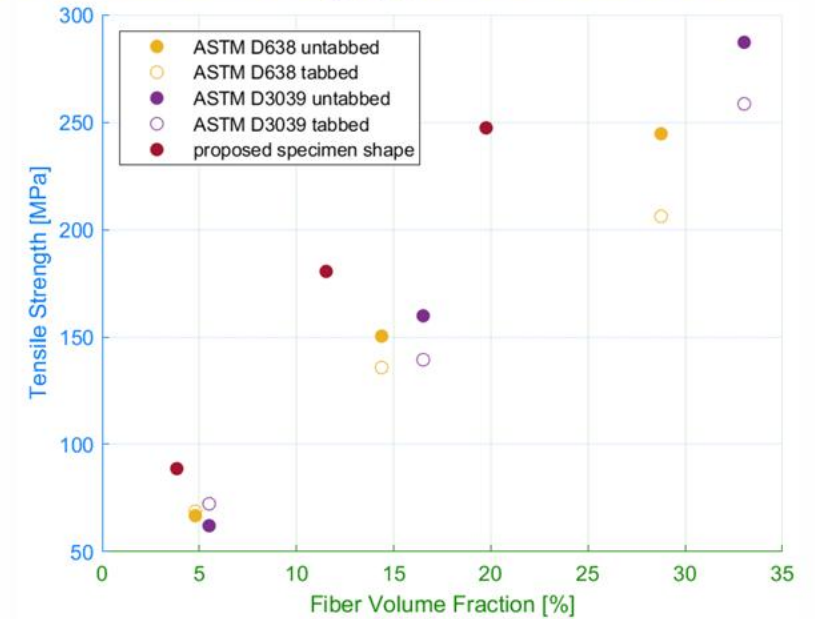


45/-45  
stupňov

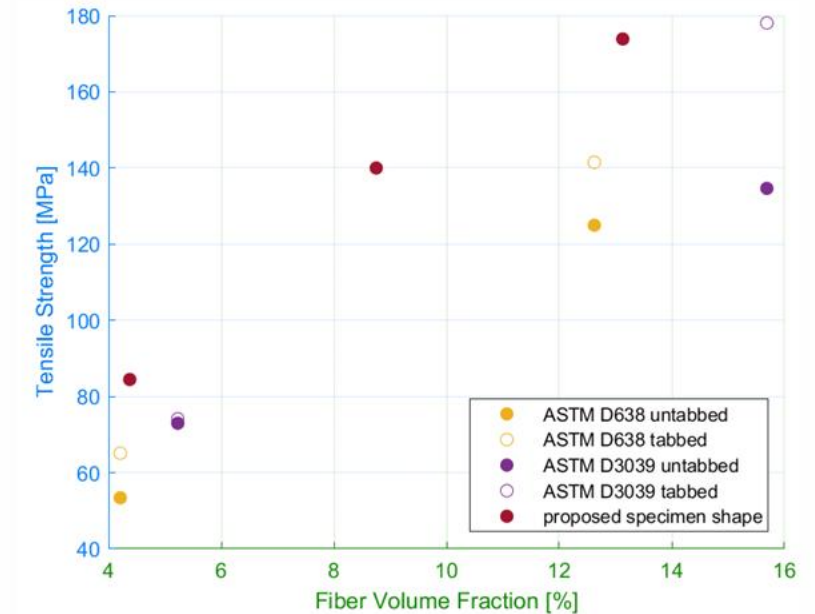
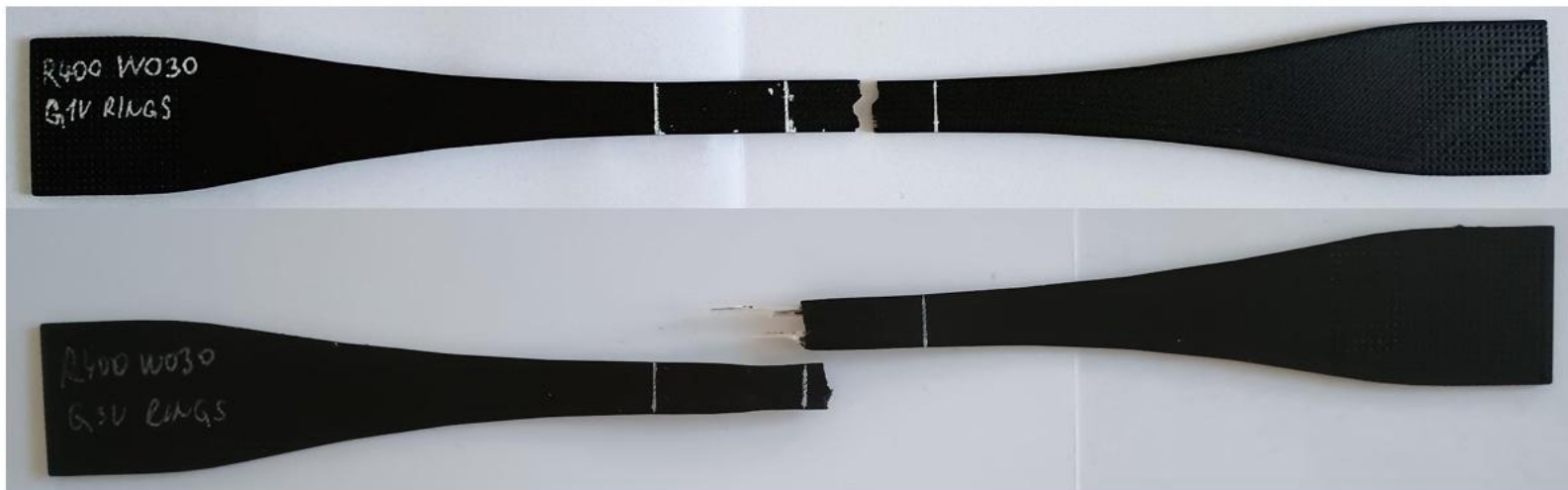


# Výsledky - nylon vystužený sekanými uhlíkovými vlákny a dlouhými sklenými vlákny

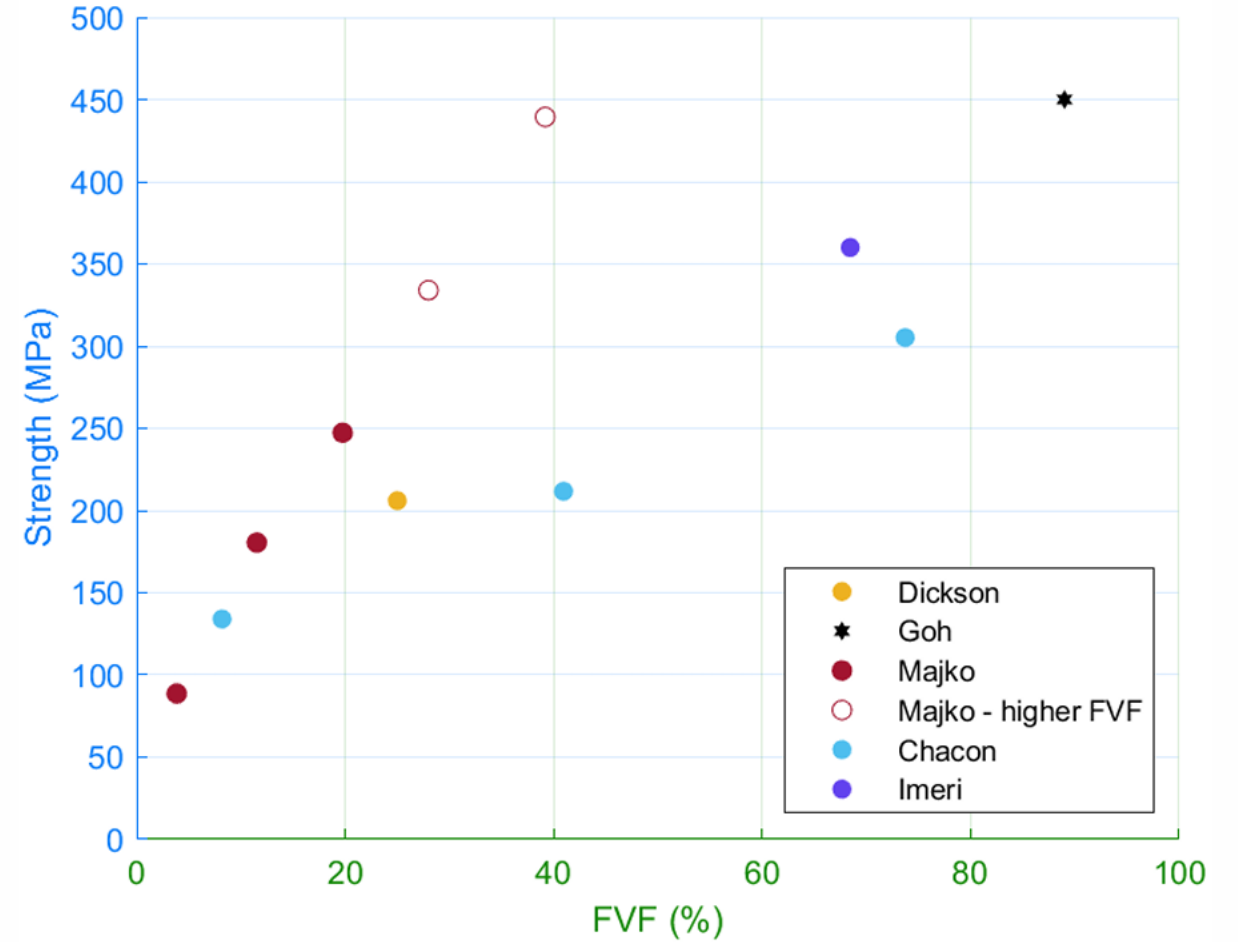
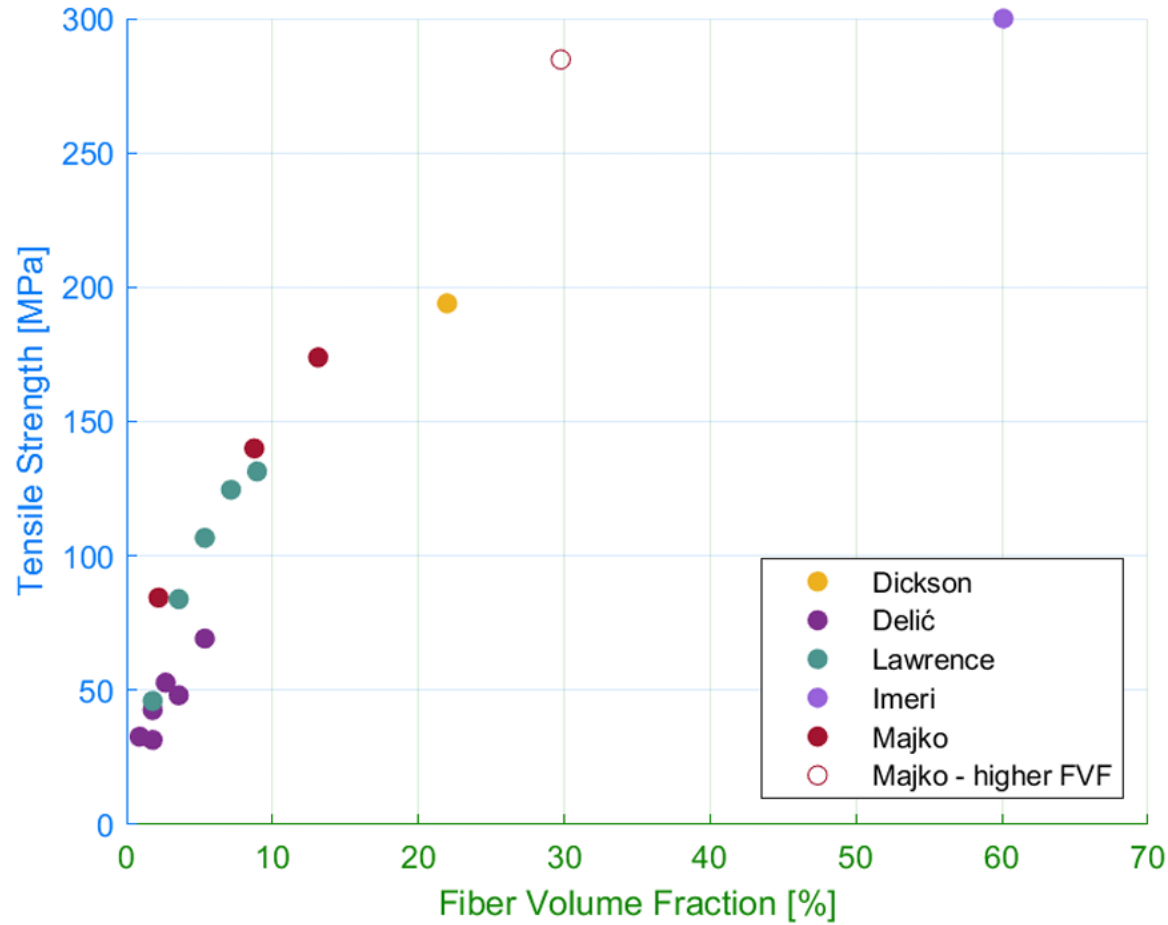
jednosmerné usporiadanie



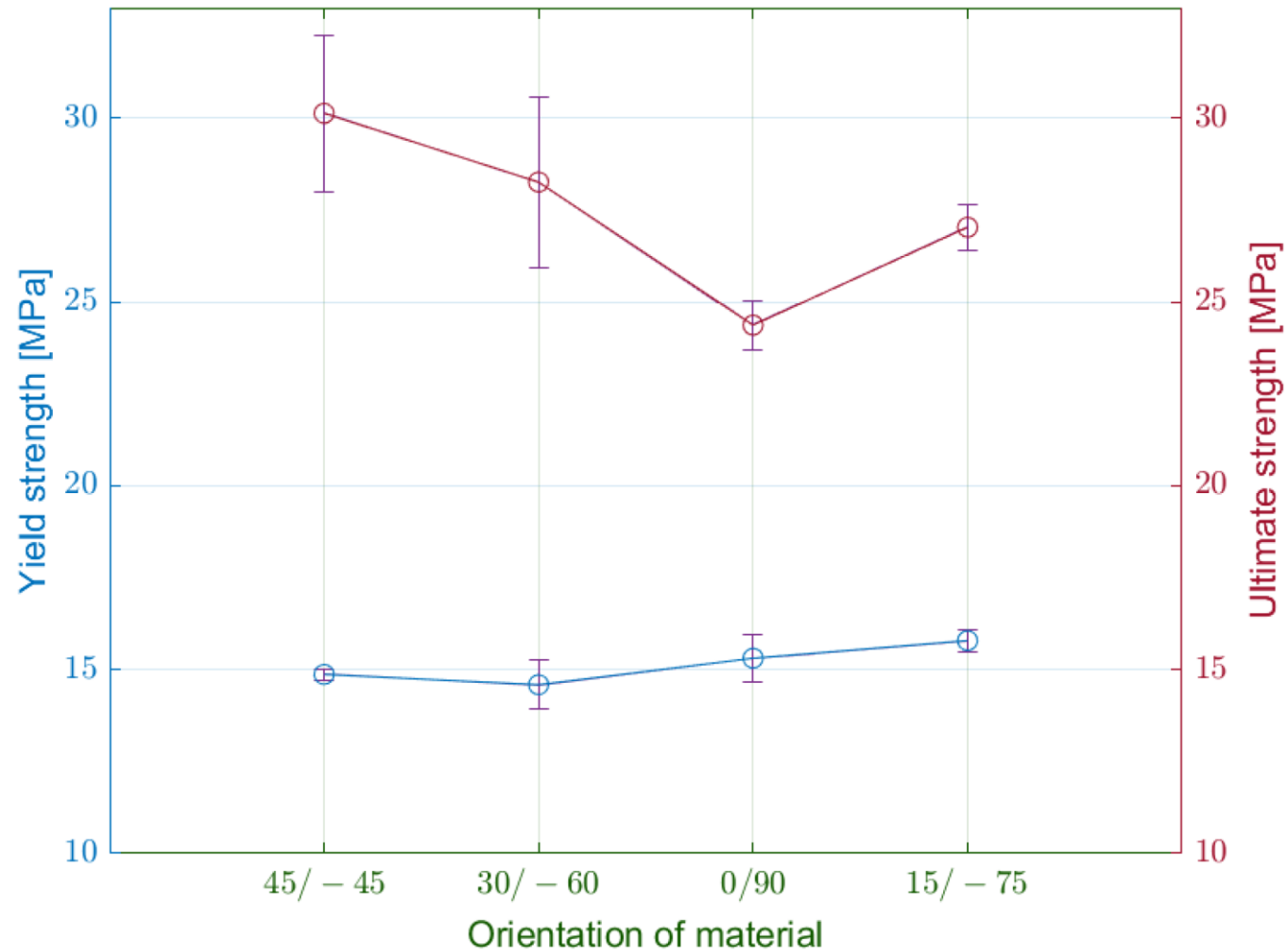
koncentrické okruhy



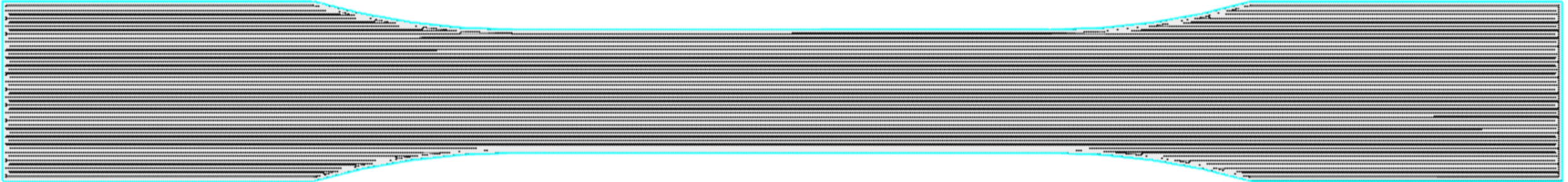
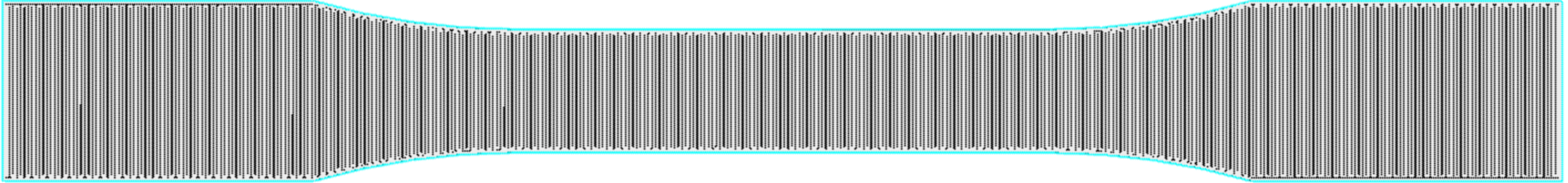
# Porovnanie výsledkov s inými štúdiami



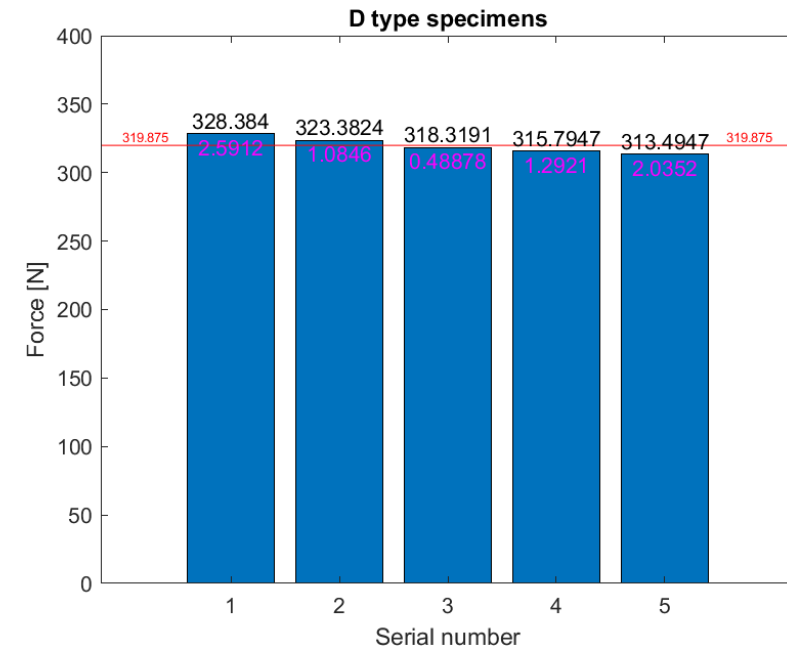
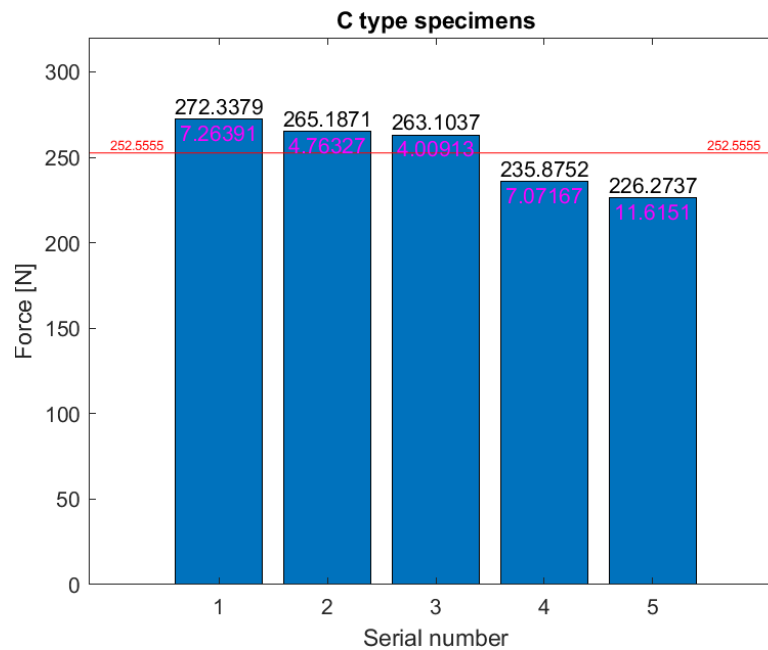
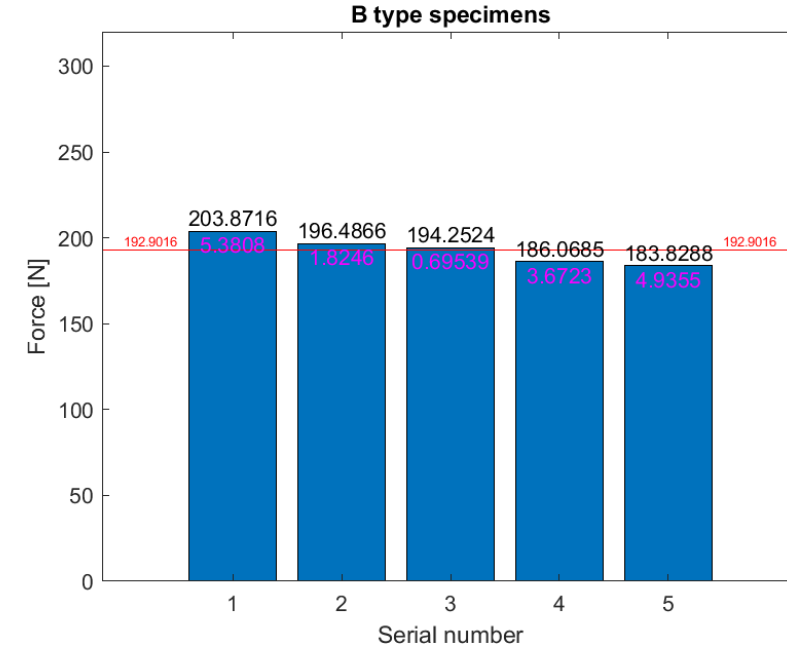
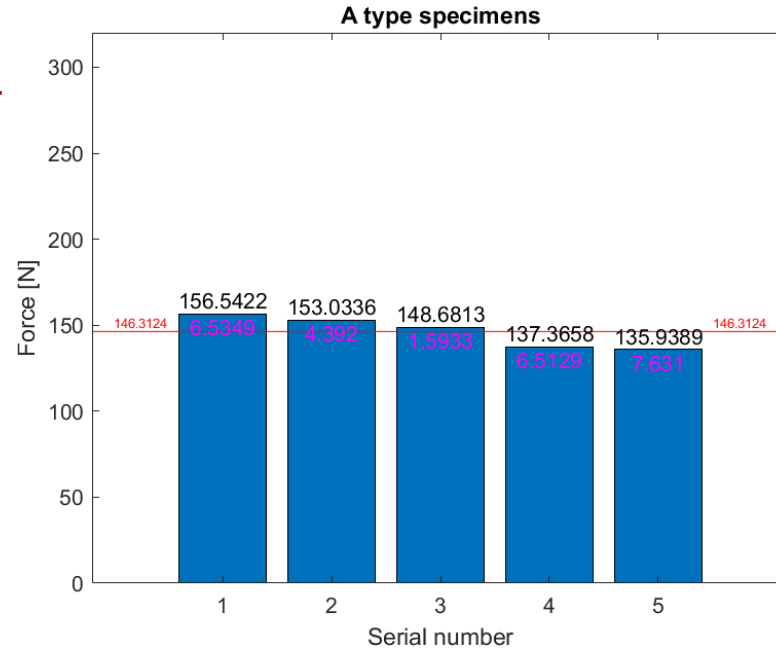
# Výsledky ťahovej skúšky vzoriek z nylonu vystuženého sekanými uhlíkovými vláknami - ASTM D638



<b>Parametre</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Hrúbka vrstvy [mm]</b>	<b>0.1, 0.125, 0.2</b>
<b>Základná rovina vzorky</b>	<b>XY</b>
<b>Typ výstuže</b>	<b>Sekané vlákna</b>
<b>Materiál výstuže</b>	<b>Uhlík</b>
<b>Usporiadanie výstužných vlákien [stupne]</b>	<b>0/90</b>
<b>Počet stien</b>	<b>2</b>
<b>Hustota výplne [%]</b>	<b>100</b>
<b>Typ výplne</b>	<b>Plná výplň</b>
<b>Vrchné a spodné vrstvy</b>	<b>1</b>
<b>Celkový počet vrstiev</b>	<b>5, 7, 9, 11</b>

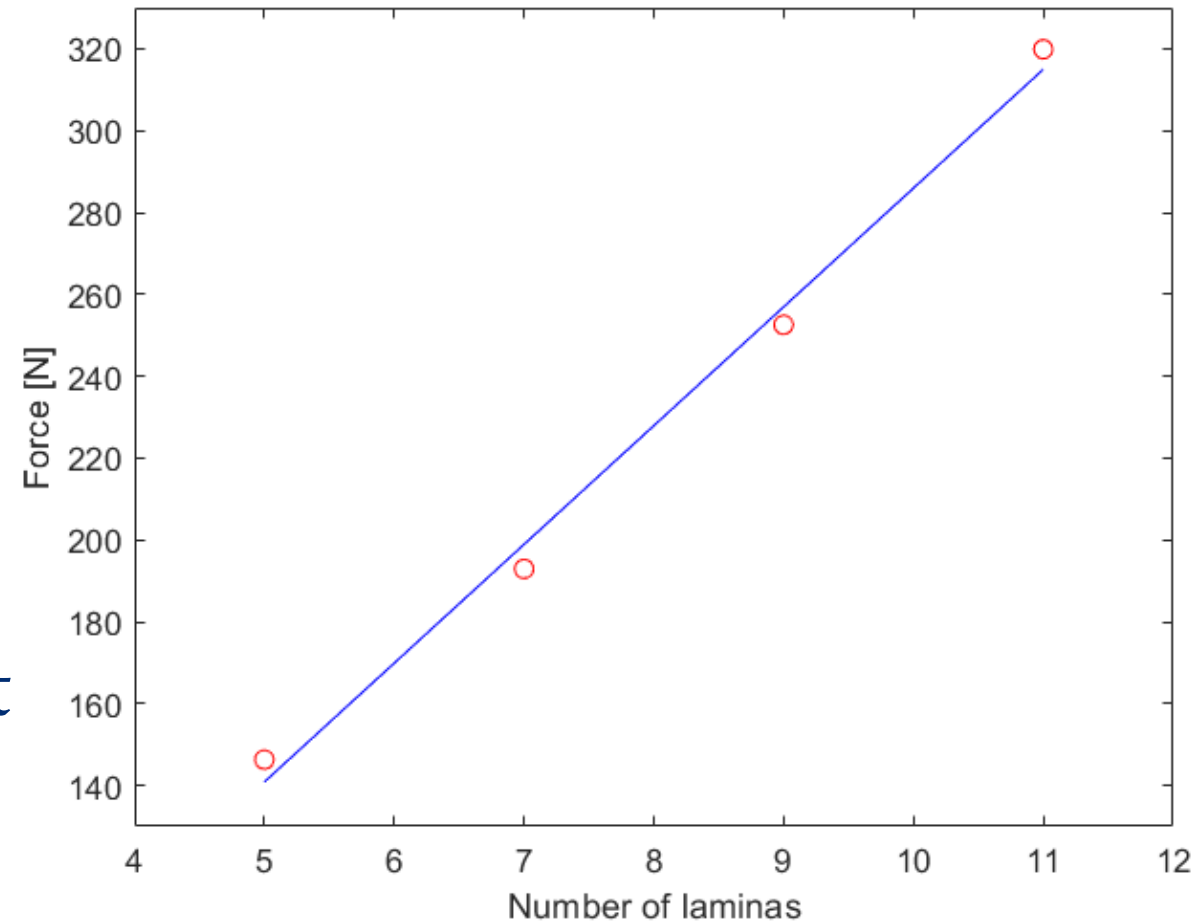


# Výsledky



# Korelačná analýza

- Bodový graf
- Trendová čiara opísaná lineárnou rovnicou :  
$$y = 29.017 * x - 4.2247$$
$$R^2 = 0.9936$$
- Pearsonov korelačný koeficient  
$$r = 0.9968$$



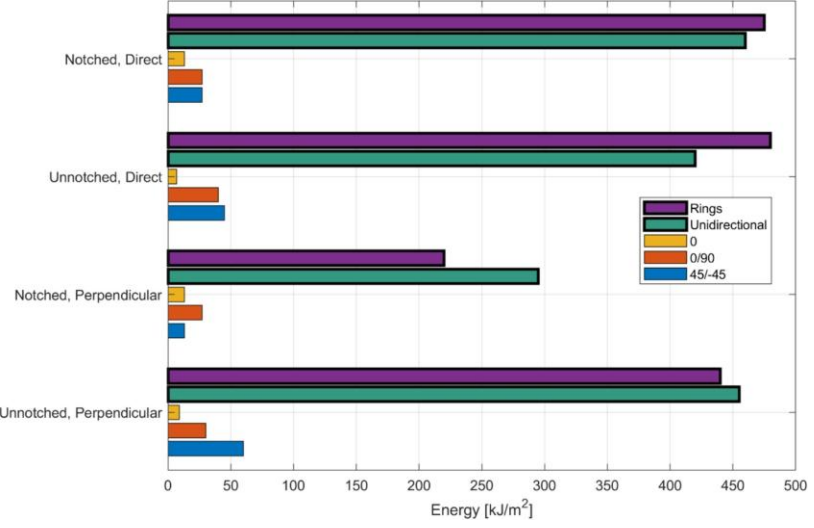
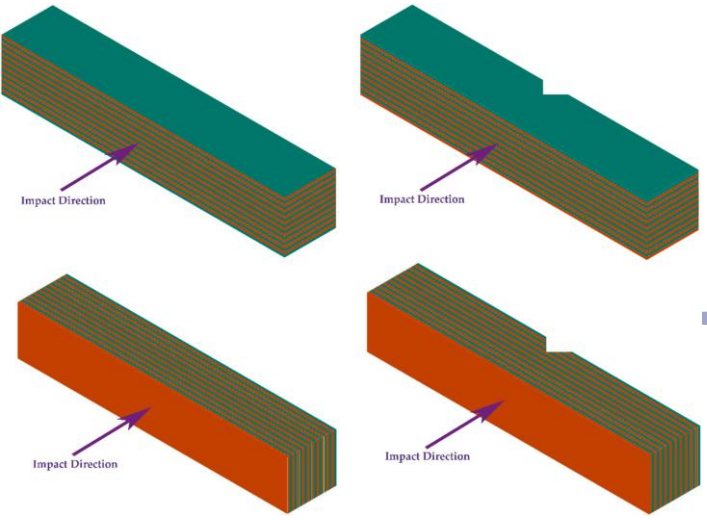
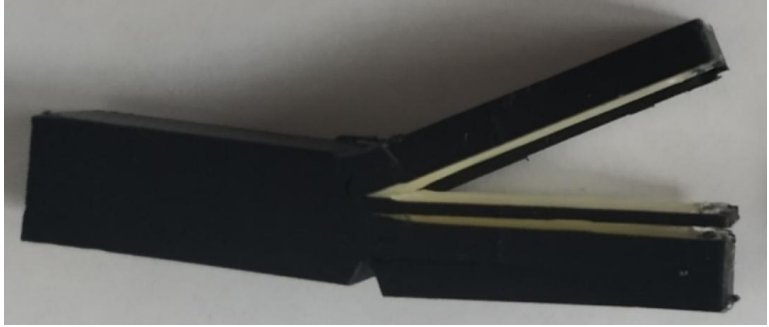
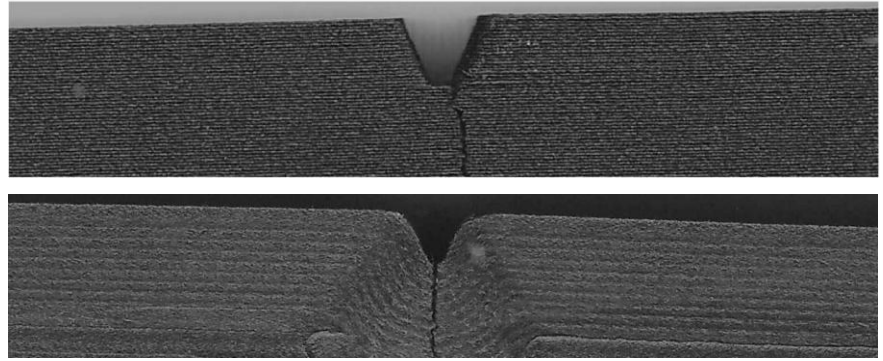
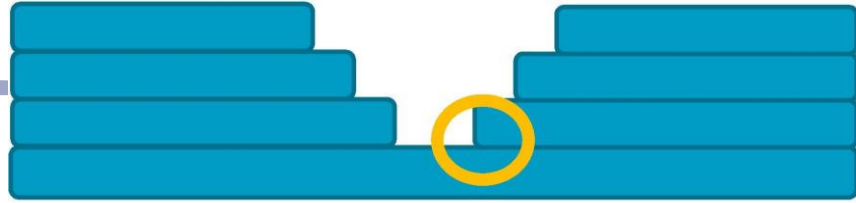
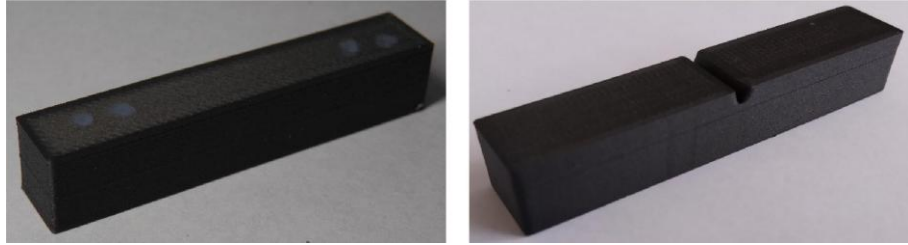
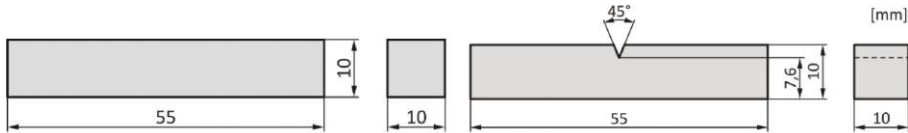
# Medza klzu laminy

Výpočty napätí na medzi klzu lamín boli vykonané pomocou rovnice :

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

Hrúbka 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>

# Charpyho rázová skúška



# Ďakujem