# Mechanické chování dílů zhotovených metodami RP

Vlastimil Kovář

Bakalářská práce
2011

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

| | |
|---|---|
| Jméno a příjmení: | **Vlastimil KOVÁŘ** |
| Osobní číslo: | **T07356** |
| Studijní program: | **B 3909 Procesní inženýrství** |
| Studijní obor: | **Technologická zařízení** |
| Téma práce: | **Mechanické chování dílů zhotovených metodami RP** |

Zásady pro vypracování:

1. **Zpracujte literární rešerši v dané oblasti**
2. **Připravte zkušební tělesa pro mechanické zkoušky**
3. **Proveďte experimentální zkoušky**
4. **Získané výsledky vyhodnoťte z hlediska praktických aplikací**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle zadání vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 7. ledna 2011

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
*děkan*

L.S.

doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: Kovář Vlastimil Obor: Technologická zařízení

# P R O H L Á Š E N Í

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby [1)];
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 [2)];
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)] odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 [3)] odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně ..... .....

[1] *zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:*

*(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.*

*(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

*(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

[2] *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

*(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

[3] *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

*(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

*(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

*(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

## ABSTRAKT

Moje práce je zaměřena na mechanické vlastnosti zkušebních tělísek vyhotovených metodami Rapid Prototyping. V teoretické části je popis vybraných mechanických zkoušek, dále popis metody Rapid Prototyping a jejich různých technologií. V praktické části je uvedena výroba zkušebních tělísek a jejich mechanické zkoušky.

V závěru práce vyhodnocuji a porovnávám mechanické vlastnosti materiálů.



Klíčová slova: Mechanické vlastnosti, zkouška tahem, zkouška ohybem, Rapid Prototyping, SLT, SLS, 3D tiskárna, FDM, LOM



## ABSTRACT

My work is focused on testing the mechanical properties of granules prepared by rapid prototyping methods. The theoretical part is a description of selected mechanical tests, a description of Rapid Prototyping and their various technologies. The practical part includes the production of test bodies and their mechanical testing.

In conclusion evaluate and compare the mechanical properties of materials.



Keywords: Mechanical properties, tensile test, bending test, Rapid Prototyping, SLT, SLS, 3Dprinter, FDM, LOM

Poděkování:
Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za odborné vedení, ochotně poskytnuté rady a soustavnou pozornost, kterou mi věnoval při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za čas, při které mi ukázal část výroby a vyrobil některá zkušební tělíska.

# OBSAH

**ÚVOD** ..... **10**

**I TEORETICKÁ ČÁST** ..... **11**

**1 HISTORIE RAPID PROTOTYPING V ČESKU** ..... **12**

**2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY** ..... **13**

2.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI A MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLŮ ..... 13

2.2 DRUHY ZKOUŠEK MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ..... 13

2.2.1 Zkouška tahem ..... 14

2.2.2 Zkouška ohybem ..... 17

2.2.3 Zkouška tlakem ..... 18

2.3 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ ..... 20

**3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY U PLASTŮ** ..... **21**

3.1 ZKOUŠKA TAHEM ..... 21

3.2 ZKOUŠKA OHYBEM ..... 22

3.3 ZKOUŠKA TLAKEM ..... 22

**4 RAPID PROTOTYPING** ..... **23**

4.1 PRINCIP METODY ..... 23

4.2 POUŽÍTÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING ..... 24

4.3 DĚLENÍ PRINCIPŮ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING ..... 24

4.4 POPIS JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGIÍ ..... 25

4.4.1 Stereo Lithography (STL) ..... 25

4.4.2 Selective Laser Sintering (SLS) ..... 27

4.4.3 3D Tisk ..... 30

4.4.4 Laminated Object Manufacture (LOM) ..... 31

4.4.5 Fused Deposition Modeling (FDM) ..... 32

4.5 VÝROBKY TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING ..... 33

**5 SROVNÁNÍ CNC FRÉZOVÁNÍ VS. RAPID PROTOTYPING** ..... **37**

**6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE** ..... **39**

**II PRAKTICKÁ ČÁST** ..... **40**

**7 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ** ..... **41**

7.1 OBJET EDEN 250 ..... 41

7.2 STRATASYS DIMENSION SST 768 ..... 42

7.3 GRAPHTEC CE 3000-60 ..... 43

7.4 VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG 420C ..... 44

7.5 ZWICK 1456 ..... 45

**8 3D MODELY** ..... **47**

**9 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES ..... 48**
**10 ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ ..... 50**
10.1 ZKOUŠKA TAHEM ..... 50
10.1.1 3D Tisk (OBJET) ..... 51
10.1.2 FDM (naplocho) ..... 53
10.1.3 FDM (na výšku) ..... 56
10.1.4 FDM (na T) ..... 58
10.1.5 Vstřikování ABS ..... 61
10.1.6 Souhrnné výsledky tahu ..... 63
10.2 ZKOUŠKA OHYBEM ..... 65
10.2.1 3D Tisk (OBJET) ..... 66
10.2.2 FDM ..... 68
10.2.3 LOM ..... 70
10.2.4 Vstřikování ABS ..... 71
10.2.5 Souhrnné výsledky ohybu ..... 73
**ZÁVĚR ..... 75**
**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY ..... 76**
**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK ..... 77**
**SEZNAM TABULEK ..... 78**
**SEZNAM OBRÁZKŮ ..... 79**

# ÚVOD

Při použití konvenčních metod obrábění se z kovového polotovaru odebírají vrstvy materiálu. Vznikají tak materiálové odpady, které většinou nemohou být dále zpracovány. Je zde vysoká časová náročnost, protože bývá používáno více technologií k vyrobení jediné součásti. Proto za účelem zrychlení výroby a snížení finančních nákladů byla vynalezena technologie Rapid Prototyping, která umožňuje zpracování i kovových materiálů. Komponenta vyrobená technologií Rapid Prototyping může představovat prototyp nebo přímo funkční součást.

Podstata této metody spočívá v navržení 3D digitální součásti, která je rozkrájena na virtuální tenké vrstvy a podle těchto digitálních vrstev je tvořena reálná geometrie výrobku. Součást je stavěna vrstvu za vrstvou postupným přidáváním materiálu a nevzniká zde žádný odpad. Bez problémů může být vyroben jakýkoliv tvar součástky, která může být tvořena například vnitřními nesymetrickými dutinami, zkosenými žebry nebo osazením. Výrobní čas oproti konvenčním metodám se zkrátil ze dnů na hodiny.

Různé materiály se používají na odlišné použití v praxi. Proto jednou z možností, jak porovnávat různé materiály a jejich vhodnost pro určité použití je zjišťování jejich mechanických vlastností, jako je např. modul pružnosti, tažnost, pevnost.

# I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 HISTORIE RAPID PROTOTYPING V ČESKU

Firma 3D Tech uvedla Rapid Prototyping (dále RP) do České republiky v roce 1994. Do té doby zde nebylo o těchto metodách mnoho známo, takže koncem roku 1993 3D Tech uspořádali sérii přednášek, které seznamovaly s možnostmi technologií, jež se v zahraničí začaly používat. Metoda RP není příliš stará, první zařízení bylo patentováno v roce 1986, v roce 1988 byl vyroben pvní stroj pro komerční využití a do Evropy se tyto stroje dostaly v roce 1991. První stereolitograf, SLA 250 (Obr.1), dovezla firma v roce 1998. Jedná se o malý stroj, jeden z prvních, které firma 3D Systems vyrobila, s plynovým laserem a poměrně zastaralým řídicím systémem, ale umožnil výrobu prvních stereolitografických modelů na území ČR. V dalším roce 3D Tech dovezla větší a již moderní stroj SLA 3500 s pevnolátkovým laserem, který umožňuje stavbu větších modelů. Potom začaly i jiné firmy s rozsáhlým používáním netod RP. [1]

Obr.1 Přístroj SLA250

# 2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

## 2.1 Mechanické vlastnosti a mechanické charakteristiky materiálů

Mechanické vlastnosti materiálů jsou prakticky čtyři (pružnost, plasticita, pevnost a houževnatost), ale mechanických charakteristik je mnohem víc. Důvod, proč počet vlastností a charakteristik není stejný, spočívá v experimentální povaze mechanických charakteristik. Pro experimentální určení libovolné mechanické charakteristiky musíme z daného materiálu vyrobit zkušební těleso a zkoušet vliv vnější síly (zatížení) na toto těleso. Proto mechanické charakteristiky nejsou absolutní konstanty daného materiálu, ale jsou to veličiny, které do jisté míry závisí na podmínkách zkoušky. Výsledky mechanických zkoušek se používají k různým účelům. Uživatelé materiálu používají např. pevnost v tahu, nebo mez kluzu materiálu při pevnostních výpočtech konstrukcí, strojních zařízení apod.. Výrobci materiálu používají mechanické charakteristiky pro testování svého výrobku např. ocelových plechů, dávky betonu apod.. Na základě výsledků zkoušek je dána záruka mechanických vlastností materiálu. Proto výrobci a uživatelé materiálu a další organizace, které se zabývají materiálem společně vyvíjejí normy pro zkoušky materiálu. V každé zemi existuje instituce, která je pověřena vydáváním národních norem. V České republice je to Český normalizační institut a naše normy jsou označeny ČSN. V různých zemích mají své vlastní označení norem. [ 8 ]

## 2.2 Druhy zkoušek mechanických vlastností

Podle způsobu působení síly na zkušební vzorek rozdělujeme zkoušky na:

• Statické zkoušky – zatížení narůstá zvolna, doba působení zatížení je několik minut, u dlouhodobých zkoušek i dny nebo roky. Patří mezi nejpoužívanější zkoušky, materiál zatěžujeme pozvolna bez rázu. Provádí se zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem a střihem. (Obr.2)

• Dynamické zkoušky – zatížení působí po nárazově po dobu zlomku sekundy (rázové zkoušky) nebo se zatížení cyklicky opakuje i několikrát za sekundu (cyklické zkoušky).

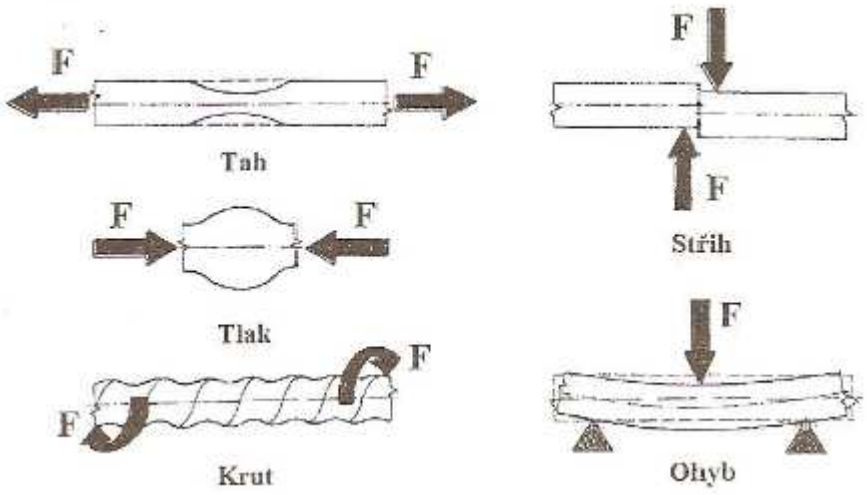
• Zvláštní zkoušky – jejich výsledky závisí na řadě dalších činitelů a udávají nám různé směrné hodnoty. Patří sem např. zkoušky tvrdosti nebo technologické zkoušky.

Podle teploty, při které probíhají rozdělujeme zkoušky na:

• Zkoušky za normálních teplot

• Zkoušky za vysokých teplot

• Zkoušky za nízkých teplot [ 9, 10 ]




Obr.2 Základní druhy namáhání

### 2.2.1 Zkouška tahem

Je nejrozšířenější mechanickou zkouškou, jíž se zkouší obvykle tělesa bez vrubů (Obr.3). Při této zkoušce vzniká ve zkušebním tělese jednoosá rovnoměrná tahová napjatost, s níž se v provozních podmínkách setkáváme jen výjimečně. Přesto mají vlastnosti určené zkouškou tahem velký význam, neboť je na základě dlouholetých zkušeností umíme správně hodnotit. Při běžné zkoušce tahem se zjišťují tyto čtyři mechanické vlastnosti: [ 11 ]

- mez kluzu v tahu (pevnost v kluzu)

$$R_e = F_e / S_o \ [Mpa]$$

$F_e$ – zátěžná síla na horní mezi kluzu

$S_o$ – počáteční průřez zkušební tyče

- mez pevnosti v tahu (pevnost v tahu)

$$R_m = F_m / S_o \ [Mpa]$$

$F_m$ – maximální zátěžná síla

$S_o$ – počáteční průřez zkušební tyče

- tažnost

$$A=(L_u-L_o)/L_o*100\ [\%]$$

$L_u$ – délka tyče po přetržení

$L_o$ – počáteční délka tyče

- kontrakce

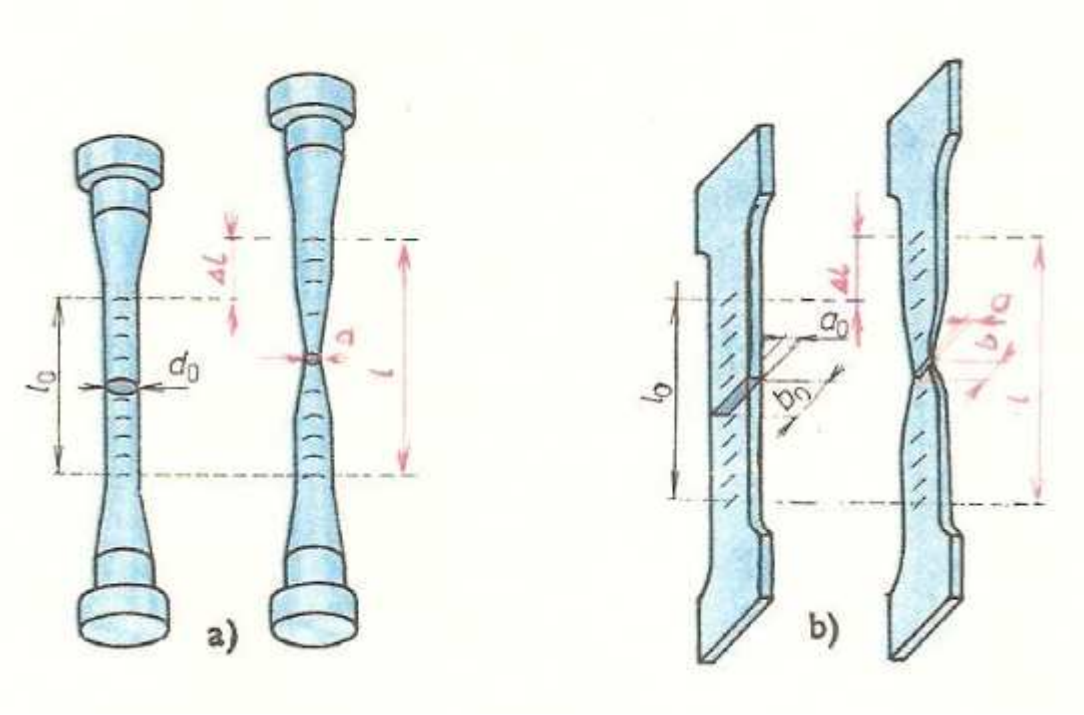
$$Z=(S_o-S_u)/S_o*100\ [\%]$$

$S_o$ – počáteční průřez zkušební tyče

$S_u$ – průřez tyče v nejužším místě po přetržení [ 9 ]

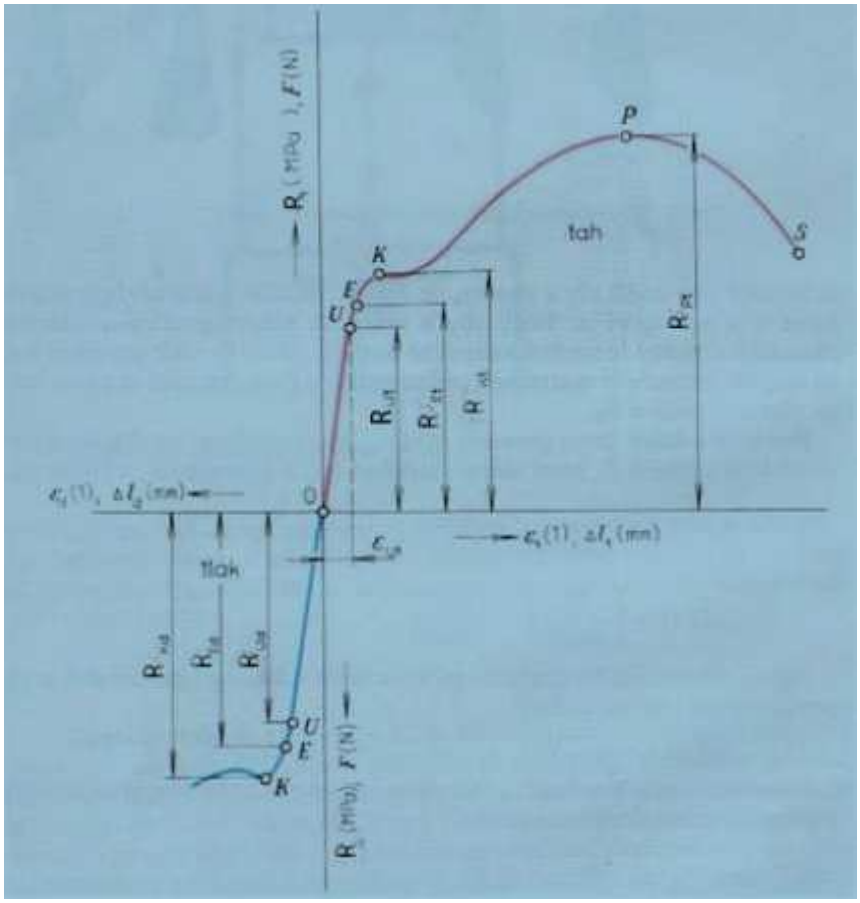
Zkoušku tahem provádíme na trhacím stroji, který kreslí v průběhu zkoušky tzv. pracovní diagram (Obr.4) (závislost zatěžující síly F na změně délky ΔL). V diagramu můžeme sledovat několik charakteristických bodů a jím odpovídajících napětí:

• U – mez úměrnosti – napětí je přímosměrné deformaci. Do meze úměrnosti platí Hookův zákon.
• E – mez pružnosti – smluvní hodnota napětí vyvolávající trvalou deformaci určité velikosti. Zjišťování této meze je obtížné a zdlouhavé.
• K – mez kluzu – napětí, při němž se zkušební vzorek začne výrazně prodlužovat, aniž by stoupla zatěžující síla.
• P – mez pevnosti – největší napětí, které snese zkušební vzorek.
• S – bod, kdy dojde k přetržení zkušebního vzorku. [ 9 ]




Obr.3 Zkušební tyče pro zkoušku tahem

*a) zkušební tyč kruhová b) zkušební tyč plochá*




Obr.4 Pracovní diagram

### 2.2.2 Zkouška ohybem

Při zkoušce se zkušební tyč obdélníkového nebo kruhového průřezu položí na dvě opory (zpravidla válečky). Zkušební stroj pracuje v režimu tlakového zatěžování. Horní část přípravku pro ohybovou zkoušku tvoří jeden trn, který působí silou uprostřed zkušební tyče (Obr.5), nebo dva trny umístěné symetricky vzhledem ke středu tyče (Obr.6). Účelem zkoušky je získat závislost síla - průhyb tyče. Průhyb se měří snímačem přemístění středu tyče vzhledem k nejbližším oporám. [ 8 ]

Při průhybu není napětí v průřezu zkušební tyče konstantní, ale mění se. Na povrchu vzorku, proti zatěžovacímu trnu působí maximální tahové napětí. Směrem ke středu tyče napětí klesá na nulovou hodnotu a dále nabývá záporných hodnot, je tlakové.

Zkouška se používá pro hodnocení křehkých materiálů např. litiny, konstrukční keramiky apod.. Za pevnost v ohybu se bere maximální hodnota tahového napětí působícího na povrchu tyče v okamžiku lomu. Hodnota smluvní pevnosti v ohybu $R_{mo}$ je dána vztahem

$$R_{mo} = M_{omax}/W_o \ [MPa]$$

$M_{omax}$ – největší ohybový moment

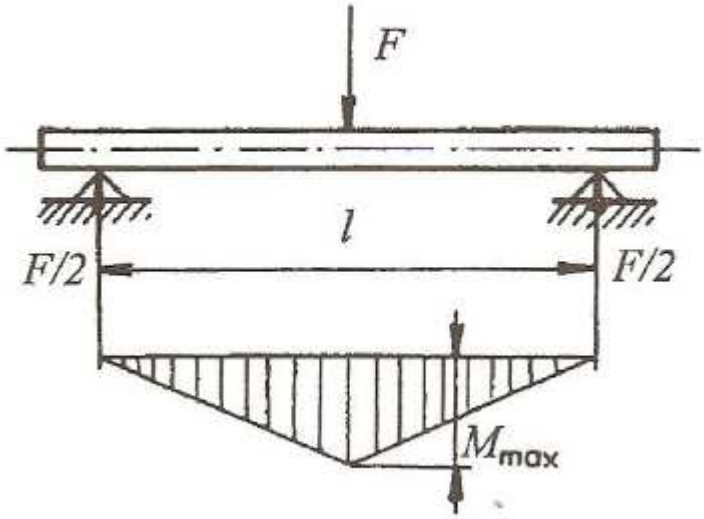
$W_o$ – modul průřezu v ohybu

$W_o=\pi*d^3/32 \ [mm^3]$ – pro kruhový průřez

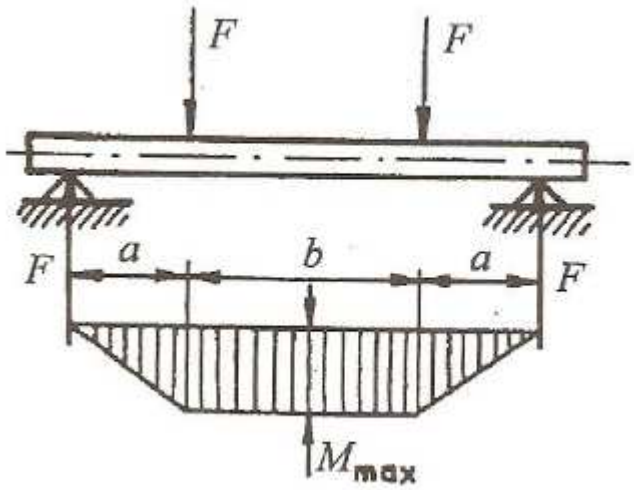
$W_o=b*h^2/6 \ [mm^3]$ – pro obdélníkový průřez

Hodnota $R_{mo}$ je výrazně závislá na kvalitě povrchu zkušebního tělesa.

Zkoušky ohybem tvárných materiálů využívají většinou technologové k odhalení existence povrchových trhlin v okolí svaru, zjištění mezní deformace při ohýbaní plechů apod.. [ 8 ]




Obr.5 Zkouška tříbodovým ohybem




Obr.6 Zkouška čtyřbodovým ohybem

### 2.2.3 Zkouška tlakem

Zkušebním tělesem je zpravidla váleček o výšce $h_o$ a průměru $d_o$ (Obr.7). Zkušební těleso se položí mezi dvě podložky, z nichž jedna je uložena v kulovém sedle (Obr.8). Kulové sedlo zajišťuje zatížení v ose válečku. Při zkoušce se zaznamenává tlaková síla v závislosti na velikosti stlačení výšky válečku.

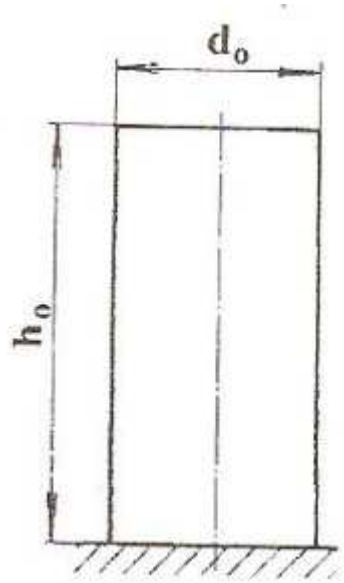
Tlakovou zkouškou se hodnotí pevnost hlavně křehkých materiálů např. šedá litina, stavební materiály, kompozice apod. – tj. materiálů, které slouží pro výrobu součástí, kon-

strukcí namáhaných v provozu tlakovým zatěžováním. Základní veličina pevnost v tlaku je dána vztahem: [ 8 ]

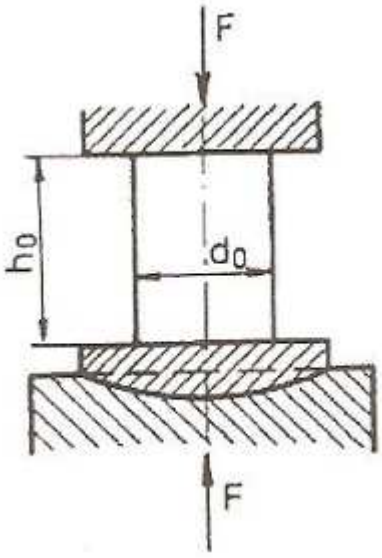
$$R_{md} = F_{max}/S_o \text{ [MPa]}$$

$F_{max}$ – největší zátěžná síla

$S_o$ - počáteční průřez zkušebního vzorku



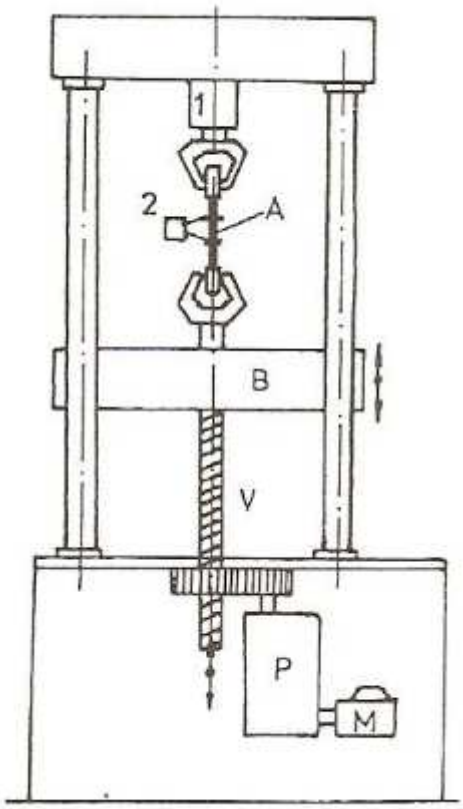

Obr.7 Zkušební vzorek




Obr.8 Zatěžování zkušebního tělesa

## 2.3 Zkušební zařízení

K základnímu vybavení laboratoře mechanických zkoušek patří univerzální zkušební stroj (Obr.9), na kterém se provádí zkoušky tahem, tlakem a zkouška ohybem. Se sériovou výrobou zkušebních strojů se začalo na konci minulého století. Princip stroje zůstal zachován do dnešní doby. Stroj tvoří pevný rám, v jehož horní části je umístěn dynamometr – zařízení pro měření síly. Zkušební těleso je jedním koncem uchyceno k dynamometru a druhým koncem k pohyblivému příčníku. Příčník je uváděn do pohybu motorem, přes vřeteno a převodovou skříň. Při pohybu příčníku dochází k postupnému zatěžování a deformaci zkušebního tělesa. Deformace tělesa je registrována průtahoměrem. Vhodnou úpravou uchycení zkušebního tělesa a průtahoměru se na tomto stroji provádí i ostatní mechanické zkoušky. Pohon zkušebních strojů může být mechanický nebo hydraulický. [ 8 ]




Obr.9 Schéma univerzálního zkušebního stroje

*1- dynamometr, 2- průtahoměr, A- zkušební těleso, B- pohyblivý příčník*

*M -motor, P- převodová skříň, V- vřeteno*

# 3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY U PLASTŮ

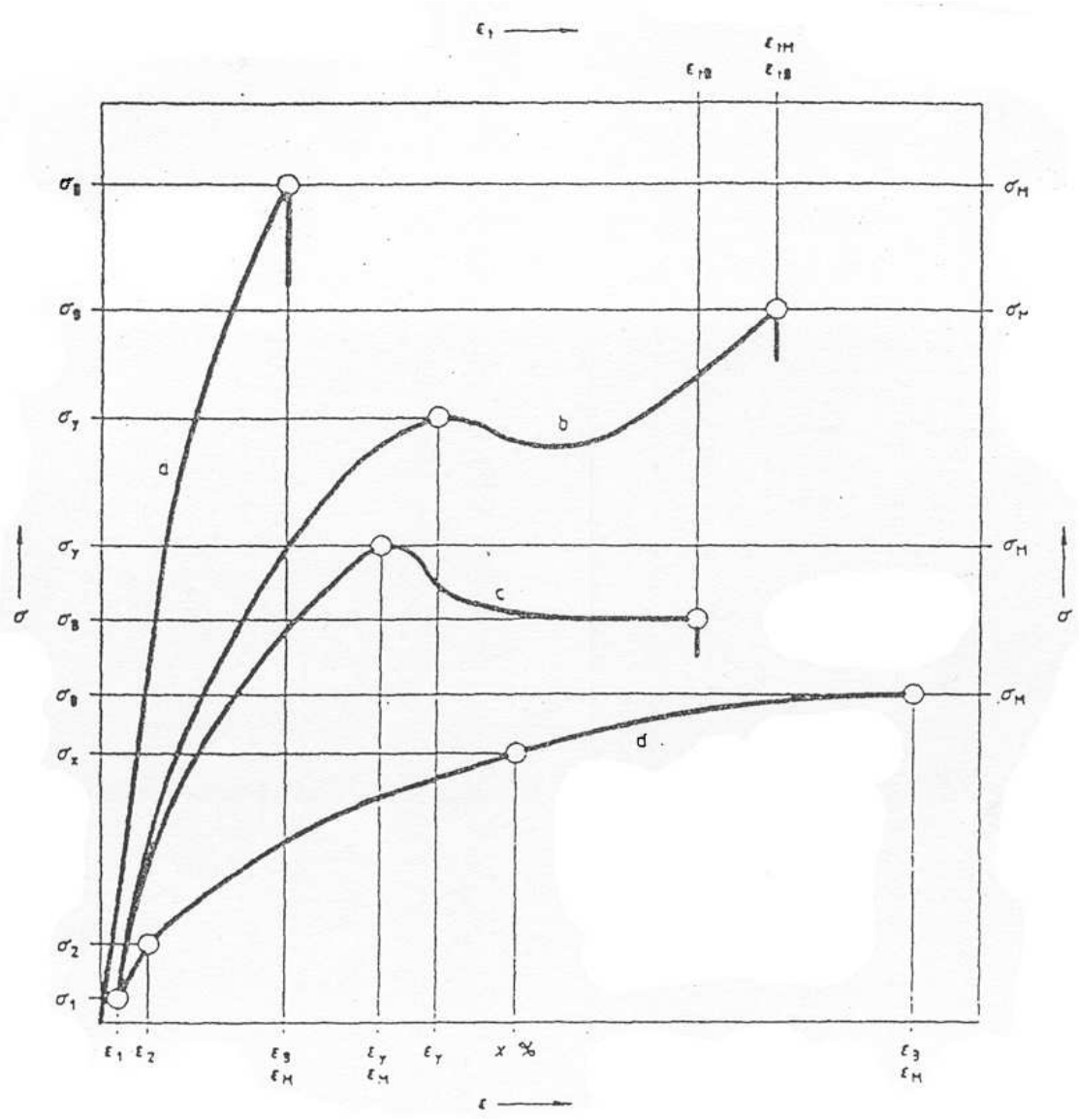
U plastů jsou základní mechanické zkoušky tyto:

- Zkouška tahem, ohybem a tlakem [ 9 ]

## 3.1 Zkouška tahem

Při praktickém provedení zkoušky je stejné jako u kovových materiálů.

V závislosti na vnitřní struktuře, stupni krystalinity, teplotě okolí a dalších vnějších vlivech rozlišujeme tři základní typové chování polymeru: křehký materiál (a), houževnatý materiál s mezí kluzu (b,c) a houževnatý materiál bez meze kluzu (d) (Obr.10) [ 12 ]




Obr.10 Typické křivky napětí/poměrné prodloužení pro polymerní materiály

## 3.2 Zkouška ohybem

Při ohybové zkoušce se zkušební těleso namáhá tlakem a tahem současně.
V horních vrstvách je napětí tlakové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tahové.

V průběhu zkoušky je měřena působící síla, pokud možno automatickým záznamovým zařízením, poskytujícím úplnou křivku závislosti síla v ohybu/průhyb.
Je zvlášť vhodná pro křehké plasty, pro které je provedení zkoušky tahem obtížné. [ 8 ]

## 3.3 Zkouška tlakem

Při deformaci v tlaku nastává zkracování zkušebního tělesa. U tuhých, tvrdých a křehkých plastů napětí v tlaku stoupá do meze pevnosti, která je destrukční mezí. Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztříštění nebo pomalejšímu rozdrcení materiálu. Často dochází k výskytu trhlin na povrchu zkušebního tělesa, aniž by došlo k velké deformaci a byla porušena celková soudržnost. Při stlačování houževnatých a měkčích plastů se těleso deformuje, aniž by docházelo k jeho viditelné destrukci. [ 8 ]

# 4 RAPID PROTOTYPING

Cílem technologie Rapid Prototyping je vytvoření reálného modelu z počítačových dat v co nejkratším čase a v co nejvyšší kvalitě. Historie této technologie sahá do 80. let minulého století, kdy byla vyvinuta technika stereolitografie. Použití této technologie má za následek zrychlení celého procesu vývoje výrobku a tedy i snížení nákladů a zlepšení kvality. Technologie umožňuje již v etapě vývoje ověřit funkci vyvíjeného výrobku, design a ergonomii, ale slouží také k výrobě finálních výrobků tam, kde se jedná o menší počet kusů nebo o výrobu součástí klasickými technologiemi nevyrobitelných (např. formy se zavřenými dutinami). V budoucnu může sloužit k výrobě náhradních dílů družic při letech na vzdálené planety. Mezi nejpoužívanější a nejefektivnější RP technologie patří stereolitografie (STL) (Obr.11) a selective laser sintering (SLS) (Obr.13), obě pracující na podobném principu. Volba nejvhodnější RP technologie závisí na účelu a na požadovaných vlastnostech konečného dílu. [ 2,3]

## 4.1 Princip metody

Základem je 3D geometrický model vytvořený v CAD programu nebo odměřený prostorovým skenerem. Ten je převeden do příslušného formátu (nejčastěji STL). Takto připravená data jsou pak načtena do speciálního softwaru Rapid Prototyping. Virtuální (počítačový) model je rozřezán příčnými řezy s definovaným nastavením vzdálenosti jednotlivých vrstev. Dále se navrhne podpůrná konstrukce pro vytváření modelu a pro oddělení modelu od nosné desky.

Na rozdíl od konvenčních metod obrábění, u kterých je materiál z výchozího polotovaru odebírán, je u technologie Rapid Prototyping materiál po vrstvách přidáván. Součást je pro výrobu rozdělena na veliké množství jednotlivých vrstev o tloušťce v řádu setin až desetin milimetru, které je možno považovat v podstatě za dvoudimenzionální (2D). Každá vrstva má svůj 2D tvar. Kladením jednotlivých vrstev na sebe lze poměrně snadno vyrobit prostorové předměty značné geometrické složitosti. [ 2 ]

## 4.2 Použití technologie Rapid Prototyping

V současné době se technologie Rapid Prototyping používá:

- pro vytvoření prostorových modelů složitých objektů s cílem získání názorné představy o celkovém provedení a tvaru;
- ke kontrole designu navrhovaného objektu;
- při vývoji výrobku, tzn. že navrhovanou součást je možno v kterékoli fázi vývoje snadno vyrobit a následně korigovat další vývojové fáze;
- k ověření a optimalizaci výrobku: mimo korekce tvaru je možno např. snáze vybrat z konkurenčních návrhů ten nejlepší;
- v oblastech výroby forem a nástrojů;
- k simulacím v oblastech namáhání, proudění, koncepčního konstruování, designu a archivace 3D objektů.

Rozhodnutí o výběru a použitelnosti konkrétní metody Rapid Prototyping pro daný případ závisí na:

- požadované přesnosti výrobku;
- nalezení vhodného materiálu pro výrobu součásti;
- možnosti dodatečného obrobení funkčních ploch součástky. [ 2 ]

## 4.3 Dělení principů technologie Rapid Prototyping

Principy technologie Rapid Prototyping je možno rozdělit z několika hledisek.

Dělení z hlediska použitého materiálu:

- tekuté materiály: Stereo Lithography;
- práškové materiály: Selective Laser Sintering, Direct Shell Production Casting, ProMetal 3D Printing, Direct Laser Forming;
- tryskové spojování: Multiphase Jet Solidification;
- tryskové tištění: Fused Deposition Modeling, Ballistic Particle Manufacturing, Multi-Jet Modeling, Model Maker 3D Plotting;
- polymerní materiály: Solid Ground Curing;
- papírové materiály: Laminated Object Manufacture.

Dělení z hlediska výrobního postupu:

- systém přidávání vrstev při použití laseru s vytvrzováním bod po bodu;
- systém přidávání vrstev při použití laseru s vytvrzováním po vrstvách;
- systém přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním bod po bodu;
- systém přidávání vrstev bez použití laseru s vytvrzováním po vrstvách. [ 2 ]

## 4.4 Popis jednotlivých technologií

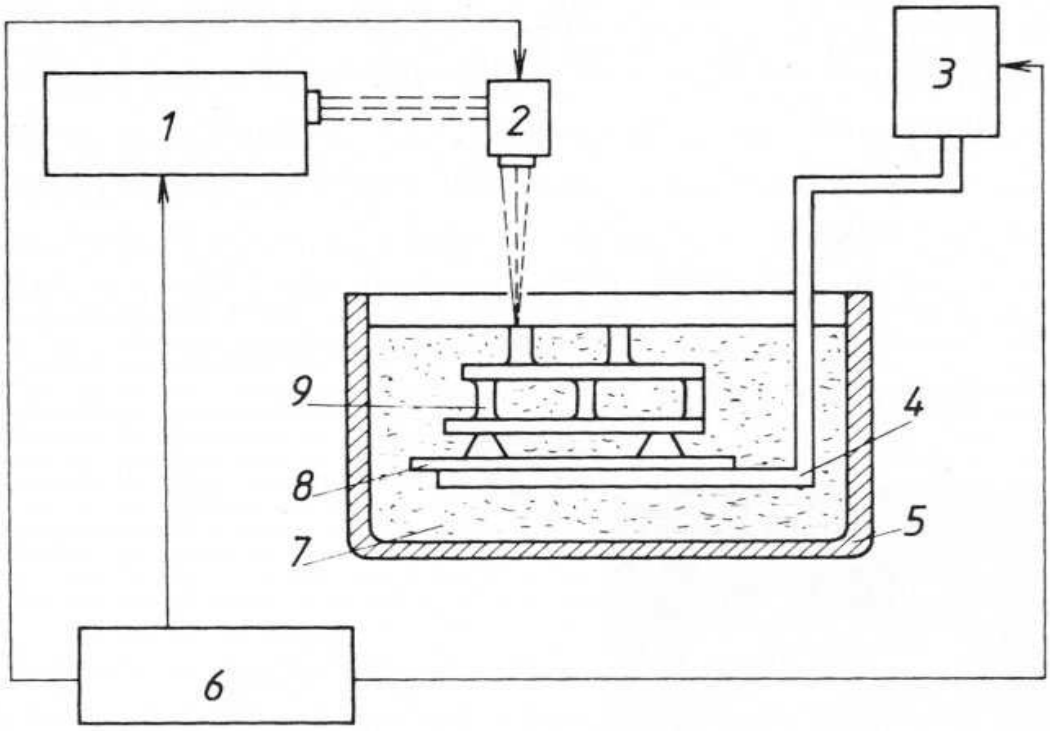
### 4.4.1 Stereo Lithography (STL)

Stereolitografický stroj (Obr.12) je složen ze tří hlavních částí: z pracovní komory, řídicí jednotky a opticko-laserového systému. V pracovní komoře je umístěna nádoba s epoxidovou pryskyřicí, ve které se ve směru osy Z pohybuje platforma a nůž zajišťující rovinu pryskyřice v každé vrstvě. Řídicí jednotka obsahuje počítač, který ovládá celý stroj - od nastavení parametrů laseru až po řízení procesu výroby. Poslední část, opticko-laserový systém, se skládá z plynového či pevnolátkového laseru, čoček a soustavy zrcadel pro nasměrování laserového paprsku.

Před samotnou stavbou na stereolitografu se nejprve počítačový model zbaví případných chyb, jako jsou převrácené trojúhelníky, špatné hrany a tzv. díry v modelu. Poté se určí nejvhodnější poloha modelu tak, aby se minimalizovaly dokončovací práce, vygenerují se podpory a nakonec se vše přeloží do speciálního formátu, v němž je definován tvar jednotlivých vrstev modelu. Tyto vrstvy mohou být silné 0,05 až 0,15 mm, což zaručuje dosažení i těch nejmenších detailů. Stavba stereolitografického (SLA) modelu je založena na postupném vykreslování 2D vrstev na hladinu pryskyřice laserovým paprskem. V místě dopadu paprsku je pryskyřice vytvrzena a platforma se posune o zadaný krok (vrstvu) v ose Z směrem dolů. Před vykreslováním každé vrstvy zarovná nůž hladinu pryskyřice tak, aby byla zachována tloušťka vrstvy. Poté se celý proces opakuje tolikrát, dokud není vykreslena poslední vrstva. Uchycení modelu k platformě je dosaženo výše zmíněnými podporami, které model fixují v dané poloze a zabraňují jeho zborcení. Podpory musí být řešeny tak, aby se daly co nejsnáze z modelu odstranit a zároveň neovlivnily výslednou kvalitu povrchu. Po skončení stavby (vykreslení poslední vrstvy) se model vyjme a dokonale umyje od nevytvrzené pryskyřice. Na finální vytvrzení slouží UV komora, kde model získá požadovanou pevnost a opracovatelnost.

Úloha master modelu vzniklého v prototypové výrobě je velmi různorodá, počínaje designérskou studií, ověřením funkčnosti celé sestavy přes silikonové a vstřikolisové formy až po výrobu sádrové formy pro odlitky z hliníkových a hořčíkových slitin. Výhoda stereolitografického master modelu tkví v možnostech povrchového dokončování - od běžného broušení přes pískování až po lakování a leštění. Mezi nejvýznamnější přednosti celé stereolitografie patří zejména rychlost výrobního procesu při udržení vysoké kvality a detailnosti modelu s ohledem na jeho cenu, dále vyhovující přesnost (v rozmezí 0,05 ÷ 0,2 mm/100 mm) a široké spektrum použití.

Důležité je i použití STL v medicíně, kdy se data z tomografu nebo magnetické rezonance převedou pomocí speciálního softwaru na objemový model, který je následně použit při výrobě stereolitografického modelu. Lze tak například zkrátit dobu přípravy komplikované operace nebo usnadnit výrobu náhrady (implantátu) za poškozený kloub. [ 2 ]




Obr.11 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie

*1 - laser, 2 - pracovní hlava laseru, 3 - systém pro posuv nosné desky, 4 - nosná deska, 5 - pracovní vana, 6 - CNC řídicí systém, 7 - fotopolymer, 8 - podložka, 9 - vyráběná součást*

Obr.12 Zařízení stereolitografi

### 4.4.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda Selective Laser Sintering (SLS) (Obr.12) využívá spékání práškového materiálu pomocí laseru. Byla vyvinuta na texaské univerzitě v Austinu. Na rozdíl od stereolitografie jsou modely vyrobené metodou SLS velmi pevné. Podstatou SLS je, že paprskem $CO_2$ laseru je prášek spékán do požadovaného tvaru. Přídavný materiál je nanášen na nosnou desku v inertní atmosféře (dusík nebo argon) po vrstvách. Podle vypočtených souřadnic bodů rovin řezů je řízena XY skenovací hlava, která vede paprsek laseru nad povrchem prášku nasypaného ve vaně. V místě působení laseru se přídavný materiál buď speče, nebo roztaví a ztuhne. Okolní neosvícený materiál slouží jako nosná konstrukce. Výroba součásti probíhá po vrstvách. Po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží o hodnotu odpovídající hloubce vrstvy. Je možné vytvářet vrstvy tloušťky od 0,02 mm do několika desetin milimetru.

Na rozdíl od jiných metod technologie Rapid Prototyping je možné použít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví nebo měkne - například termoplastické materiály, jako jsou polyamidy, polyamidy plněné skelnými vlákny, polykarbonáty, polystyreny,

speciální nízkotavitelné slitiny z niklových bronzů nebo ocelové prášky povlakované polymery. Přitom na stejném zařízení většinou nelze přecházet od jednoho materiálu k druhému, neboť jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky.

Podle druhu použitého modelovacího materiálu se v rámci této technologie rozlišují metody:

- Laser - Sintering Plastic: součást lze vyrobit z několika druhů plastických materiálů, např. při použití polystyrenu je možné vyrobenou součást využít při metodě lití do ztraceného vosku, při použití nylonu dosahují vyrobené součásti vynikající mechanické vlastnosti, jako tvrdost, houževnatost, teplotní odolnost. Tyto modely jsou proto vhodné pro funkční zkoušky nebo testy skutečně potřebného stupně lícování;

- Laser - Sintering Metal: používají se speciálně vyvinuté kovové prášky. Hustota vyrobených součástí je 60 % teoretické hodnoty. Vyrobené součásti mají dostatečnou pevnost a mechanickou odolnost, takže je lze použít především jako formy pro výrobu plastových výlisků vstřikováním nebo lisováním;

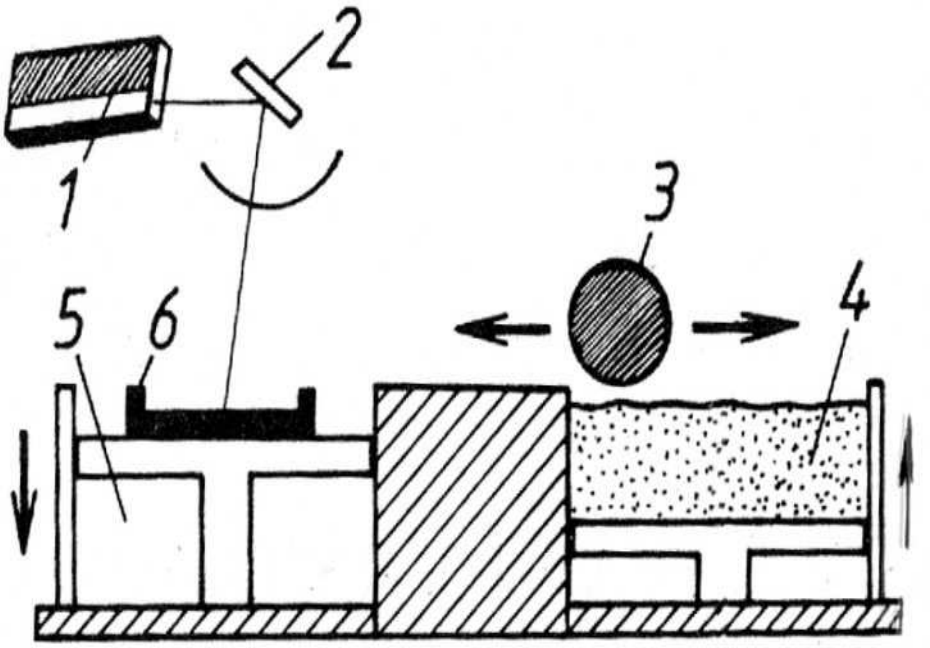
- Laser - Sintering Formsand: metoda používá jako výchozí materiál upravený slévárenský písek, jehož vytvrzováním je možno bez jakýchkoliv mezikroků vytvořit klasickou pískovou formu pro lití;

- Laser - Sintering Ceramic: jako výchozí materiál se používá prášek spojovaný pomocí tekutého pojiva. Nanášení pojiva je zajištěno pomocí Ink-Jet tryskové hlavy, která je vedena v rovině XY podle předem vypočítaných řídicích údajů. Touto metodou se dají vyrábět součástky z keramického prášku, formy a jádra pro technologii přesného lití;

- Laser Micro Sintering: jako výchozí materiál se používá wolfram o velmi malé zrnitosti. Pro spékání prášku se používá Nd:YAG laser o výkonu 10 W. Součást je vytvářena po vrstvách o tloušťce 0,03 mm a dosahuje se kvality povrchu méně než Ra 1,5 μm;

- 3-D Laser Cladding: jako výchozí materiál se používá kovový prášek, který se dodává plynule do stopy dopadu paprsku laseru, kde se taví. Proces probíhá v uzavřené komoře za asistence inertního plynu. Vyrobené součásti mají hustotu a

mechanické vlastnosti srovnatelné se součástmi vyrobenými konvenčními technologiemi. Jako prášku např. při výrobě součástí letadel se používají titanové, niklové, kobaltové a hliníkové slitiny. Pro výrobu náhrad kyčelních kloubů se používá práškový materiál Ti6Al4V, výrobek má stejné hodnoty tažnosti a odolnosti proti únavě jako dosud používané tvářené materiály. [ 2 ]



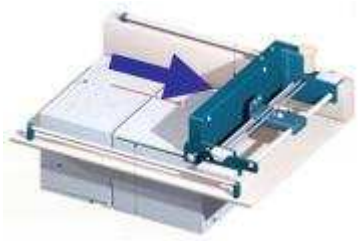

Obr.13 Schéma zařízení pro technologii SLS

*1 - laser, 2 - zrcadlo, 3 - válec pro dopravu prášku materiálu obrobku, 4 - zásobník prášku, 5 - pracovní komora, 6 - vyráběná součást*

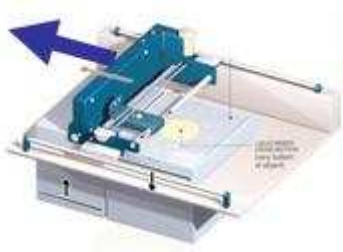
Obr.14 Zařízení SLS

### 4.4.3 3D Tisk

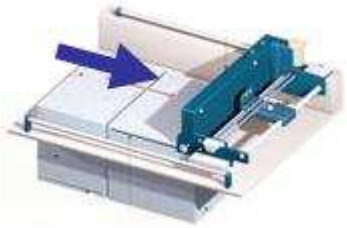
Uvedená technologie představuje nejrychlejší způsob výroby prototypů na světě a zároveň jako jediná umožňuje tisk modelů v plné škále barev. Princip tisku (Obr.15) je velice jednoduchý. Dodávaný software Zprint rozřízne 3D soubor (STL, VRML, PLY) na několik set tenkých vrstev o tloušťce 0,089 - 0,203 mm. V první fázi přesune rotující válec tenkou vrstvu prášku na bázi sádry do pracovního prostoru a tisková hlava nanese tekuté lepidlo v horizontálním řezu vyráběného modelu. Na místech, kde dochází ke kontaktu lepidla s práškem se vytvoří viditelná část průřezu budoucího modelu. V druhé fázi sjede pracovní plocha o krok směrem dolů, čímž vytvoří prostor pro další vrstvu prášku. Tento postup se opakuje až do vytištění celého výrobku. Výhodou této technologie je skutečnost, že po celou dobu tisku je vyráběný díl podepírán okolním neslepeným práškem. Tento prášek je možno opakovaně recyklovat, což ve svém důsledku představuje velmi nízké provozní náklady této technologie. Následná infiltrace na bázi pryskyřice či kyanoakrylátu výrobek zpevní. [ 4 ]



a) Rozprostření prášku



b) Tisk vrstvy modelu a pokles pracovní plochy o cca 0,1mm.

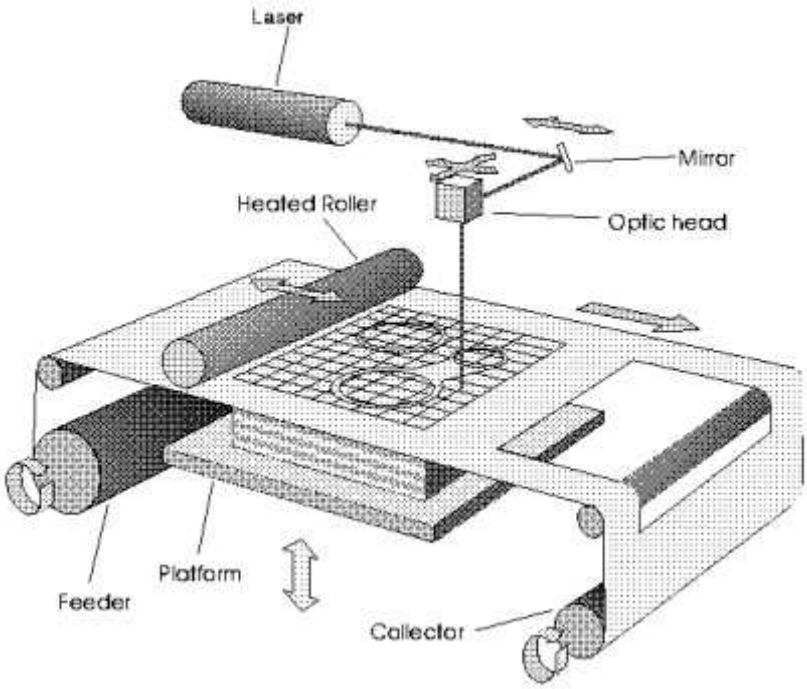


c) Rozprostření vrstvy prášku

Obr.15 a), b), c) Princip tisku

### 4.4.4 Laminated Object Manufacture (LOM)

V této technologii vzniká prototyp vrstvením lepivého materiálu (Obr.16). Základní materiál je papírový pás s vrstvou lepidla, který je navinutý na cívce. Lepidlo je aktivováno teplem. Model vzniká postupným přesouváním pásu papíru potaženého oboustranně pěnovou vrstvou přes stavební základnu. Potom tepelný válec stlačí v místě základny nasunutou vrstvu materiálu a dojde ke spojení s modelem. Optický laser vyřízne požadovaný obrys a následně rozřeže přebytečnou oblast okolního materiálu na malé čtverce. Je tak usnadněno vyjmutí modelu po skončení jeho výroby. V průběhu stavby modelu slouží okolní materiál jako výborná podpora. Protože je prototyp vyroben z papíru je třeba ho nakonec ošetřit nátěrem nebo lakováním, aby se zabránilo nasátí vlhkosti. [ 5 ]

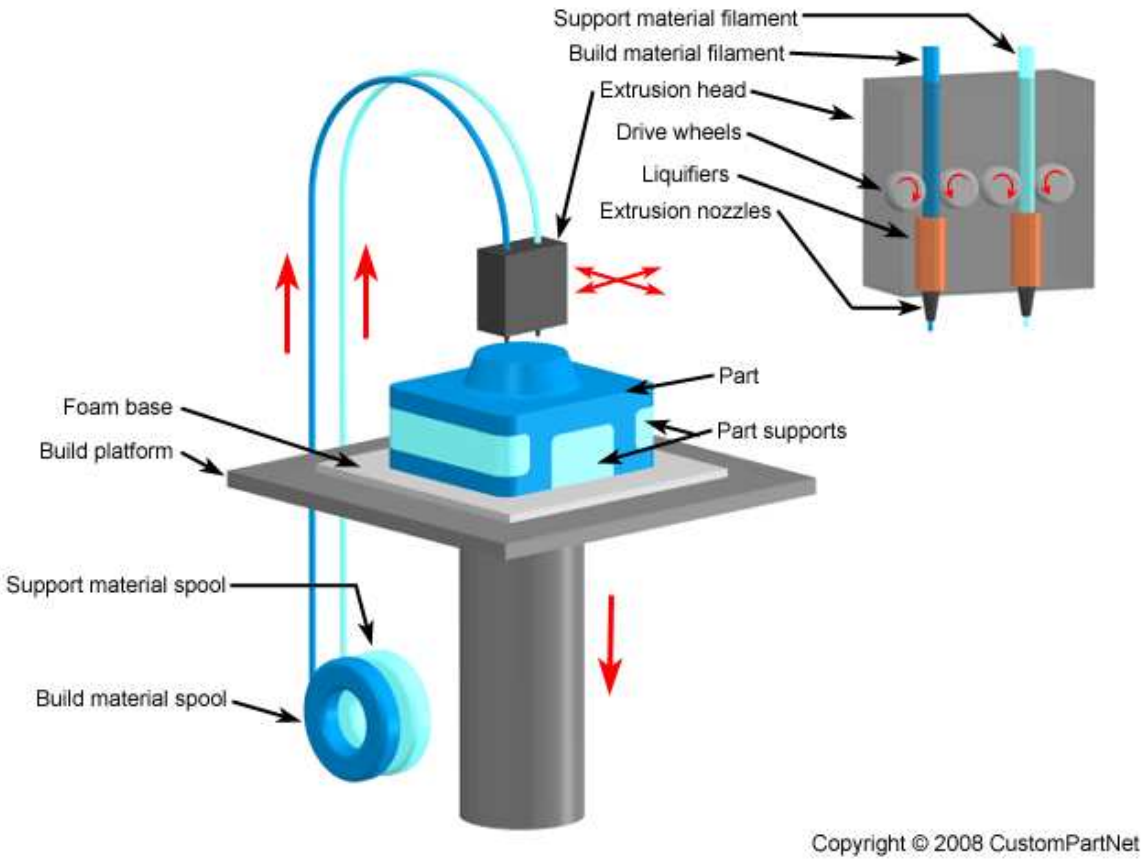



Obr.16 Schéma zařízení pro technologii LOM

### 4.4.5 Fused Deposition Modeling (FDM)

V této technologii (Obr.17) je vlákno z termoplastu vytlačováno z hrotu, který se pohybuje v x/y rovině. Vytlačovací hlavice přitom ukládá tenké vrstvy materiálu na stavební základnu.

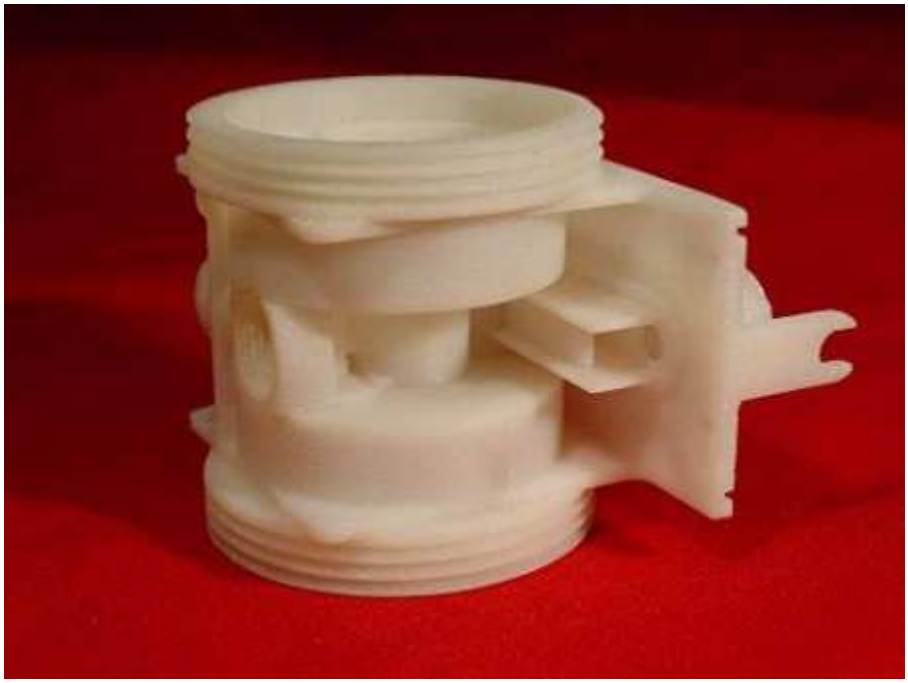
Základna je udržována na nižší teplotě, aby roztavený plast rychle ztuhl. Potom základna klesne a vytlačovací hlava uloží další vrstvu materiálu. Podpěry se tvoří společně s dílem. Tento postup se opakuje až do doby než je model hotov. Materiály pro tvorbu modelu mohou být ABS, eleastomery, polykarbonát, PPS a průmyslový vosk. [ 5 ]




Obr.17 FDM technologie

## 4.5 Výrobky technologie Rapid Prototyping

Touto metodou můžeme vyrobit různě složité výrobky. [ 6 ]



a)

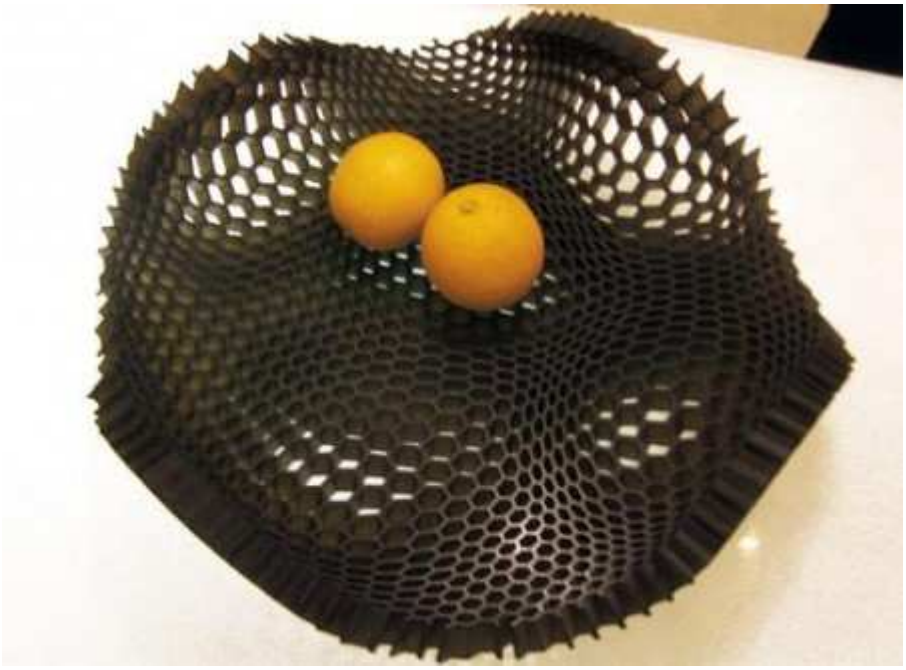
b)

c)

Obr.18 a), b), c) různé výrobky

Obr.19 Klip

Obr.20 Ozubená kola



Obr.21 Dekorační mísa

# 5 SROVNÁNÍ CNC FRÉZOVÁNÍ VS. RAPID PROTOTYPING

- Použití RP je z hlediska tvarů výrobku téměř neomezené. Je možné vytvářet dutá tělesa nebo v jednom kroku celé funkční sestavy, sestávající z několika dílů. Obrábění je omezováno nutností zajistit přístup nástroje k místu vytváření potřebného tvaru. Některé tvary nejsou vůbec vyrobitelné, jako např. ostré vnitřní rohy (při frézování). Další nevýhodou je nutnost upnutí, často omezující přístup nástroje k obráběným plochám. Vyvolává to potřebu znovu upínat obrobek v jiné poloze.

- Při CNC obrábění je zřejmá závislost nákladů na tvaru součástky. Složité tvary vyžadují delší čas na přípravu řídícího programu, drobné detaily vyžadují malé nástroje s nízkou použitelnou hodnotou posuvu, což prodlužuje výrobní čas. Tyto faktory přispívají ke zvyšování nákladů. Při RP je cena většinou stanovována na základě množství spotřebovaného materiálu nebo na čase potřebném pro zhotovení výrobku.

- RP systémy mají výhodu v tom, že není nutné připravovat polotovar potřebných rozměrů a upínat ho na pracovní stůl stroje. Po ukončení procesu je ale třeba u některých metod očistit výrobek od podpůrných materiálů.

- Vytvoření NC programu je vázáno na využívání dalšího softwaru (CAM). Software pro RP zařízení je jeho součástí.

- Obrábět na většině CNC strojů lze všechny běžné konstrukční materiály. Výběr materiálů je tedy větší než u zařízení pro RP, která jsou z principu vázána na jeden materiál. K dispozici jsou četné plasty, keramika, kovy a papír.

- CNC obráběcí stroje jsou dostupné v různých velikostech, větší RP stroje zatím nejsou. Velké díly se v zařízeních RP zhotovují rozdělené na menší části, které je pak třeba spojit do jednoho celku, nejčastěji lepením.

- Ceny za high-end RP stroje jsou vysoké, ceny strojů určených pro tvorbu koncepčních modelů jsou nižší, ale stále poměrně vysoké. Podobná situace je i v oblasti CNC techniky. CNC systém (stroj a software) je finančně náročný, ale stále častěji se objevují malé stroje, často prezentované jako hobby zařízení, jejichž cena je velmi přijatelná. Jejich nevýhodou ale většinou je omezený sortiment použitelných materiálů (většinou jen snadněji

obrobitelné materiály). Nenáročnost na umístění (nemusí to být dílenské prostory) je předurčuje i na výrobu prototypů.

- Jednotlivé metody Rapid Prototypingu, používané v praxi, se vzájemně liší mnoha kvalitativními i ekonomickými parametry, které následně určují míru vhodnosti použití jimi vyráběných prototypů pro jednotlivé aplikace.

- RP systémy nanášejí materiál v konstantní tloušťce, čímž je dána i výsledná přesnost součástky. Při použití CNC frézování vzdálenost mezi drahami nástroje je volitelná. Tato možnost volby přesnosti znamená možnost upřednostnění rychlosti nebo přesnosti výroby součástky. [ 7 ]

Obr.22 Porovnání dílů zhotovených technologiemi RP (vlevo) a CNC (vpravo)

# 6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je vyrobit zkušební tělíska pomocí metody Rapid Prototyping na zařízení ARBURG 420C, FDM 3D tiskárna Stratasys SST768 a 3D tiskárna Objet Eden250. Na těchto tělískách budou prováděny vybrané mechanické zkoušky na zkušebním zařízení Zwick 1456 a porovnána s výrobky yyrobeny vstřikováním .

Výsledky zkoušek budou vyhodnoceny a zpracovány do tabulek a grafů. Zkušební tělíska budou porovnány mezi sebou.

# II. PRAKTICKÁ ČÁST

# 7 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

Při výrobě a zkoušení se používali zařízení OBJET EDEN 250, SRATASYS DIMENSION SST 768, GRAPHTEC CE 3000-60, ARBURG 420C, ZWICK 1456.

Všechny tyto zařízení jsou součástí laboratoří ÚVI Univerzity Tomáše Bati.

## 7.1 Objet Eden 250

Na zařízení se vyrábí výrobky metodou FDM Při výrobě se používá směs prášku a vytvrzuje se UV zářením.

Obr. 23 OBJET EDEN 250

**Technické údaje:**

| | |
|---|---|
| Velikost pracovního stolu | 250 x 250 mm |
| Pracovní rozsah d x š x v | 250 x 250 x 205 mm |
| Rozlišení – osa X | 600 dpi |

| | |
|---|---|
| Rozlišení – osa Y | 300 dpi |
| Rozlišení – Z | 1600 dpi |
| Tloušťka vrstvy osa Z | 16 mikronů/32 mikronů |
| Rozměry tiskárny d x š x v | 870 x 735 x 1200 mm |

## 7.2 Stratasys Dimension SST 768

Na zařízení se vyrábí výrobky metodou FDM. Výrobek se vyrábí tak, že se vytlačuje struna a nanáší se pod úhlem 45°.

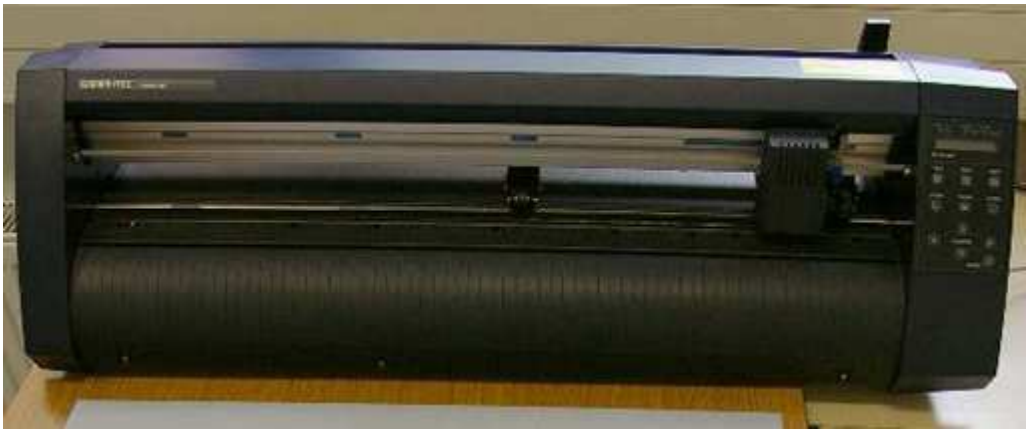
Obr. 24 SRATASYS DIMENSION SST 768

**Technické údaje:**

| | |
|---|---|
| Tloušťka struny | 0,2540; 0,3302 mm |
| Pracovní prostor | 200 x 200 x 250 mm |
| Hmotnost | 128 kg |
| Materiál struny | ABS |

## 7.3 Graphtec CE 3000-60

Na zařízení se vyrábí výrobky metodou LOM. Vyrábí se po vrstvách. Každá papírová vrstva se vyrábí samostatně a potom se lepí na sebe.



Obr. 25 GRAPHTEC CE 3000-60

**Technické údaje:**

| | |
|---|---|
| CPU | 32-bit CPU |
| Pohon | Digitální servo motory |
| Maximální pracovní plocha | 603 mm x 50 mm |
| Šířka média | Minimum: 50 mm |
| | Maximum: 712 mm |
| Maximální tloušťka média | 0,50 mm |
| Maximální řezná rychlost | 60 cm/s, ve všech směrech |

| | |
|---|---|
| Maximální akcelerace | 21,2 m/s$^2$ |
| Nastavitelný přítlak | 20 g až 300 g |
| Mechanické rozlišení | 0,005 mm |
| Příkon | 70 VA max. |
| Rozměry | 851 x 285 x 223 mm |
| Váha | 11,2 kg |

## 7.4 Vstřikovací stroj Arburg 420C

Obr. 26 ARBURG 420C

**Technické údaje:**

| | |
|---|---|
| Uzavírací síla | 1000 kN |
| Výška formy | min. 250 mm |
| Upínací deska | 605 x 605 mm |
| Objem dávky | 182 cm$^3$ |
| Účinná délka šneku | 20 L/D |
| Čas otevíracího cyklu | 2,0 – 329 s – mm |

| | |
|---|---|
| Otevírací síla | max. 35/350 kN |
| Vzdálenost mezi sloupky | 420 x 420 mm |
| Síla vyhazovacích kolíků | max. 40 kN |
| Průměr šneku | 40 mm |
| Tah šneku | max. 145 mm |
| Rychlost toku taveniny | max. 128/168/212 $cm^3/s$ |
| Řízení energie vstřikovacího čerpadla | 22 kW |

## 7.5 Zwick 1456

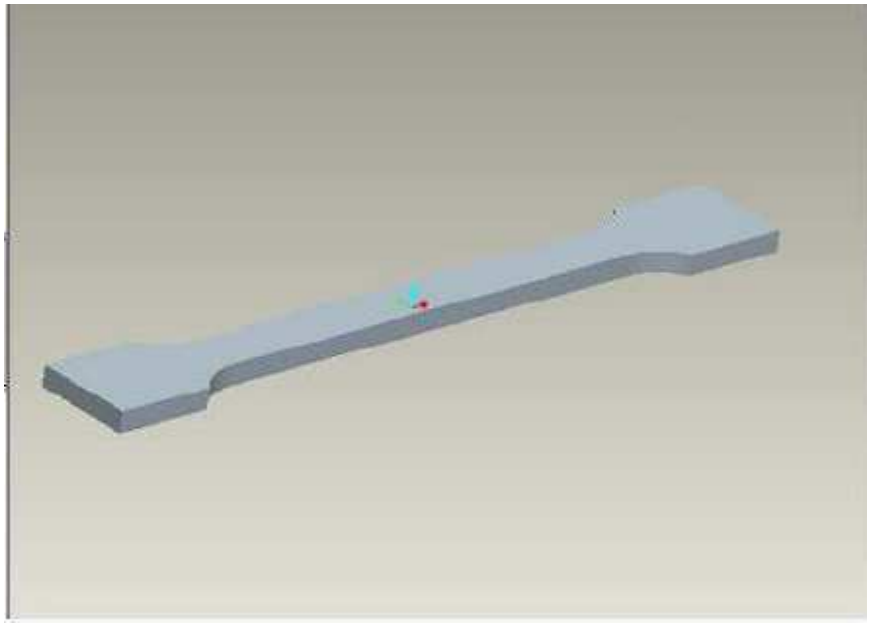
Obr. 27 ZWICK 1456

**Technické údaje:**

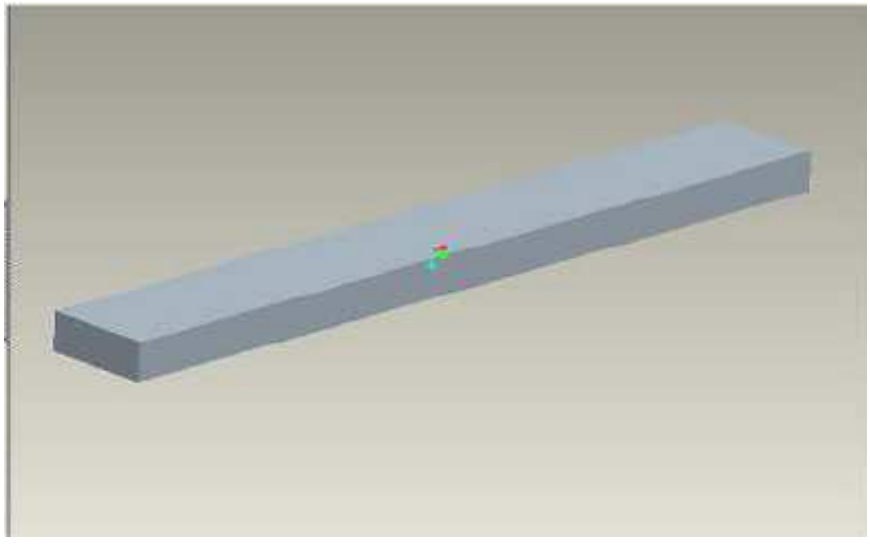
| | |
|---|---|
| Maximální posuv příčníku | 800 mm/min |
| Snímače síly | 2,5 a 20 kN |
| Teplotní komora | -80/ +250 °C |
| TestExpertSoftware | Tah/Ohyb/Tlak pro statické i cyklické zatížení |

# 8 3D MODELY

Při výrobě metodou Rapid Prototyping ( LOM, FDM, 3D Tisk ) se musí pro vstupní data udělat 3D modely v konstrukčních programech.



Obr. 28 3D model zkušebního tělea na tah



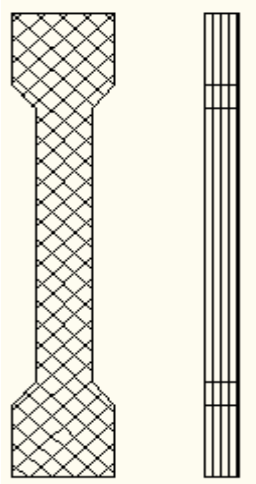
Obr. 29 3D model zkušebního tělesa na ohyb

# 9 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

U metody FDM byla příprava zkušebních těles jiná, struktura těles na tři způsoby. Toto se využilo u zkoušky tahem.

1. Struktura výrobku naplocho:

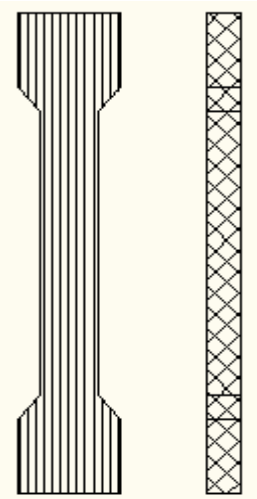
- struna se vytlačuje na celou plochu pod úhlem 45° vrstvu po vrstvě



Obr. 30 Zkušební těleso naplocho

2. Struktura výrobku na výšku:

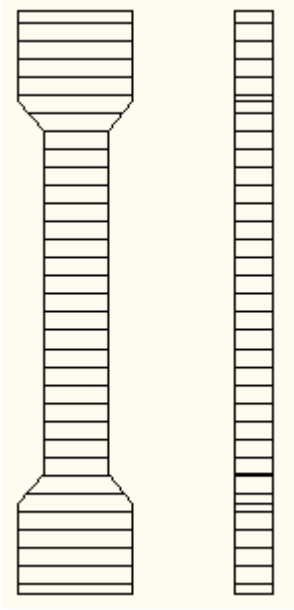
- struna se vytlačuje na hranu tělesa pod úhlem 45° vrstvu po vrstvě



Obr. 31 Zkušební těleso na výšku

3. Struktura výrobku na T (na stojato)

- struktura se vytlačuje na nejmenší plochu výrobku pod úhlem 45° vrstvu po vrstvě



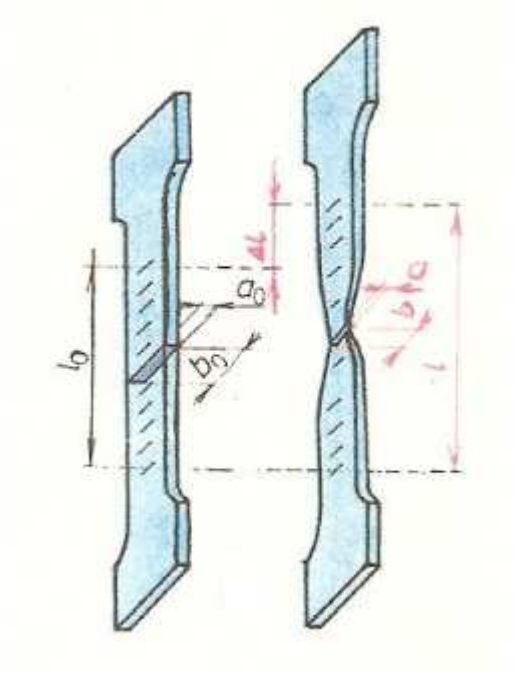
Obr. 32 Zkušební těleso na T

# 10 ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Při zkouškách tah i ohyb se zkoušely připravené zkušební tělesa, které byly vyrobeny metodami FDM (u tahu různé druky výroby), LOM (jen na ohyb), 3D Tisk (OBJET) a vstřikováním ABS. U všech zkoušek budou přiloženy grafy a tabulky. Všechno se bude provádět na zkušebním stroji Zwick 1456.

## 10.1 Zkouška tahem

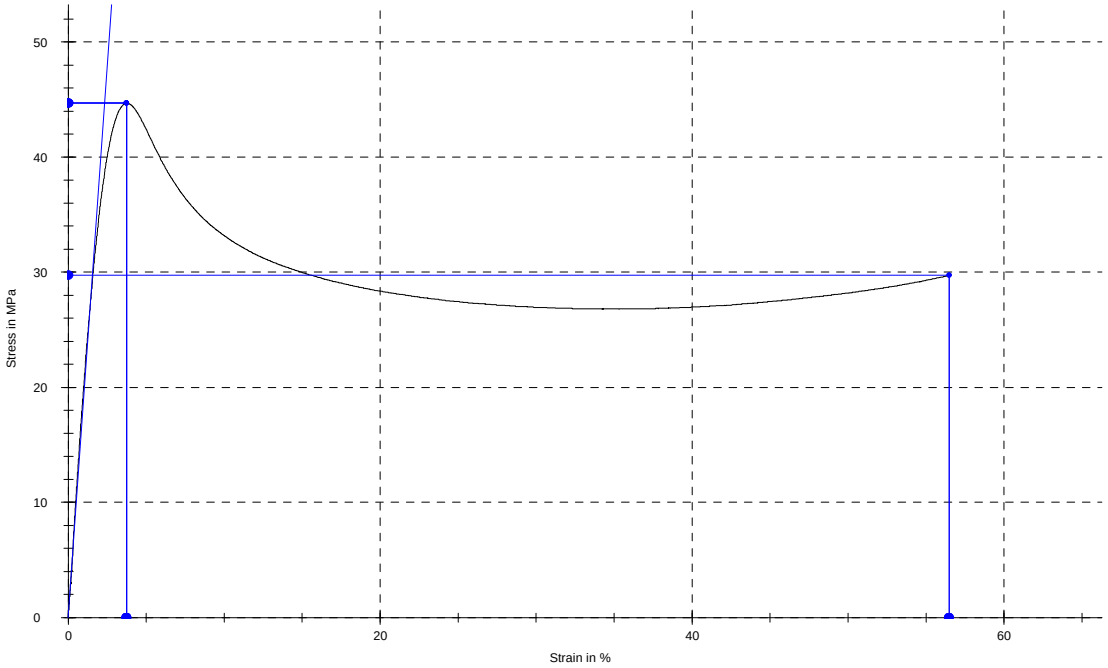
Jako zkušební těleso byla použita tzv. ,,lopatka,,. Její rozměry jsou dány normou ČSN EN ISO 527-1 (640604). Pro každý zkoušený výrobek je zaznamenaný graf. Zkoušky se prováděli v laboratoři při teplotě 20 °C a tlaku 750 Torr.



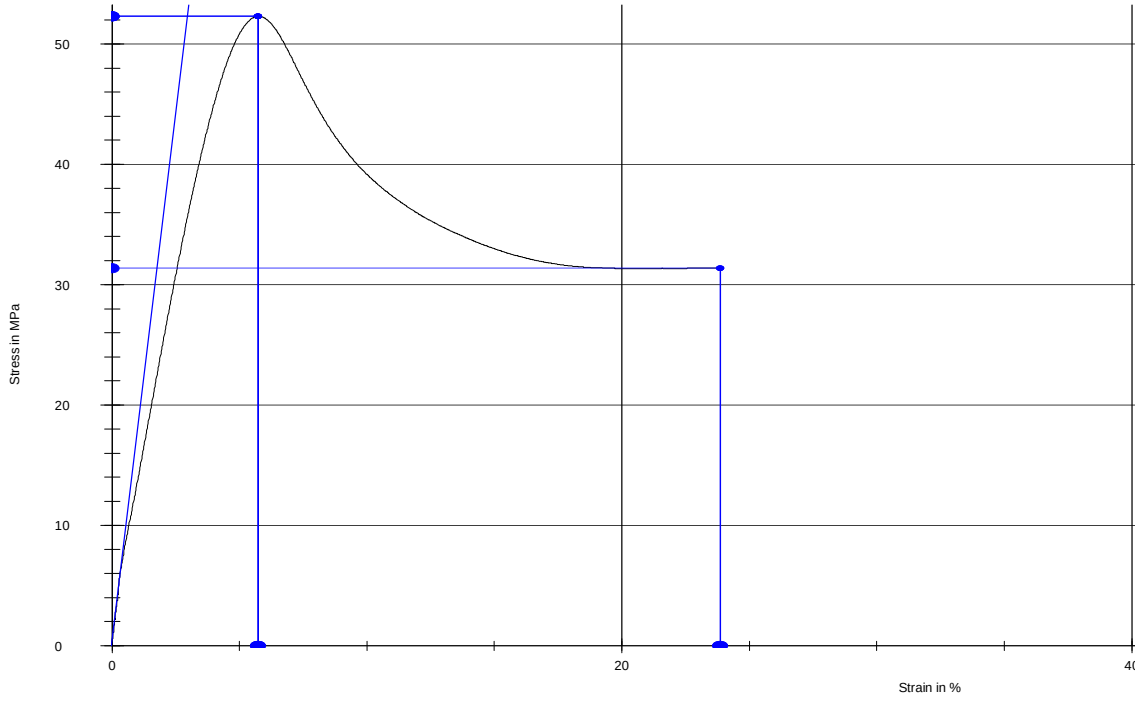

Obr. 33 Zkušební těleso na tah

### 10.1.1 3D Tisk (OBJET)

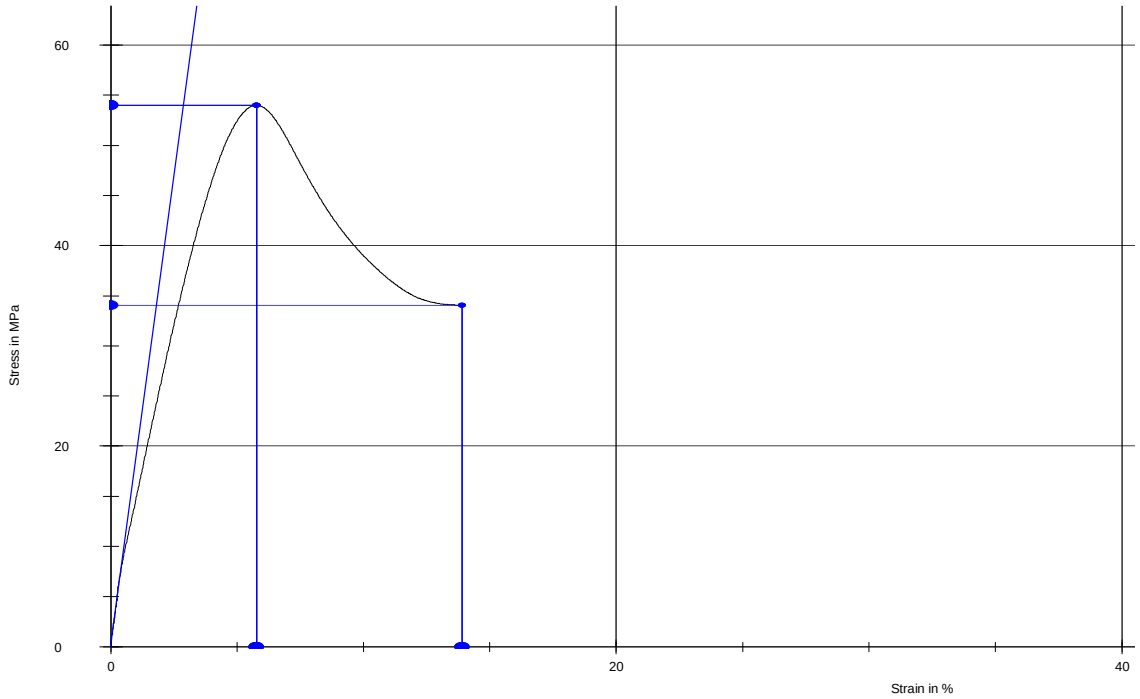
U prvního vzorku byla rychlost 10 m/s, ale zkouška trvala dlouho, tak u dalších zkoušek byla rychlost 50 m/s.



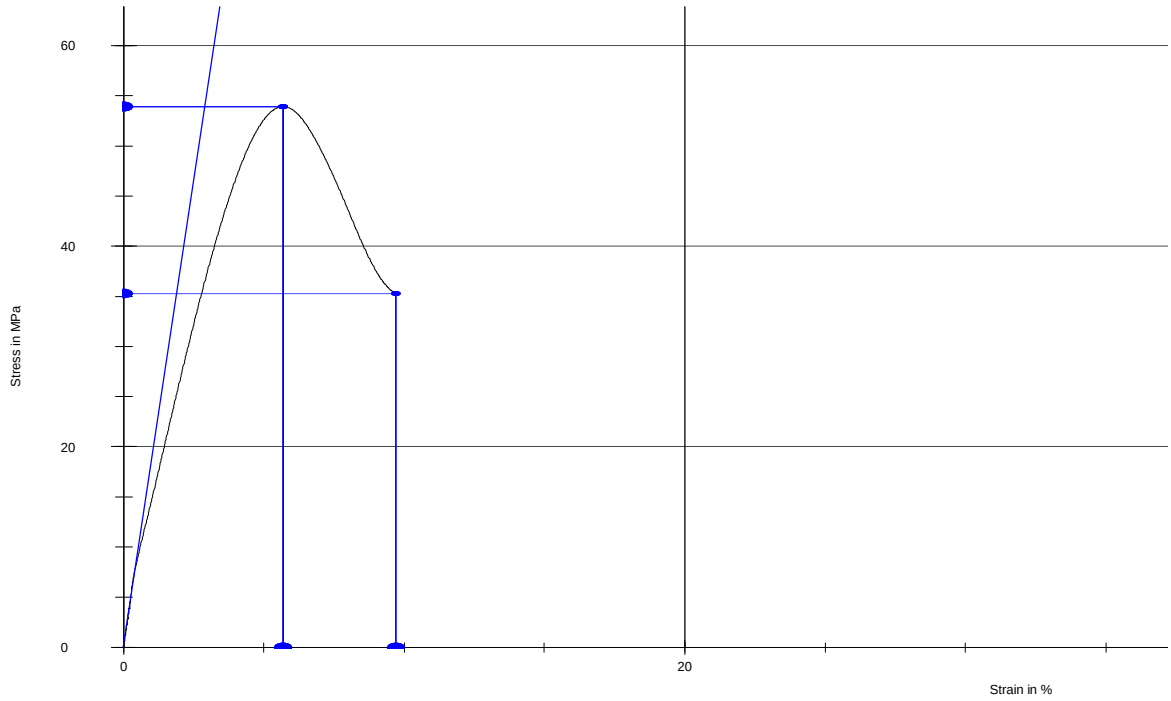

Obr. 34 Graf tah – 3D Tisk 1.



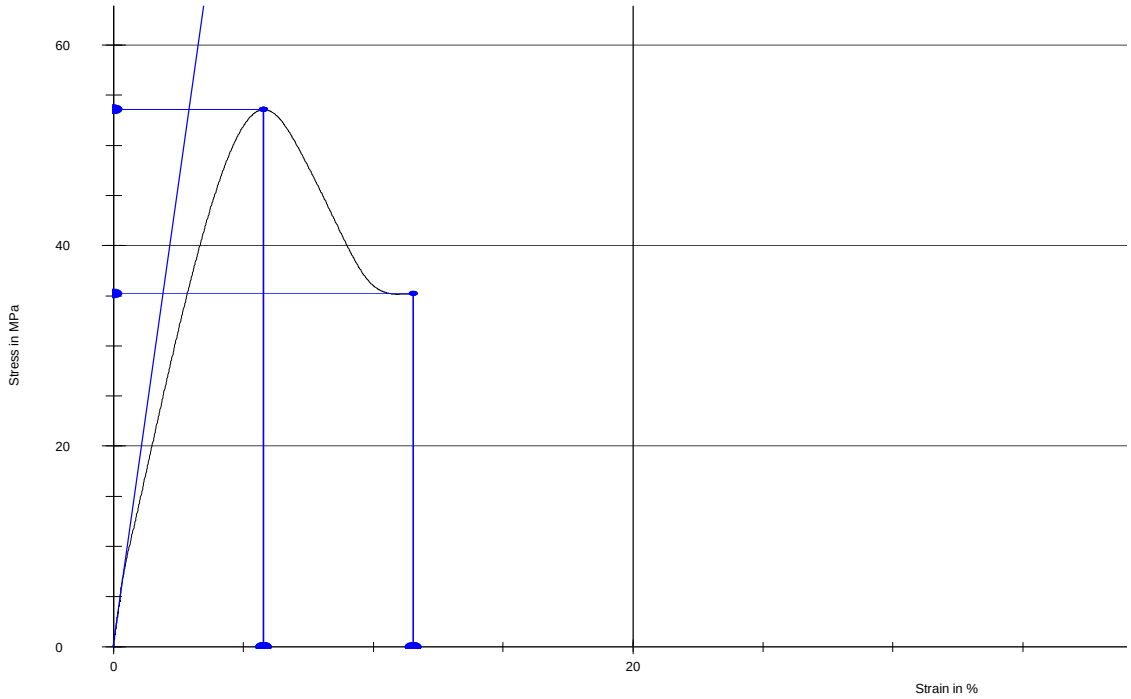

Obr. 35 Graf tah-3D Tisk 2.




Obr. 36 Graf tah – 3D Tisk 3.



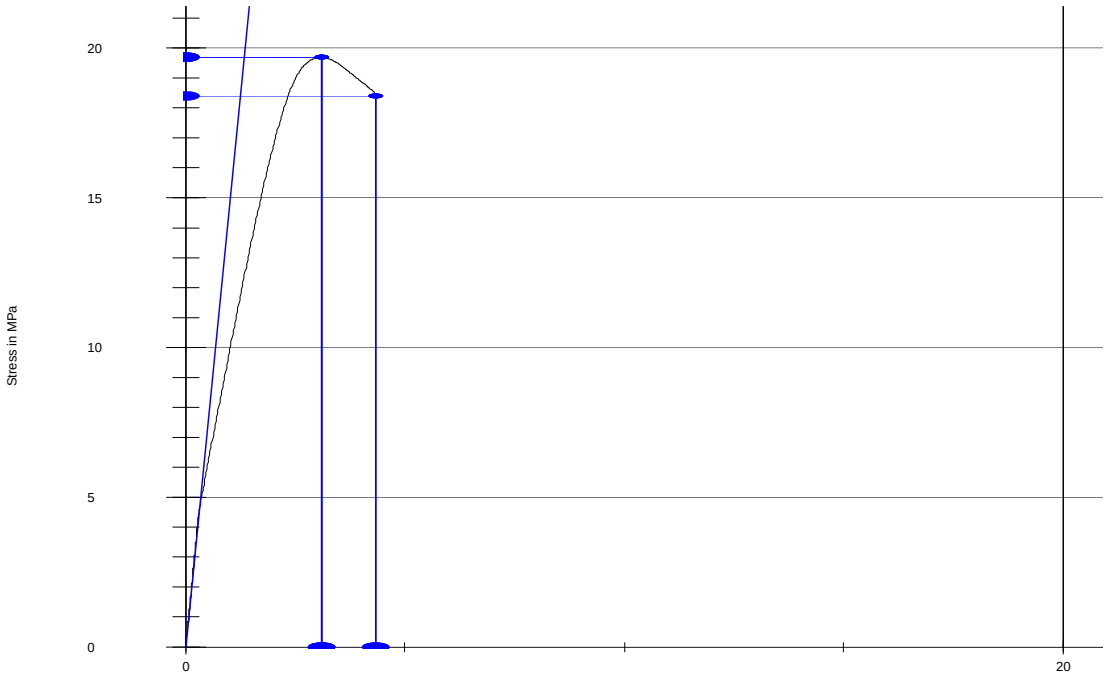

Obr. 37 Graf tah – 3D Tisk 4.



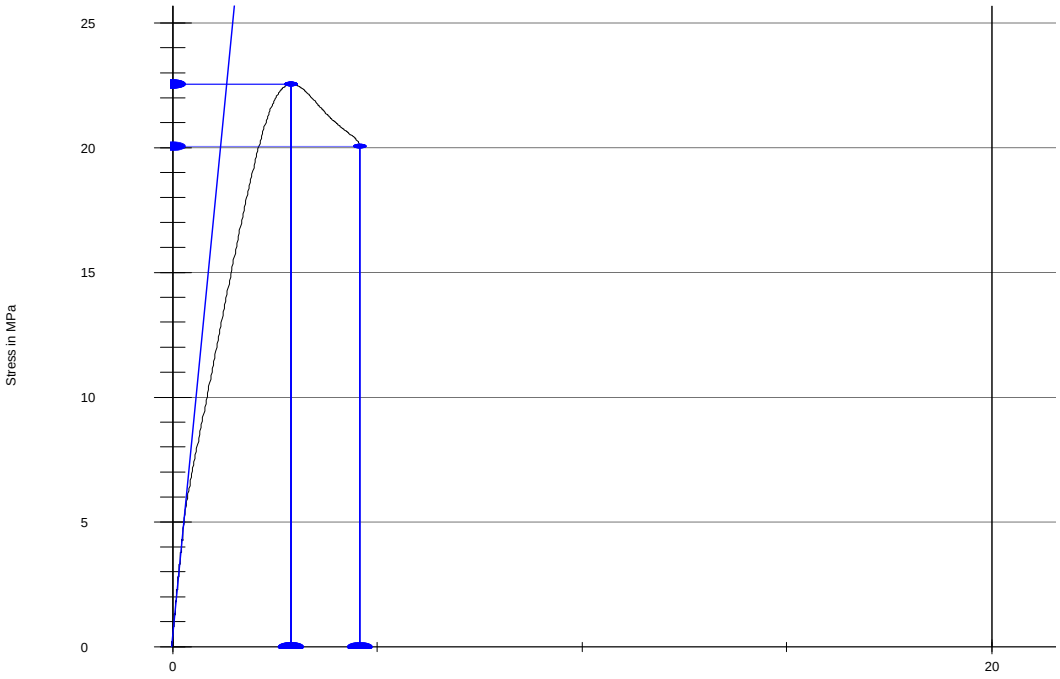

Obr. 38 Graf tah – 3D Tisk 5.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 51 MPa.

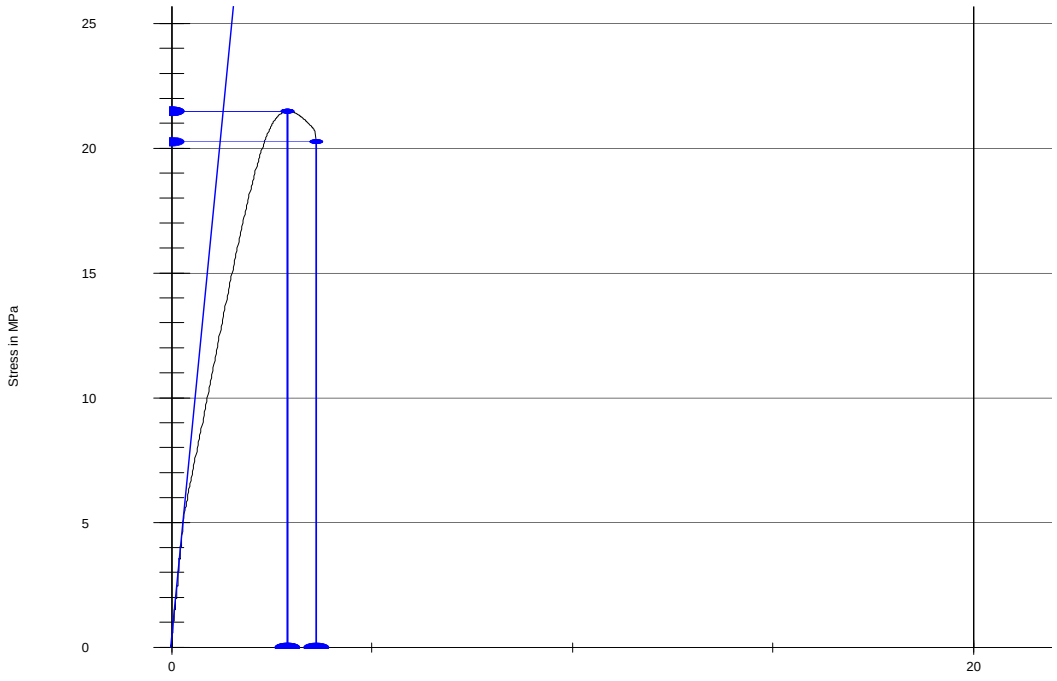
### 10.1.2 FDM (naplocho)



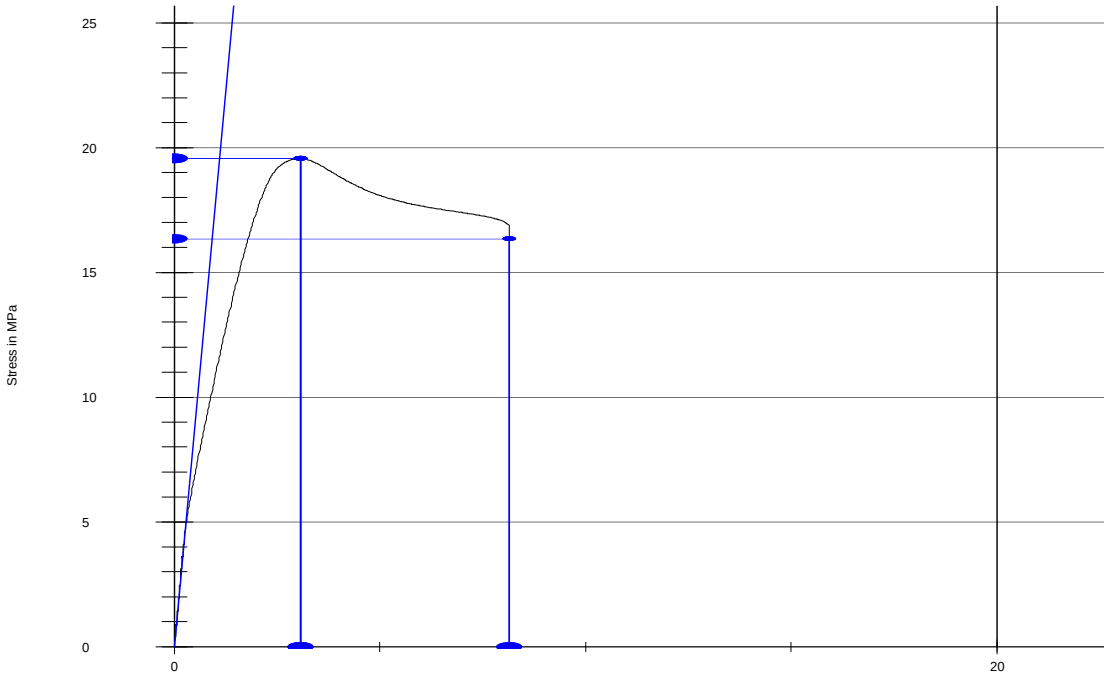

Obr. 39 Graf tah – FDM naplocho 1.



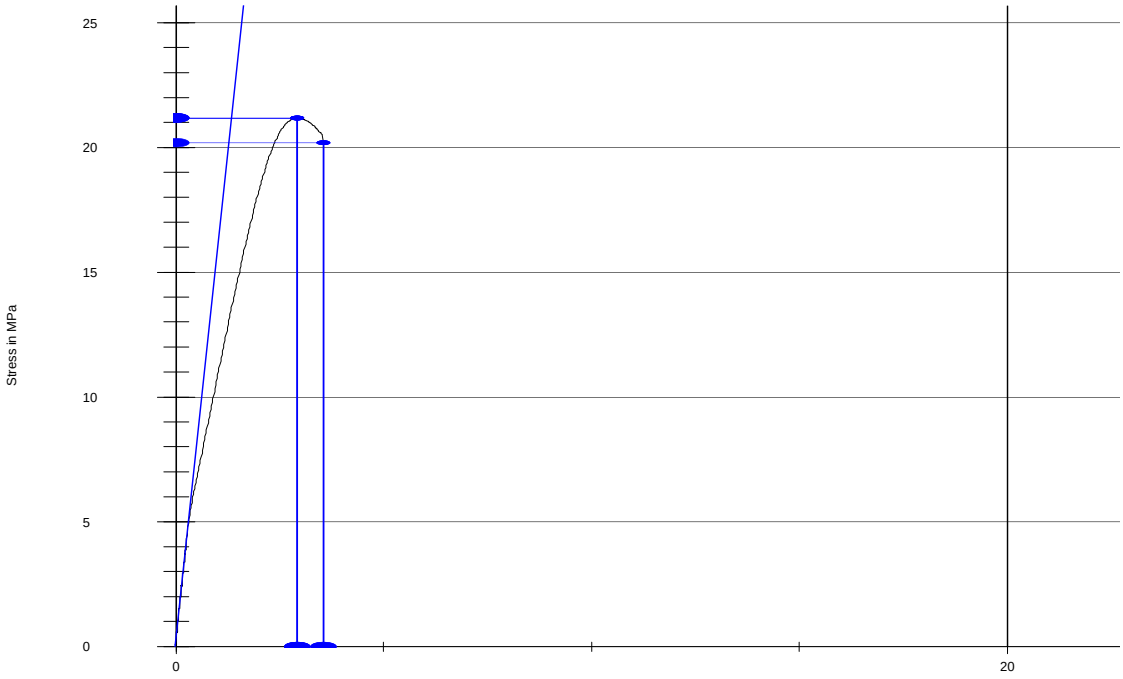

Obr. 40 Graf tah – FDM naplocho 2.




Obr. 41 Graf tah – FDM naplocho 3.




Obr. 42 Graf tah – FDM naplocho 4.

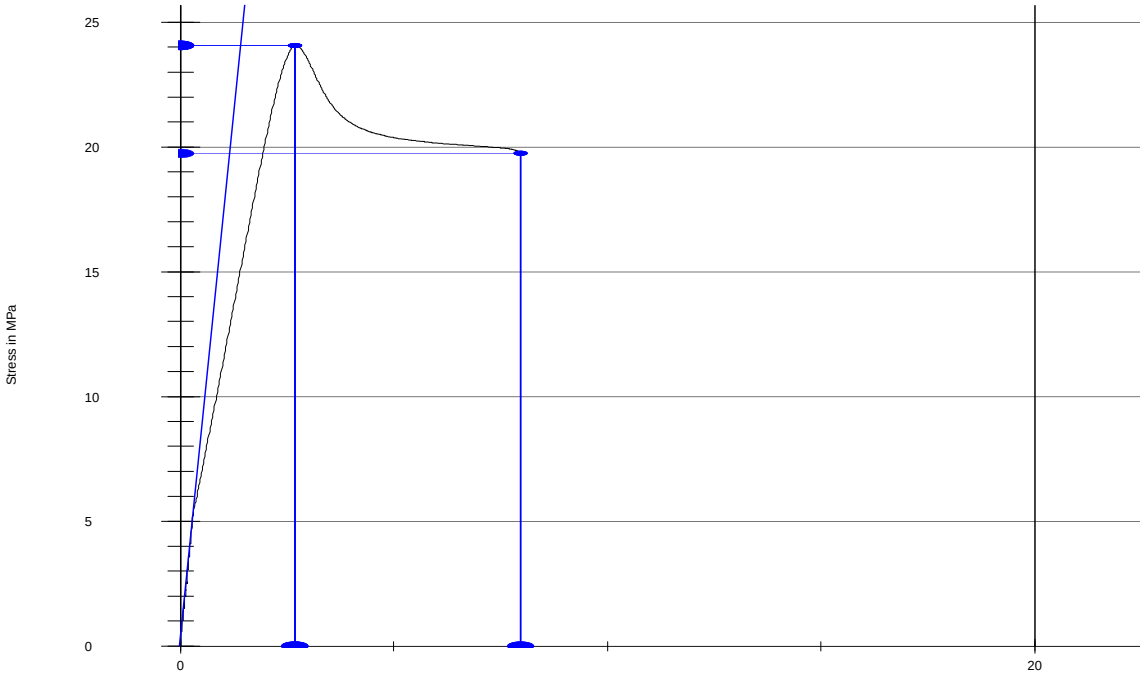



Obr. 43 Graf tah – FDM naplocho 5.

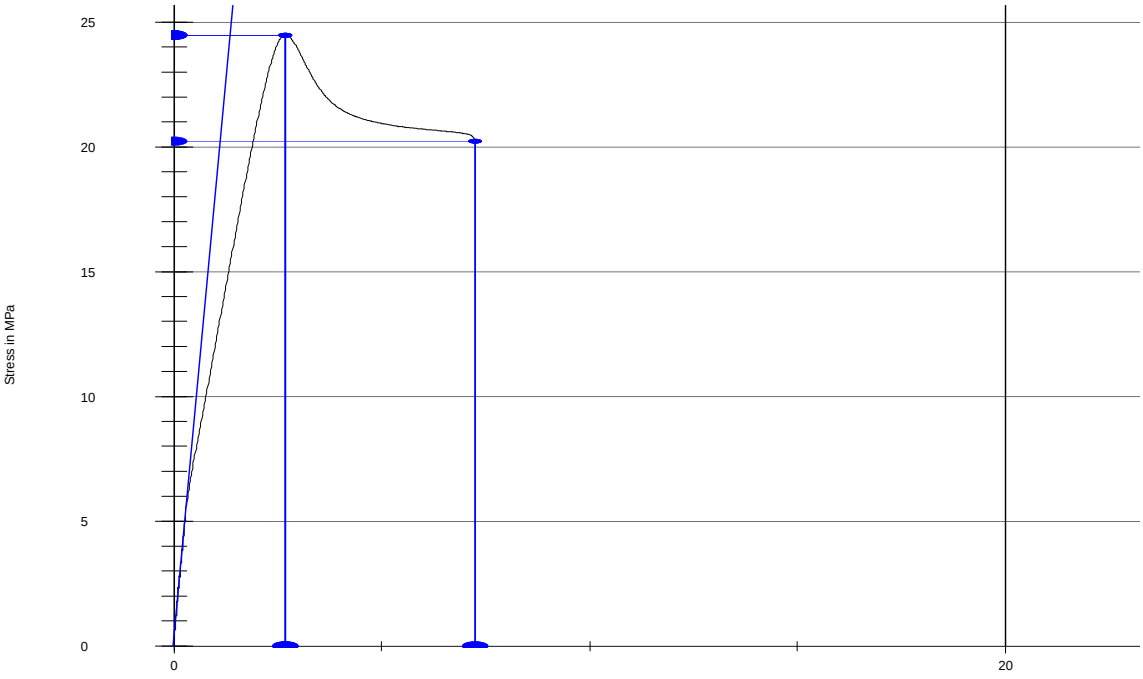
Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 20 MPa.

### 10.1.3 FDM (na výšku)

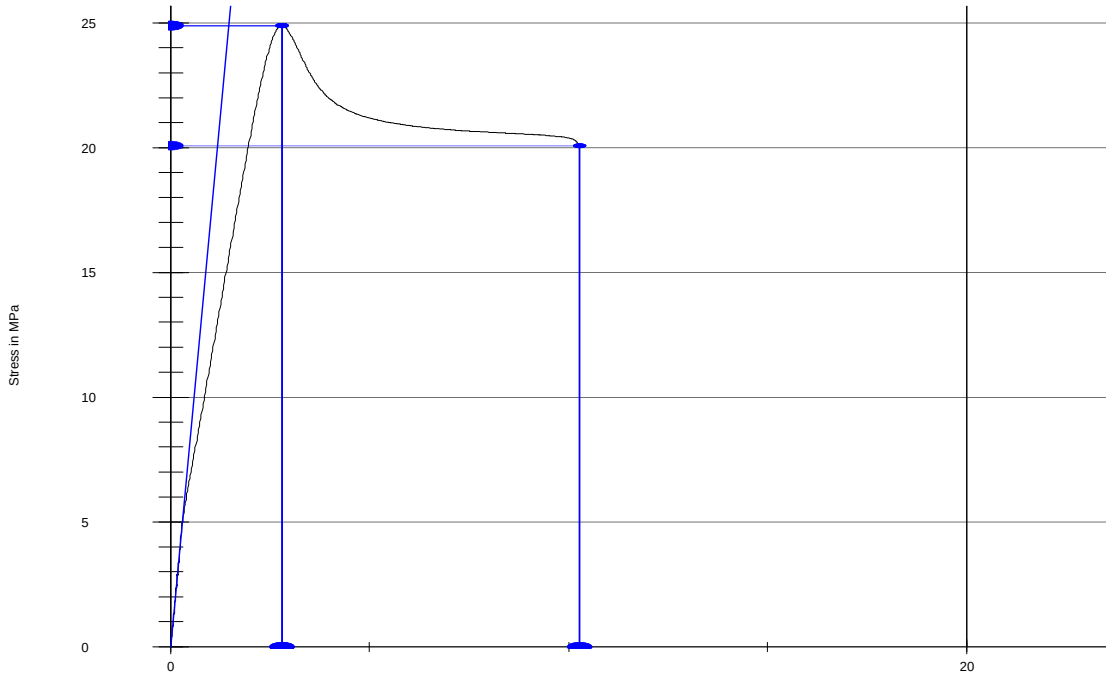
Při výrobě se struktura nanáší na výšku pod úhlem 45°/-45°.



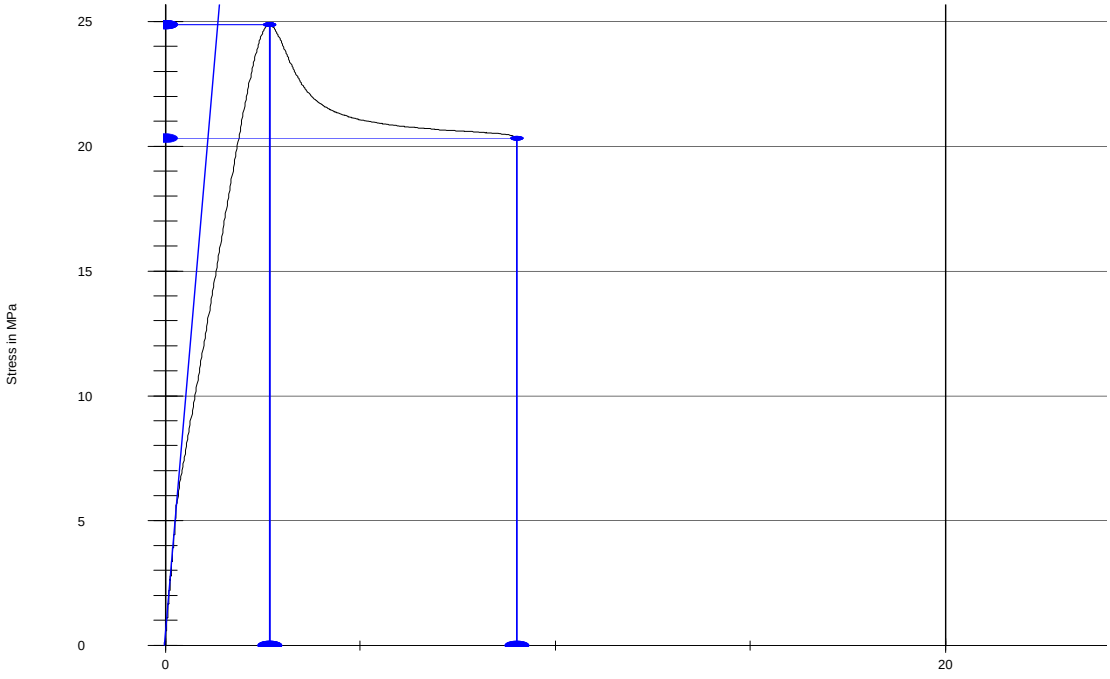

Obr. 44 Graf tah – FDM na výšku 1.



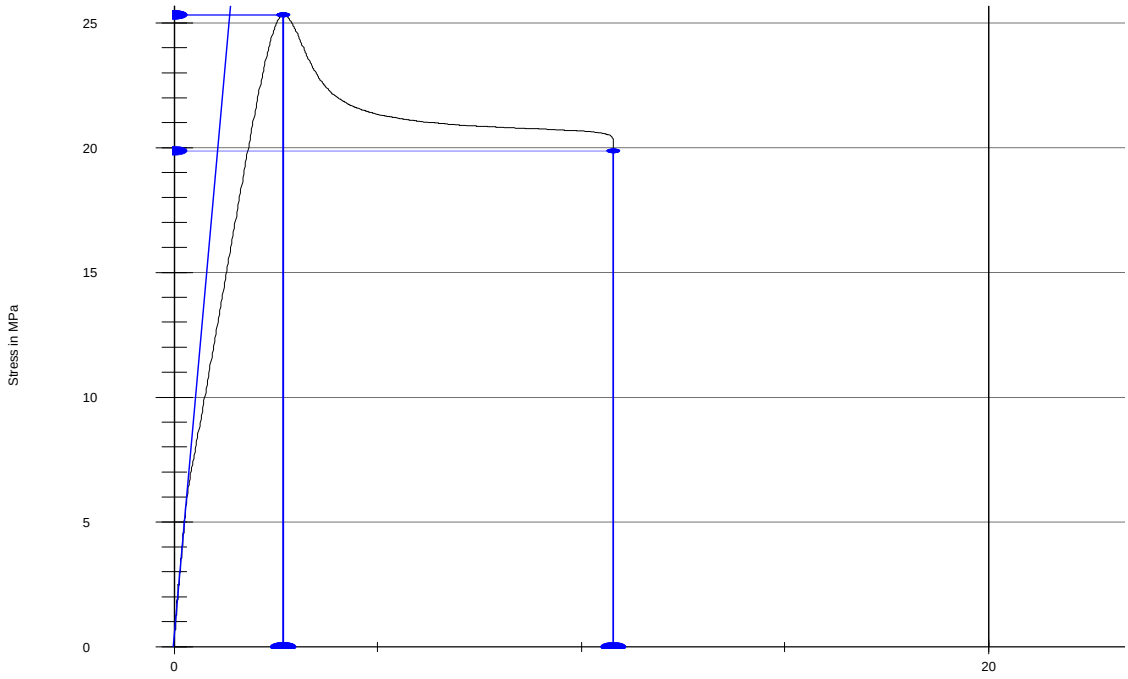

Obr. 45 Graf tah – FDM na výšku 2.




Obr. 46 Graf tah – FDM na výšku 3.




Obr. 47 Graf tah – FDM na výšku 4.

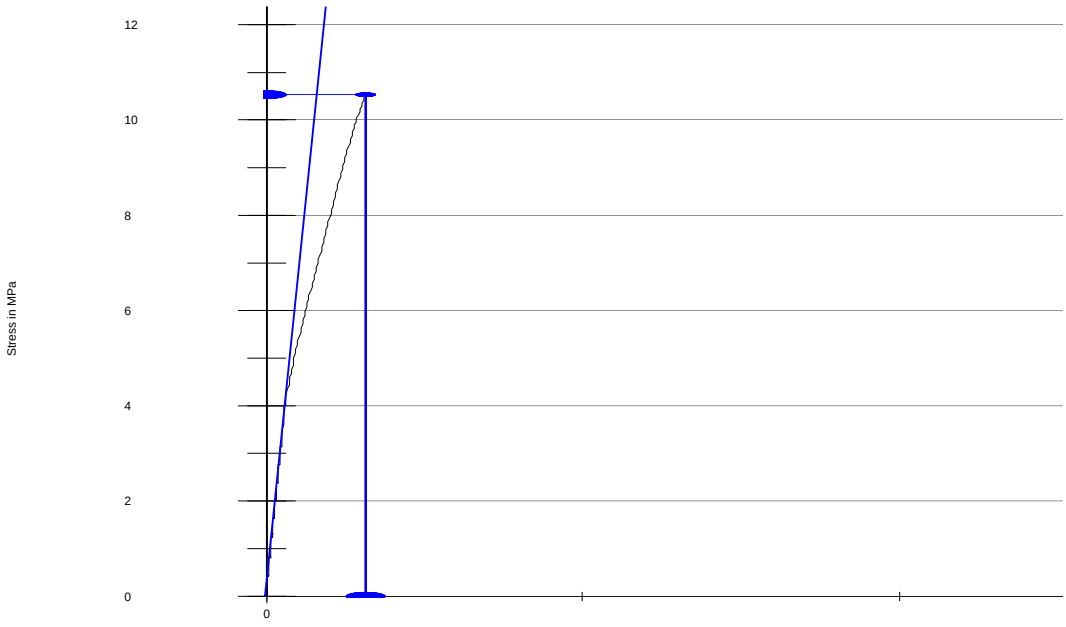



Obr. 48 Graf tah – FDM na výšku 5.

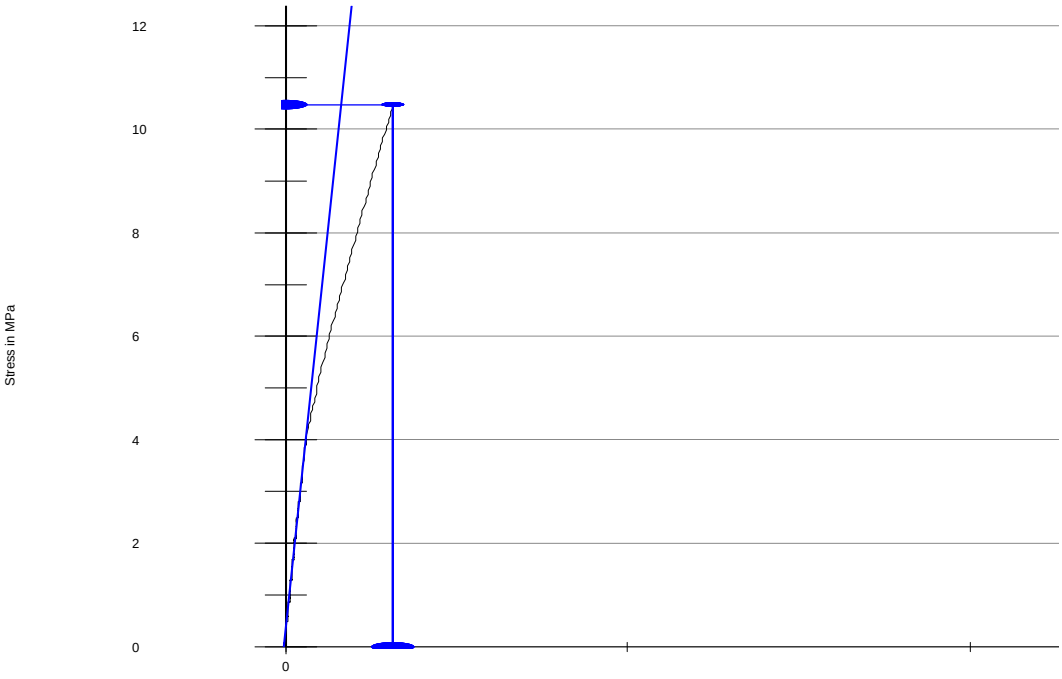
Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 24 MPa.

### 10.1.4 FDM (na T)

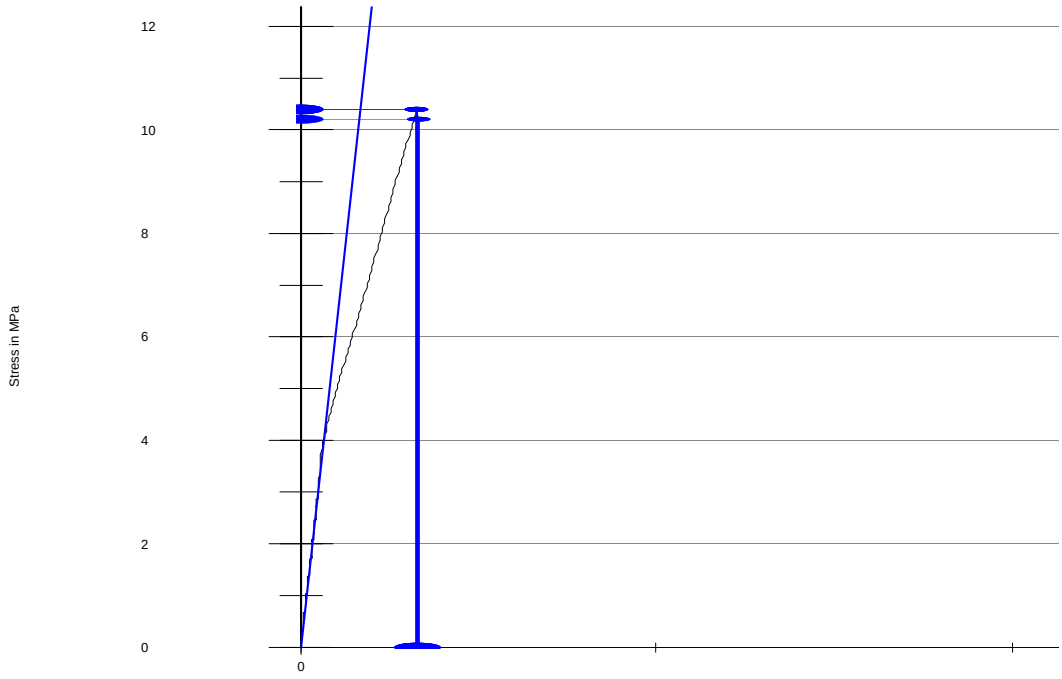
Při výrobě se struktura nanáší po vrstvách na stojato tzv. ,,na T,, pod úhlem 45°/-45°.



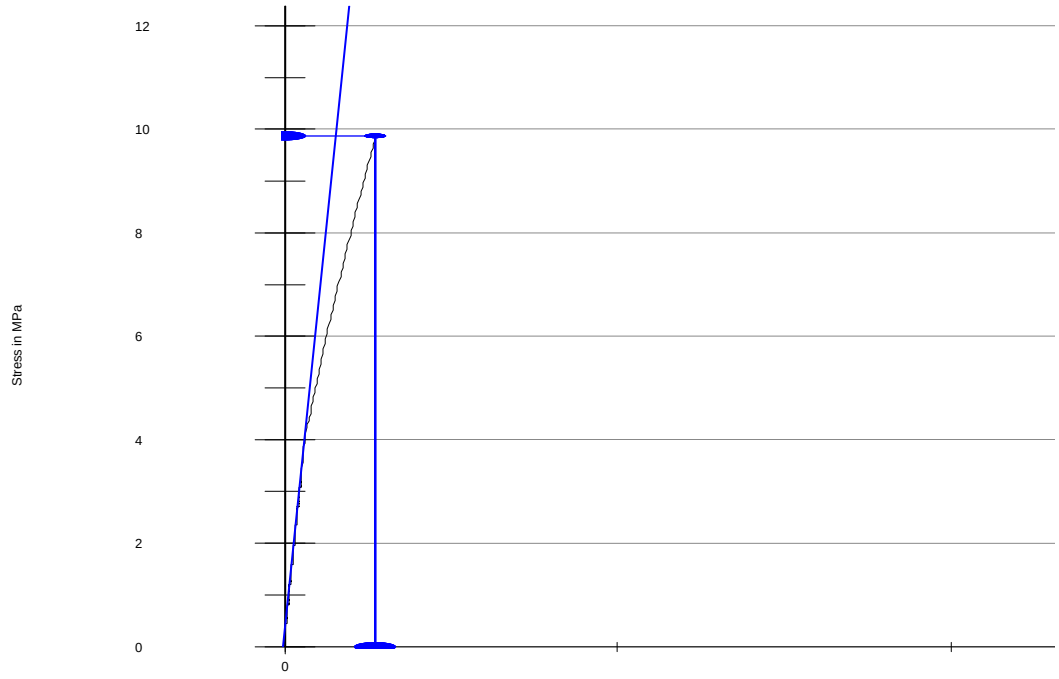

Obr. 49 Graf tah – FDM na T 1.



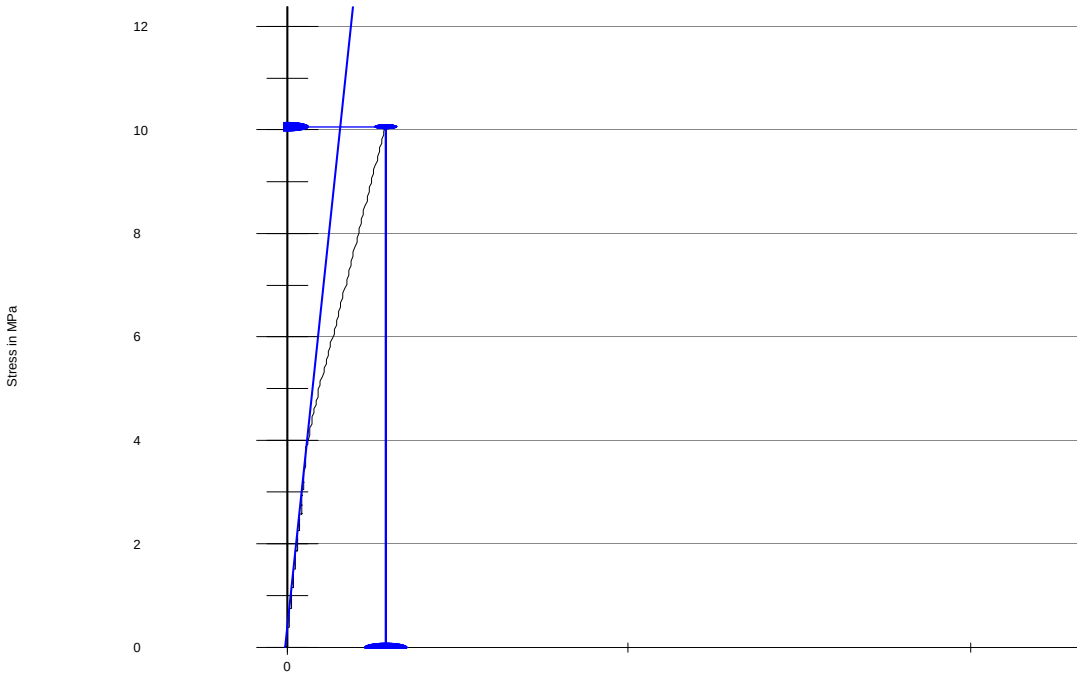

Obr. 50 Graf tah – FDM na T 2.




Obr. 51 Graf tah – FDM na T 3.



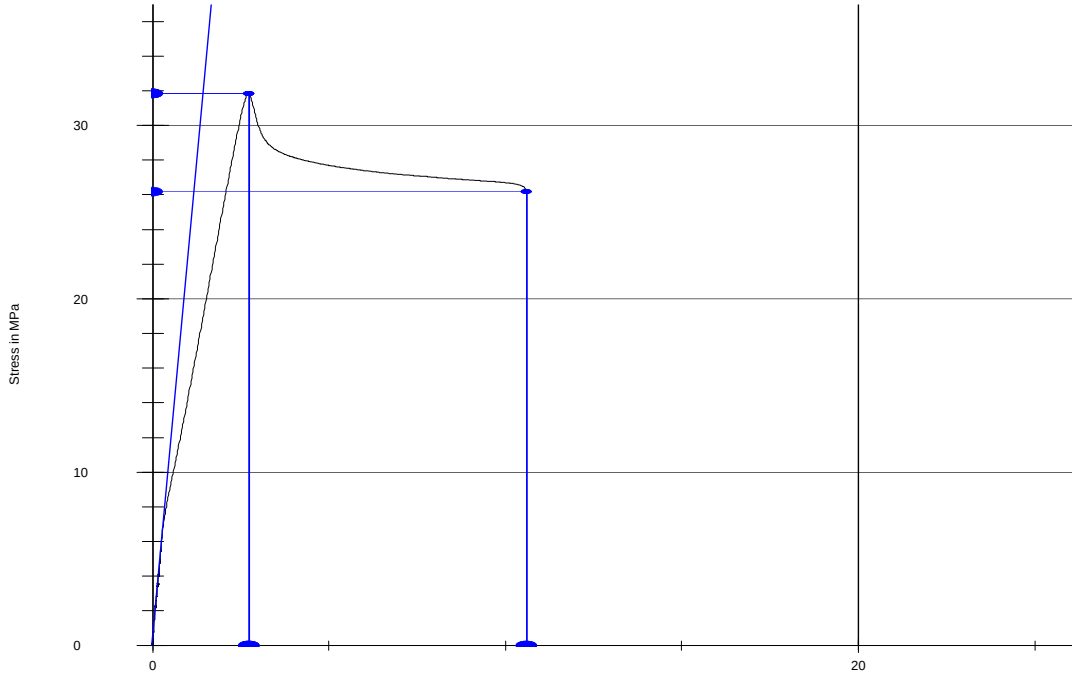

Obr. 52 Graf tah – FDM na T 4.



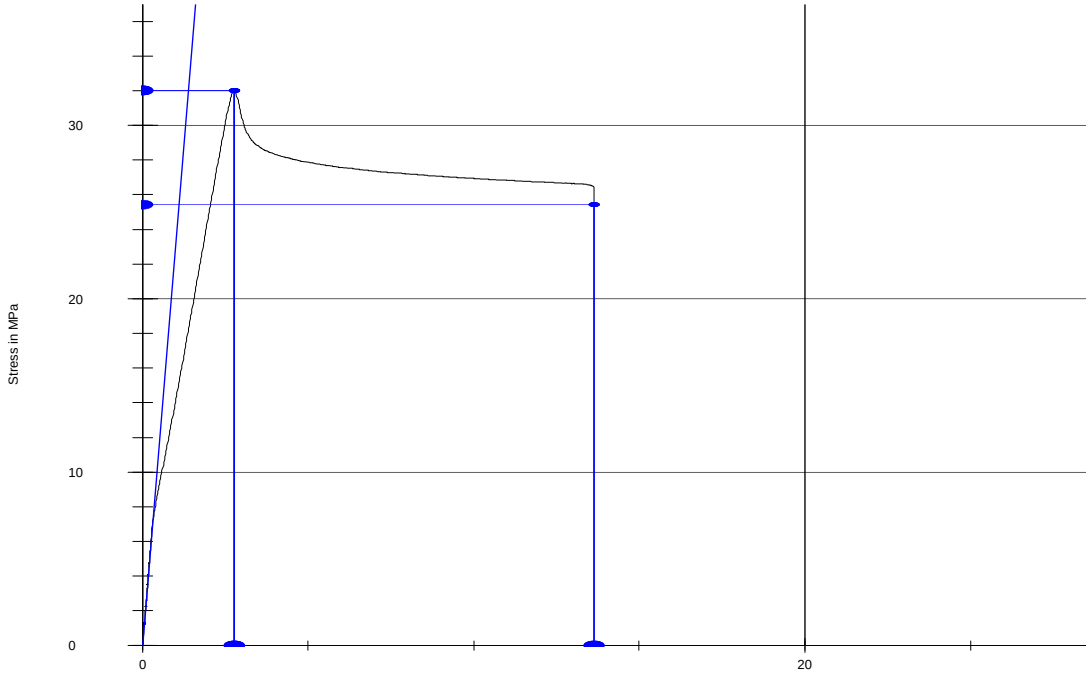

Obr. 53 Graf tah – FDM na T 5.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 10 MPa.

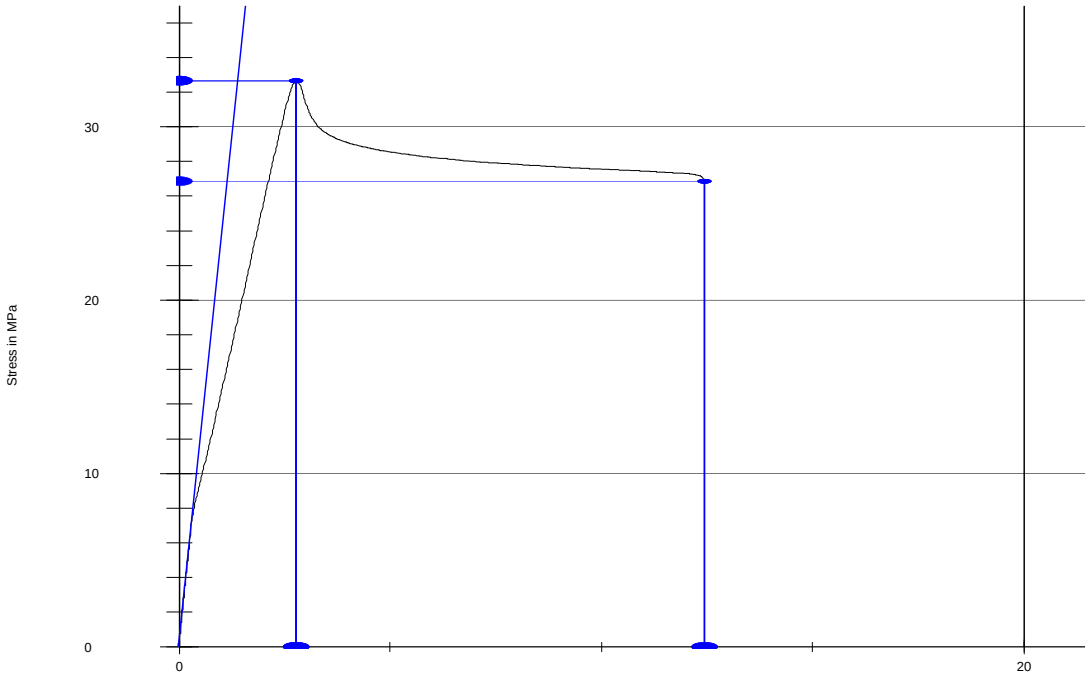
### 10.1.5 Vstřikování ABS



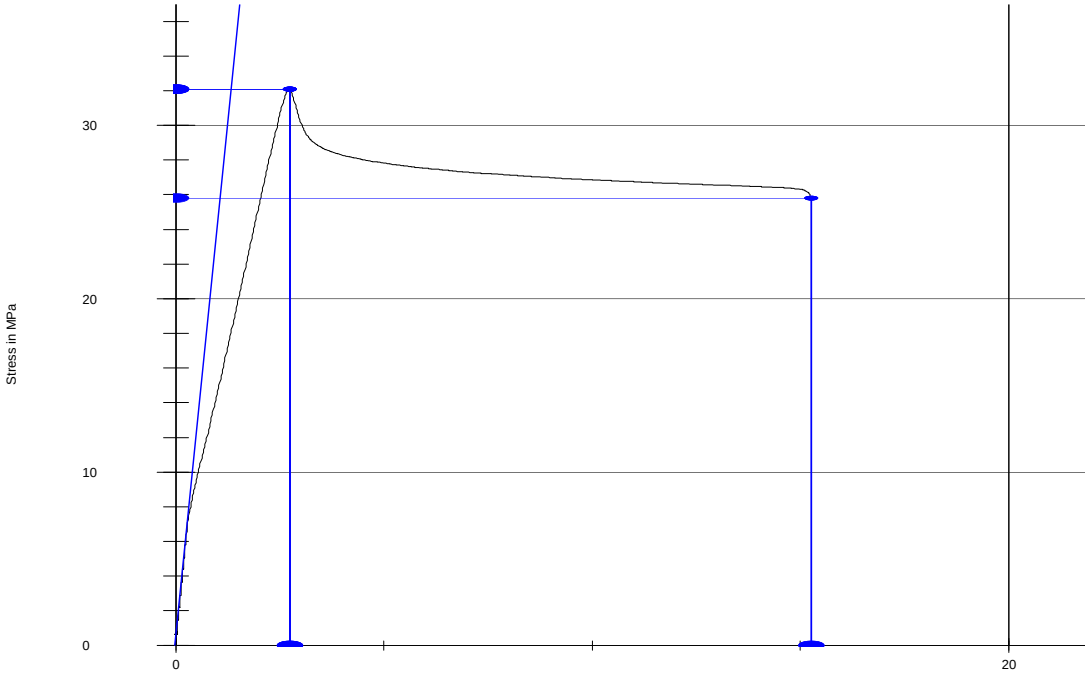

Obr. 54 Graf tah – ABS 1.



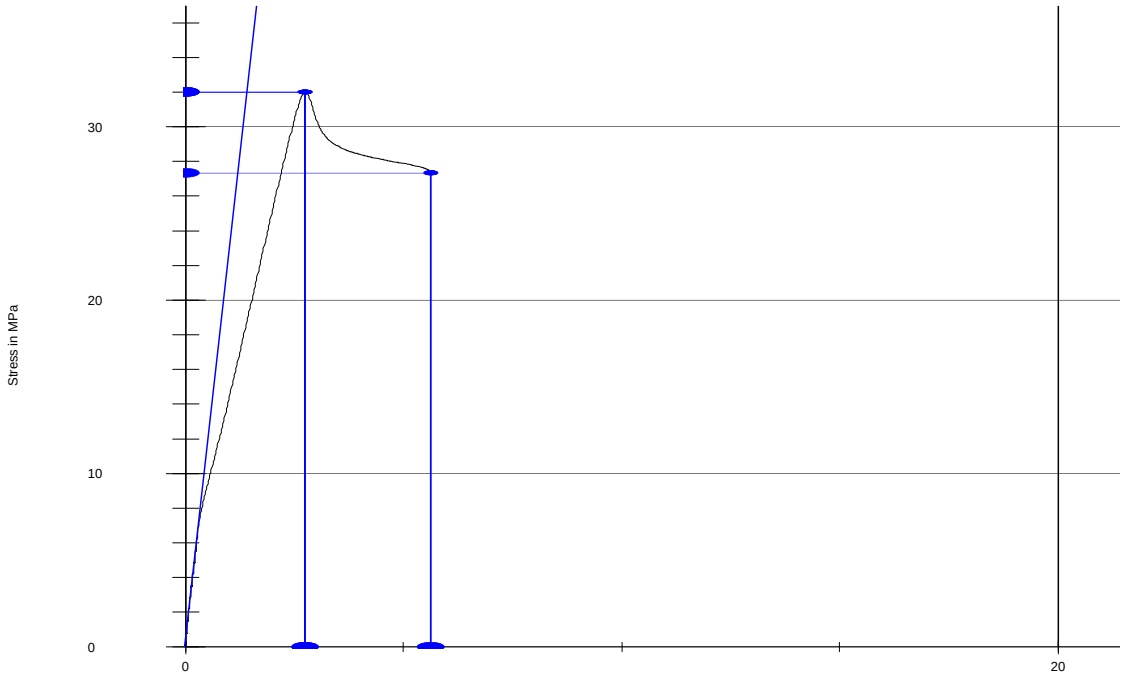

Obr. 55 Graf tah – ABS 2.




Obr. 56 Graf tah – ABS 3.



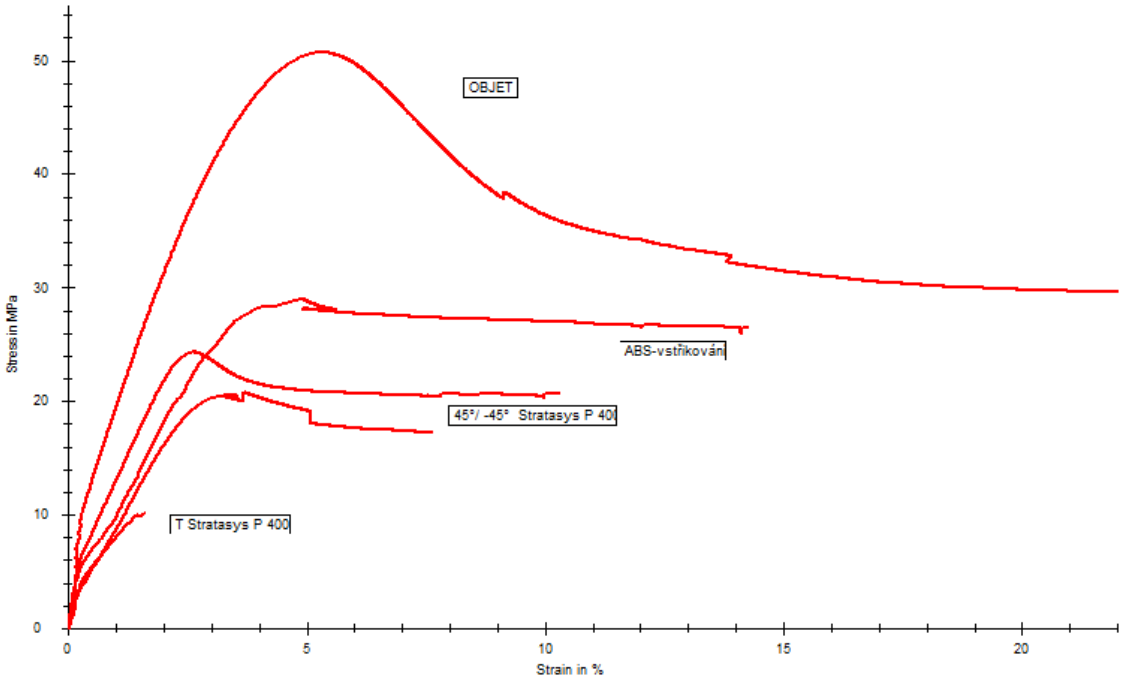

Obr. 57 Graf tah – ABS 4.




Obr. 58 Graf tah – ABS 5.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 32 MPa.

### 10.1.6 Souhrnné výsledky tahu




Obr. 59 Souhrnný graf tah

1. 3D Tisk (OBJET)

| Sub-series | Rychlost | L0 | a0 | b0 | $\sigma_t$ | E | ε | $\sigma_B$ | $L_{OB}$ | $L_{O\sigma T}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 5 | mm/min | mm | mm | mm | N/mm | N/mm | % | N/mm | mm | mm |
| {ol x} | 42,00 | 20,00 | 3,92 | 9,93 | 51,69 | 1853,58 | 5,35 | 33,11 | 4,62 | 1,07 |
| s | 18,00 | 0,00 | 0,04 | 0,08 | 3,98 | 59,57 | 0,89 | 2,47 | 3,89 | 0,18 |
| {ny} | 42,59 | 0,00 | 0,91 | 0,77 | 7,71 | 3,21 | 16,74 | 7,46 | 84,21 | 16,75 |

Tab. 1 Průměrné výsledky 3D Tisk- tah

2. FDM (naplocho)

| Sub-series | Rychlost | L0 | a0 | b0 | $\sigma_t$ | E | ε | $\sigma_B$ | $L_{OB}$ | $L_{O\sigma T}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 5 | mm/min | mm | mm | mm | N/mm | N/mm | % | N/mm | mm | mm |
| {ol x} | 50,00 | 20,00 | 4,16 | 10,08 | 20,89 | 1630,52 | 2,98 | 19,04 | 0,97 | 0,60 |
| s | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,18 | 1,26 | 116,15 | 0,11 | 1,69 | 0,38 | 0,02 |
| {ny} | 0,00 | 0,00 | 2,47 | 1,82 | 6,04 | 7,12 | 3,72 | 8,90 | 39,01 | 3,48 |

Tab. 2 Průměrné výsledky FDM(naplocho)- tah

3. FDM (na výšku)

| Sub-series | Rychlost | L0 | a0 | b0 | $\sigma_t$ | E | ε | $\sigma_B$ | $L_{OB}$ | $L_{O\sigma T}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 5 | mm/min | mm | mm | mm | N/mm | N/mm | % | N/mm | mm | mm |
| {ol x} | 50,00 | 20,00 | 4,01 | 10,28 | 24,72 | 1774,09 | 2,71 | 20,04 | 1,81 | 0,54 |
| s | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,16 | 0,48 | 71,94 | 0,05 | 0,24 | 0,30 | 0,01 |
| {ny} | 0,00 | 0,00 | 2,79 | 1,52 | 1,92 | 4,06 | 1,77 | 1,18 | 16,43 | 1,57 |

Tab. 3 Průměrné výsledky FDM(na výšku)- tah

4. FDM (na T)

| Sub-series | Rychlost | L0 | a0 | b0 | $\sigma_t$ | E | ε | $\sigma_B$ | $L_{OB}$ | $L_{O\sigma T}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 5 | mm/min | mm | mm | mm | N/mm | N/mm | % | N/mm | mm | mm |
| {ol x} | 50 | 20 | 3,98 | 9,95 | 10,26 | 1271,23 | 1,53 | 10,23 | 0,31 | 0,31 |
| s | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,29 | 19,31 | 0,11 | 0,28 | 0,02 | 0,02 |
| {ny} | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,79 | 1,52 | 7,24 | 2,72 | 7,42 | 7,14 |

Tab. 4 Průměrné výsledky FDM(naT)- tah

5. Vstřikování ABS

| Sub-series | Rychlost | L0 | a0 | b0 | $\sigma_t$ | E | ε | $\sigma_B$ | $L_{OB}$ | $L_{O\sigma T}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 5 | mm/min | mm | mm | mm | N/mm | N/mm | % | N/mm | mm | mm |
| {ol x} | 50 | 20 | 4 | 9,98 | 32,11 | 2301,69 | 2,75 | 26,32 | 2,3 | 0,55 |
| s | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,32 | 84,11 | 0,02 | 0,78 | 0,74 | 0 |
| {ny} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,99 | 3,65 | 0,78 | 2,95 | 32,11 | 0,69 |

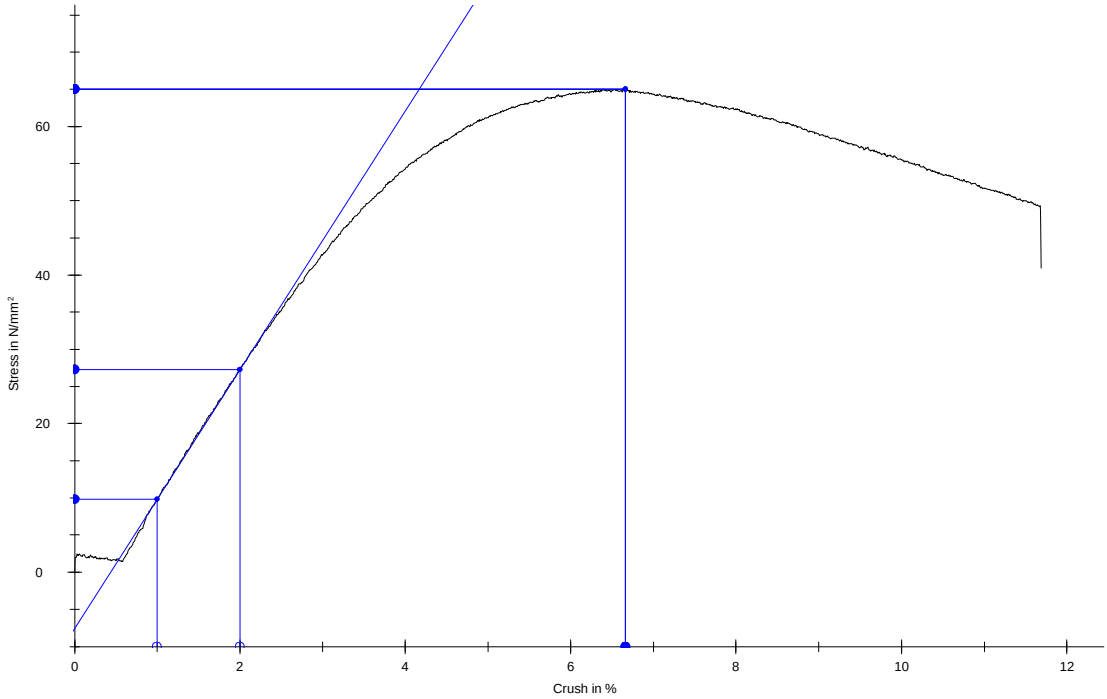
Tab. 5 Průměrné výsledky ABS – tah

Při porovnání všech výsledku jsem zjistil, že nejlepší mechanické vlastnosti mají výrobky vyrobené metodou 3D Tisk(OBJET). Ale tato metoda je na rozdíl od vstřikování dražší. Metoda FDM má téměř stejné poměrné prodloužení jako vstřikovaný materiál. Nejlepší modul pružnosti má vstřikovaný materiál.

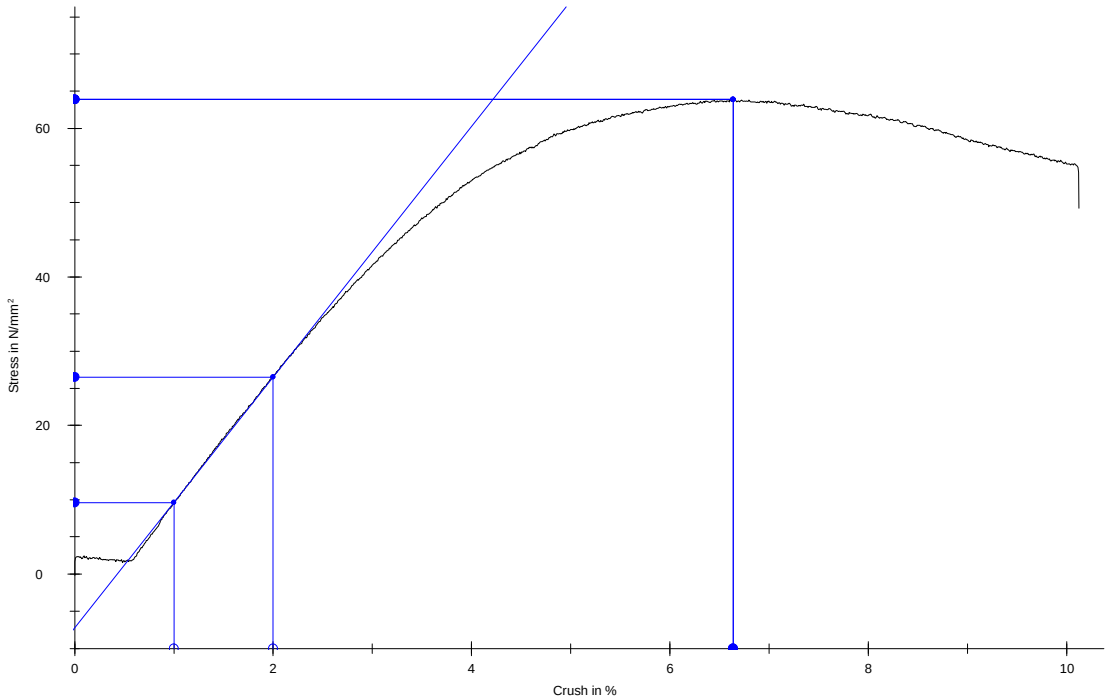
## 10.2 Zkouška ohybem

Jako zkušební těleso byl použit hranol. Jeho rozměry jsou dané normou ČSN EN ISO 178(640607). Pro každý zkoušený výrobek je zaznamenaný graf. Zkoušky se prováděli v laboratoři při teplotě 20 °C a tlaku 750 Torr.

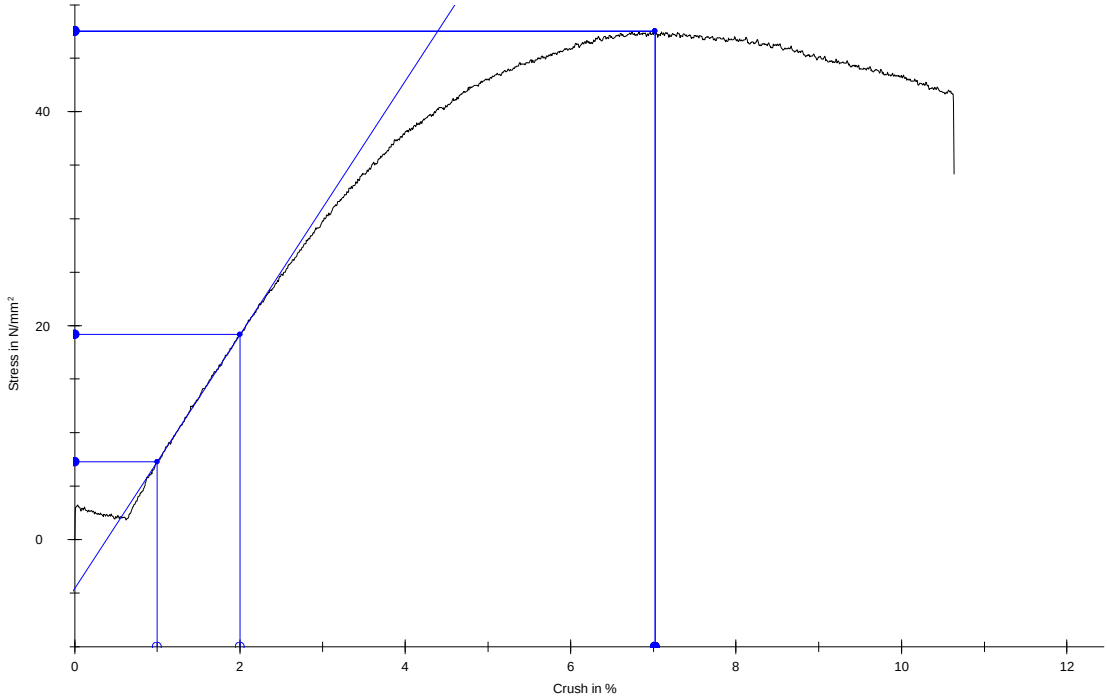
### 10.2.1 3D Tisk (OBJET)



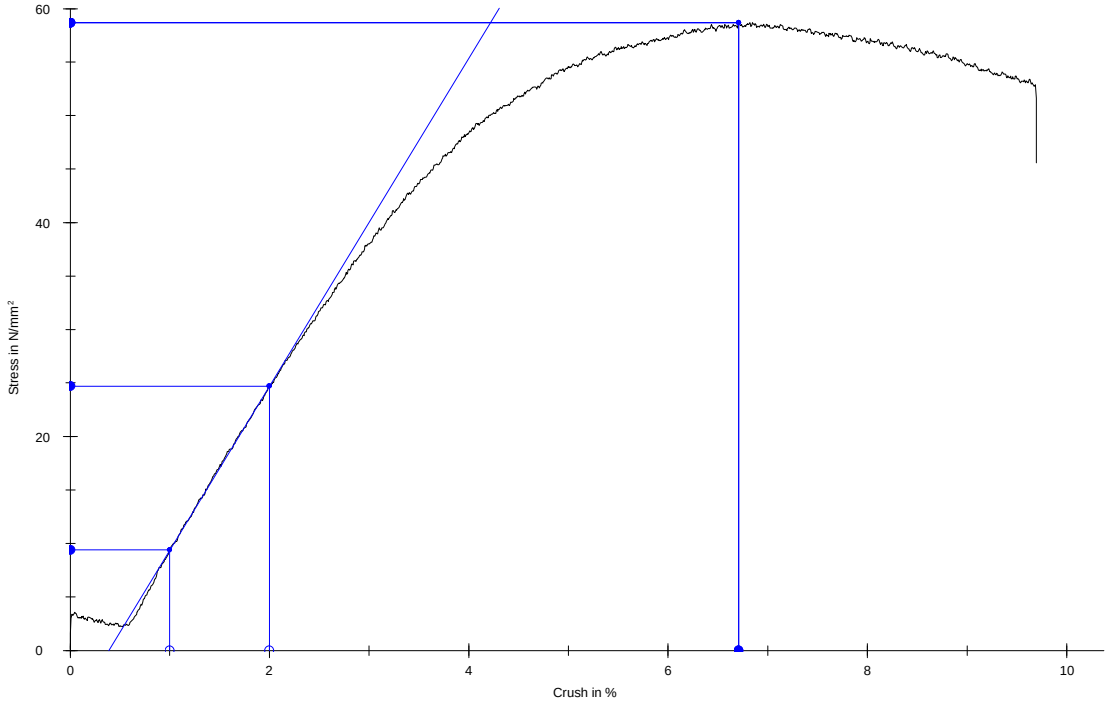

Obr. 60 Graf ohyb – 3D Tisk 1.



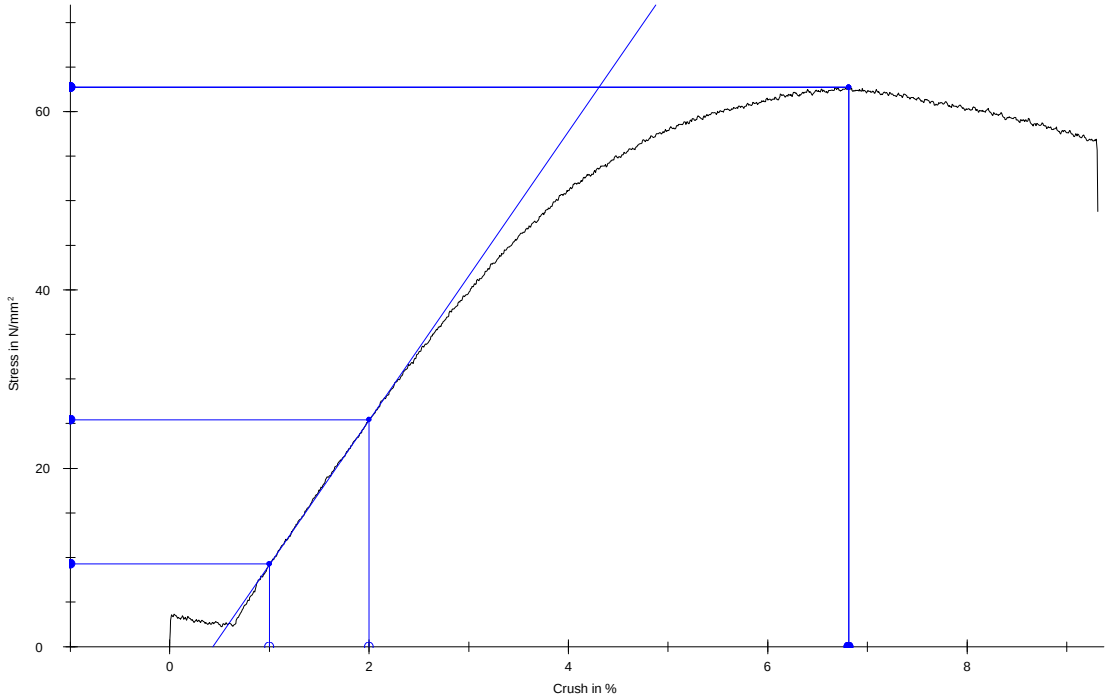

Obr. 61 Graf ohyb – 3D Tisk 2.




Obr. 62 Graf ohyb – 3D Tisk 3.



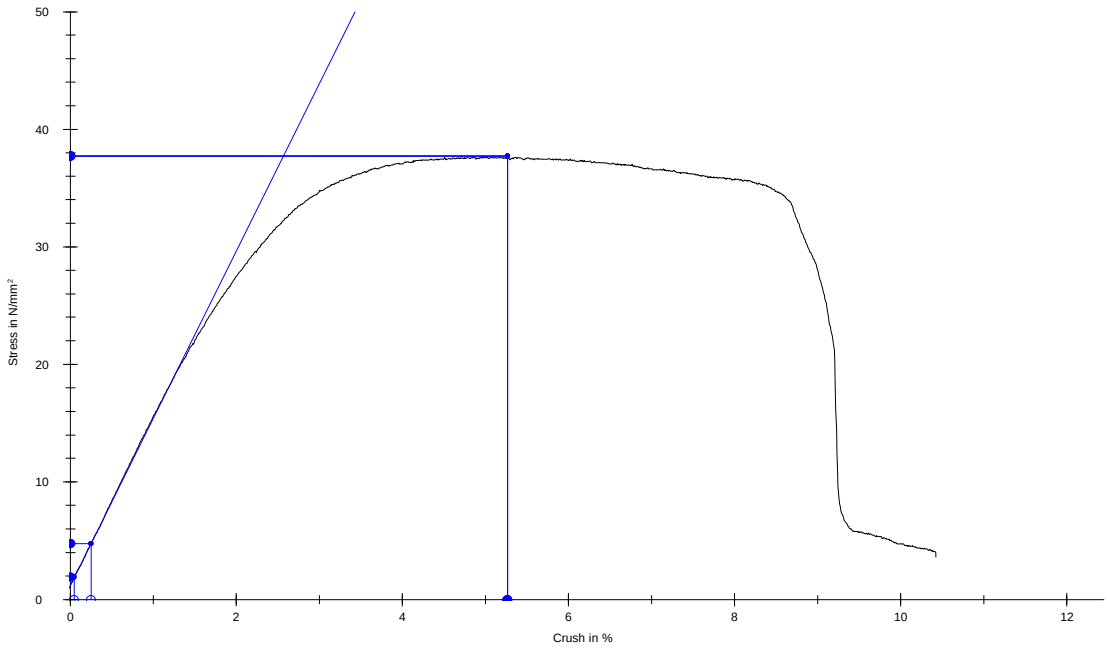

Obr. 63 Graf ohyb – 3D Tisk 4.



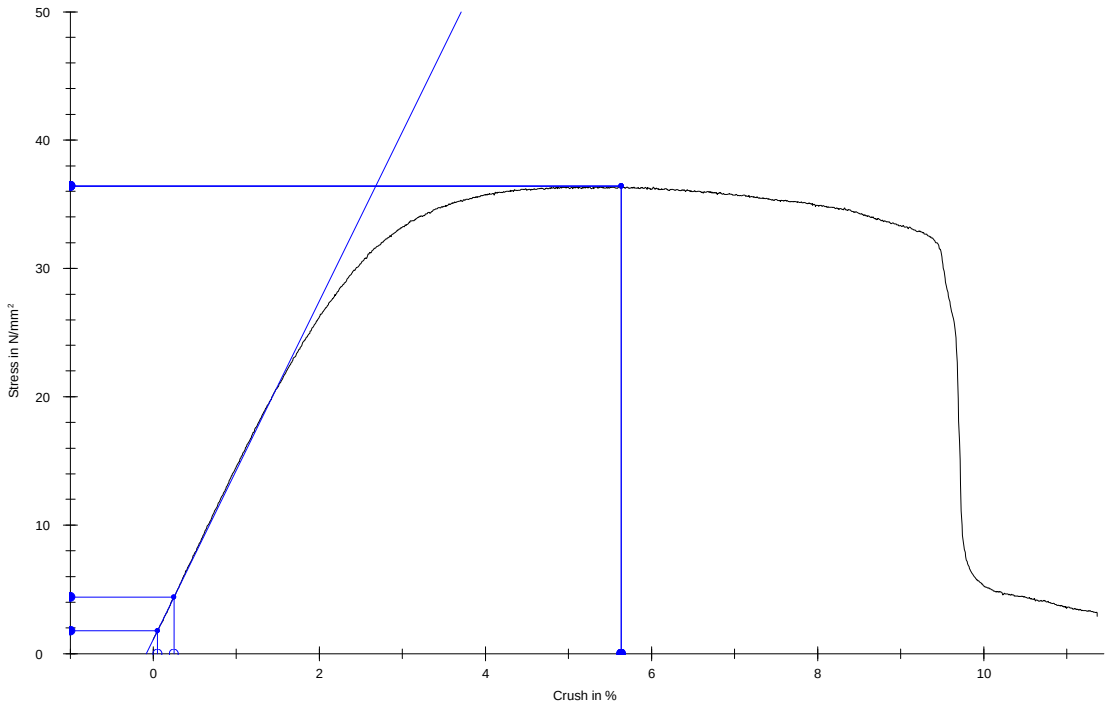

Obr. 64 Graf ohyb – 3D Tisk 5.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 60 MPa.

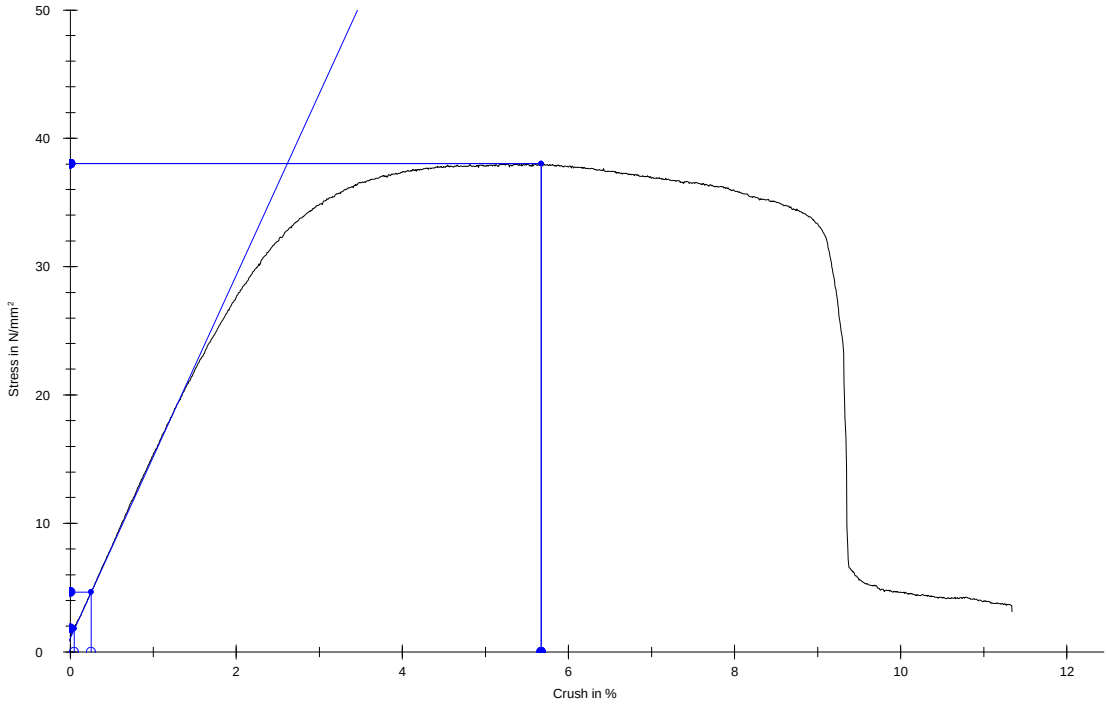
### 10.2.2 FDM




Obr. 65 Graf ohyb – FDM 1.



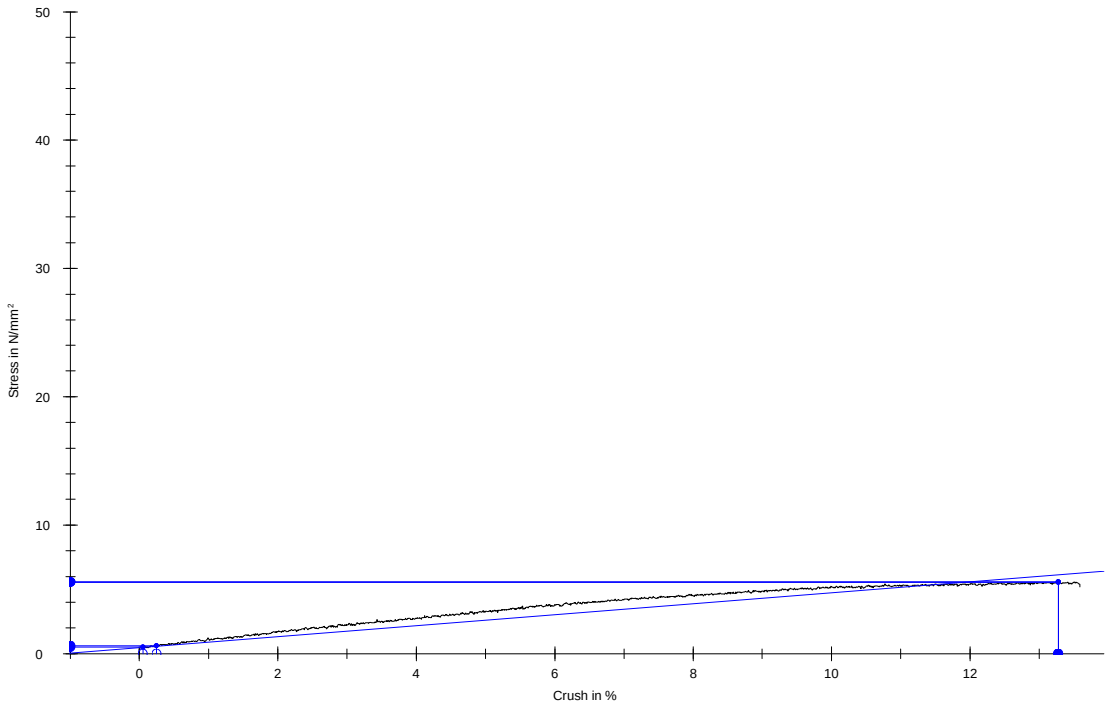

Obr. 66 Graf ohyb – FDM 2.



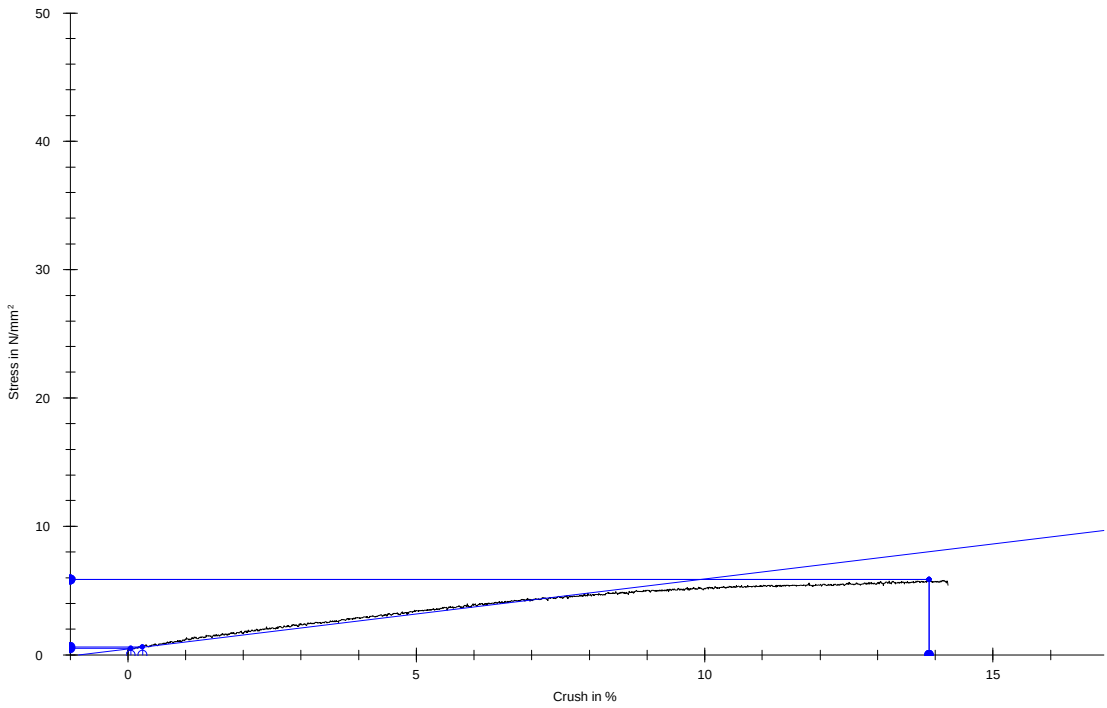

Obr. 67 Graf ohyb – FDM 3.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 37 MPa.

### 10.2.3 LOM



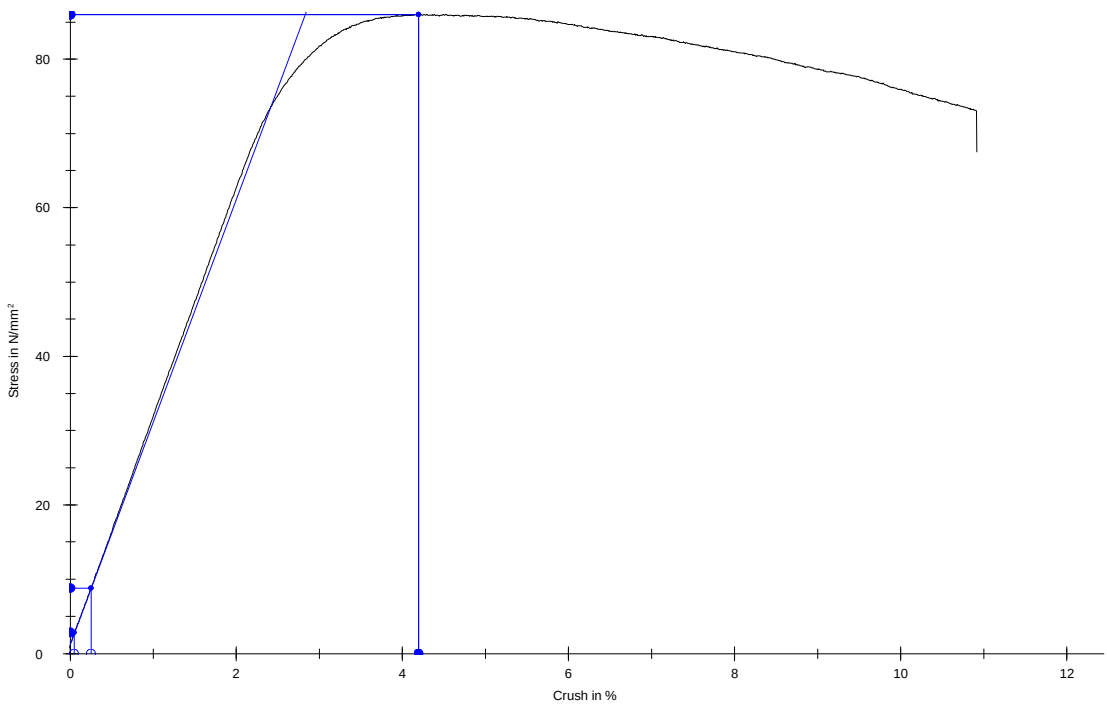

Obr. 68 Graf ohyb – LOM 1.



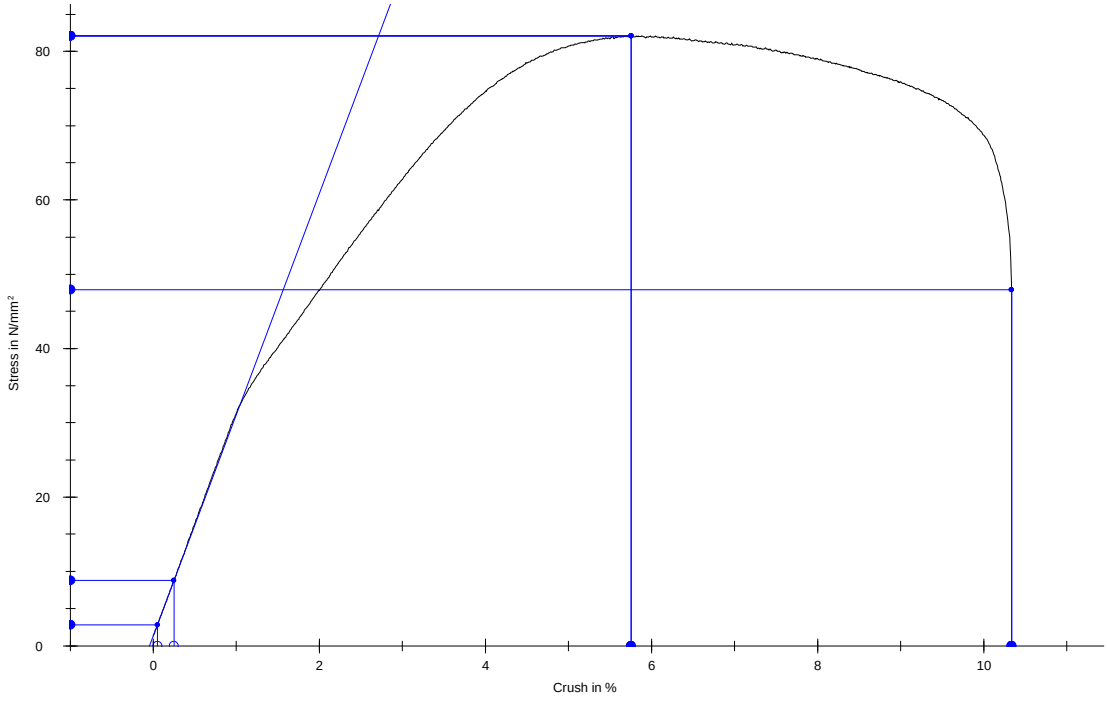

Obr. 69 Graf ohyb – LOM 2.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 8 MPa.

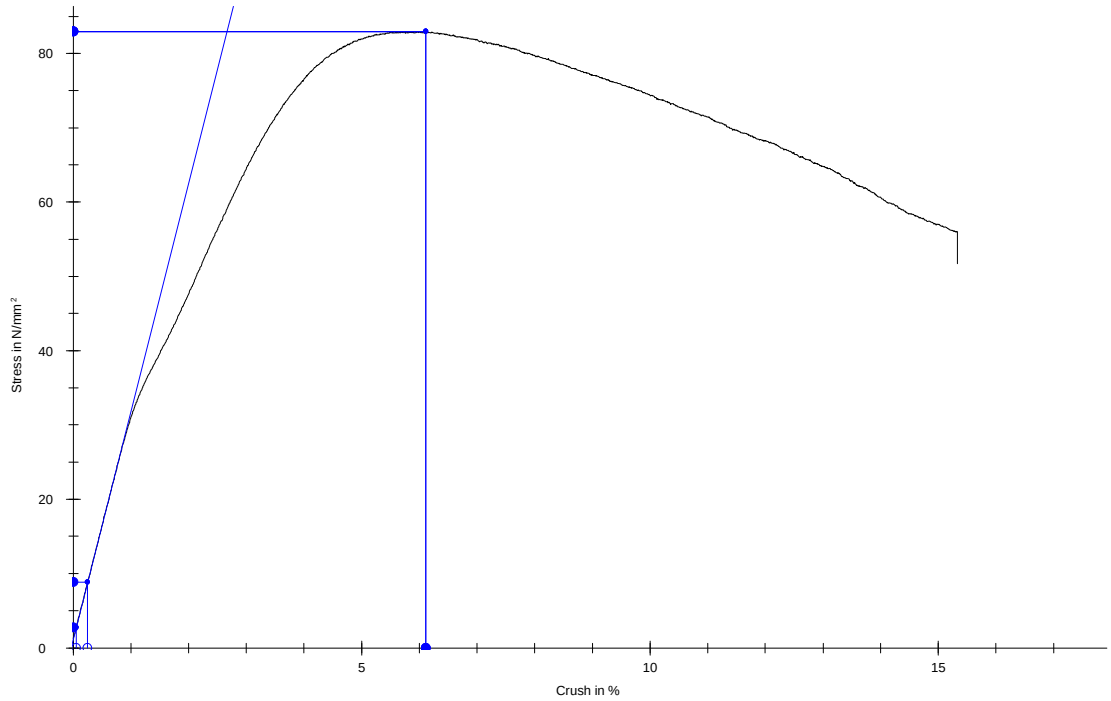
### 10.2.4 Vstřikování ABS



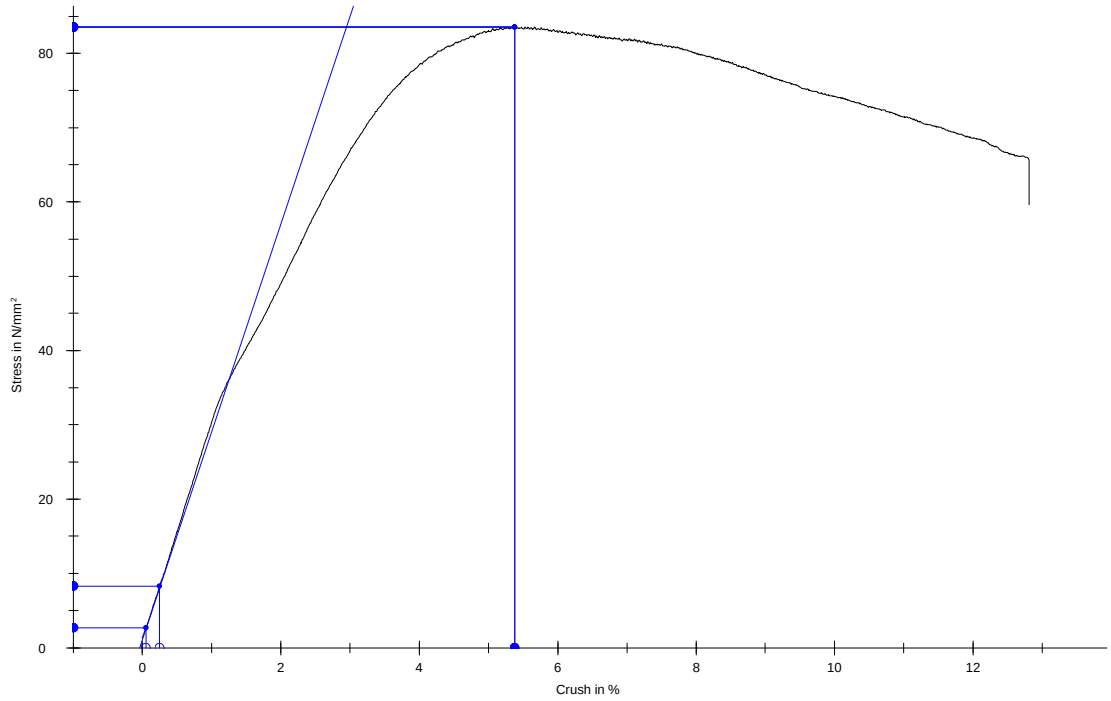

Obr. 70 Graf ohyb – ABS 1.




Obr. 71 Graf ohyb – ABS 2.



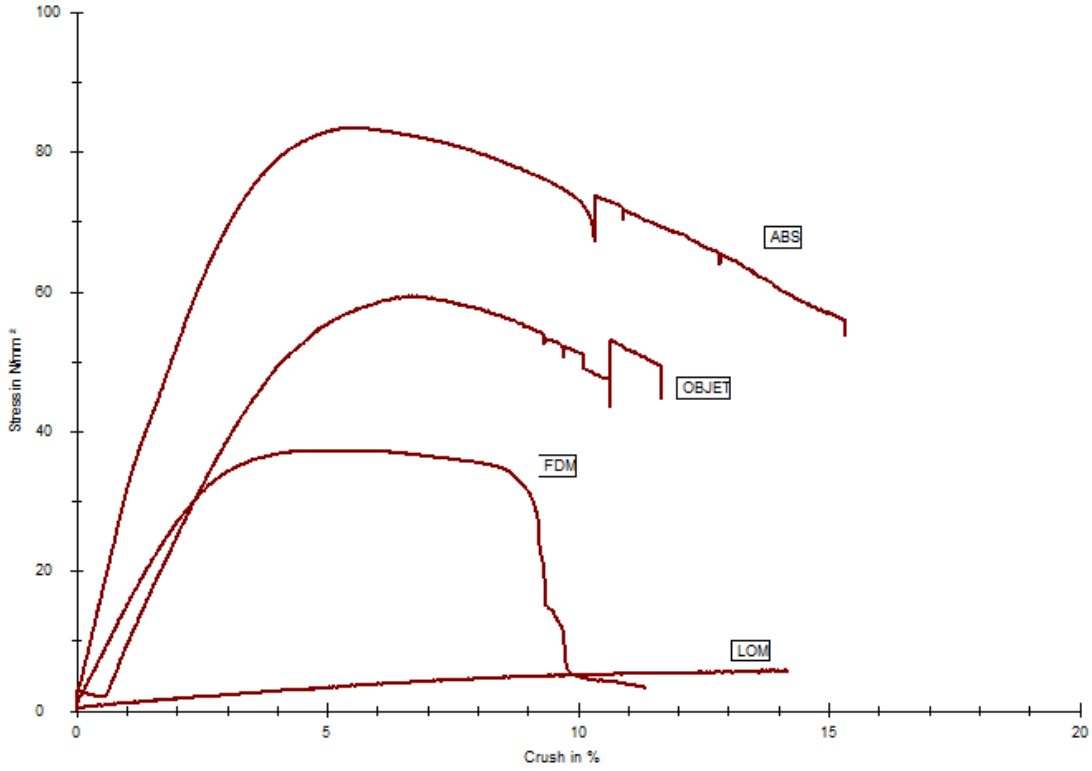

Obr. 72 Graf ohyb – ABS 3.




Obr. 73 Graf ohyb – ABS 4.

Zkušební tělesa dosahovaly hodnot meze pevnosti okolo 84 MPa.

### 10.2.5 Souhrnné výsledky ohybu




Obr. 74 Souhrnný graf ohyb

1. 3D Tisk (OBJET)

| Sub-series | a0 | b0 | $\sigma_f$ | $\varepsilon_{\sigma f}$ | $\Delta y_{\sigma f}$ | $E_f$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 5 | mm | mm | N/mm | % | mm | N/mm |
| {ol x} | 3,912 | 9,92 | 59,56 | 6,77 | 11,81 | 1554,02 |
| s | 0,02864 | 0,05523 | 7,15 | 0,15 | 0,3 | 220,4 |
| {ny} | 0,73 | 0,56 | 12 | 2,28 | 2,53 | 14,18 |

Tab. 6 Průměrné výsledky 3D Tisk (OBJET) – ohyb

2. FDM

| Sub-series | a0 | b0 | $\sigma_f$ | $\varepsilon_{\sigma f}$ | $\Delta y_{\sigma f}$ | $E_f$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 3 | mm | mm | N/mm | % | mm | N/mm |
| {ol x} | 4,18 | 9,97 | 37,39 | 5,52 | 9,02 | 1385,99 |
| s | 0,04359 | 0,01732 | 0,86 | 0,22 | 0,35 | 57,64 |
| {ny} | 1,04 | 0,17 | 2,29 | 4,05 | 3,85 | 4,16 |

Tab. 7 Průměrné výsledky FDM – ohyb

3. LOM

| Sub-series | a0 | b0 | $\sigma_f$ | $\varepsilon_{\sigma f}$ | $\Delta y_{\sigma f}$ | $E_f$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 2 | mm | mm | N/mm | % | mm | N/mm |
| {ol x} | 3,86 | 10,29 | 5,71 | 13,58 | 24,02 | 48,5 |
| s | 0,01414 | 0,01414 | 0,19 | 0,44 | 0,86 | 8,47 |
| {ny} | 0,37 | 0,14 | 3,25 | 3,22 | 3,58 | 17,46 |

Tab. 8 Průměrné výsledky LOM – ohyb

4. Vstřikování ABS

| Sub-series | a0 | b0 | $\sigma_f$ | $\varepsilon_{\sigma f}$ | $\Delta y_{\sigma f}$ | $E_f$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| n = 4 | mm | mm | N/mm | % | mm | N/mm |
| {ol x} | 3,928 | 10,13 | 83,67 | 5,36 | 9,32 | 2956,53 |
| s | 0,01708 | 0,01633 | 1,67 | 0,83 | 1,47 | 116,36 |
| {ny} | 0,43 | 0,16 | 2 | 15,54 | 15,75 | 3,94 |

Tab. 9 Průměrné výsledky ABS – ohyb

Nejlepší meze pevnosti v ohybu dosahoval výrobek ABS vyrobený vstřikováním. Nejhorší mechanické vlastnosti měl výrobek vyrobený LOM. Výrobky vyrobené metodou LOM se většinou nepoužívají do praxe. Vstřikovaný výrobek má dvakrát větší mez pevnosti než FDM.

# ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá metodami Rapid Prototyping a mechanickými vlastnostmi materiálů. V teoretické části jsem se zaměřil na mechanické zkoušky a dále jsem popsal vybrané metody Rapi Prototyping. Na závěr teoretické části jsem srovnal cnc frézování s Rapid Prototyping.

V praktické části jsou uvedeny zařízení na kterých se pracovalo. Zbytek praktické části je zobrazení výsledků naměřených hodnot a grafů.

Při porovnání výrobků vyrobenými různými metodami vyplývá z výsledků mechanických zkoušek, že nejmenší mechanické vlastnosti má metoda LOM, její výroba je levnější než výroba FDM a 3D Tisk(OBJET). Tělesa vyrobené metodou FDM mají poloviční mechanické vlastnosti než ABS vyrobené vstřikováním.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] *Trendy / Plasty* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.mmspektrum.com/clanek/prakticke-vyuziti-metod-rapid-prototypingu

[2] *Nekonvenční metody obrábění* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil

[3] *Trendy / Automatizace* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu

[4] *3D tisk* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.digis.cz/3d-tiskarny-vyroba-3d-modelu/princip-tisku/#utm_source=adwords&utm_medium=cpc&utm_campaign=3d_tisk

[5] *Rapid Prototyping* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://vrecion.plarmy.org:8081/cad/galerie/2004/RapidPrototyping.pdf

[6] *Fotogalerie RP* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.3dtiskarna.cz/fotogalerie/

[7] *Rapid prototyping vs. CNC Frézování* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/1909-rapid-prototyping-versus-cnc-frezovani.html

[8] PTÁČEK, L. a kolektiv *Nauka o materiálu I.*, Brno: CERM 2001

[9] SPŠ Zlín *Strojírenská technologie 1.*, Zlín: 2002

[10] HLUCHÝ, M. *Strojírenská technologie I.*, Praha: 1984

[11] MACEK, K. – ZUNA, P. *Nauka o materiálu I.*, Praha: 1984

[12] *Mechanické vlastnosti plastů* [online] [cit.2010-11-15] Dostupné z http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17446

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|---|---|
| Fa | zátěžná síla [N] |
| Re | mez kluzu [MPA] |
| So | průřez zkušební tyče [$mm^2$] |
| U | mez úměrnosti |
| E | mez pružnosti |
| K | mez kluzu |
| P | mez pevnosti |
| S | bod při přetržení |
| Mmax | největší ohybový moment |
| Wo | modul průřezu v ohybu [$mm^3$] |
| $\sigma_t$ | mez pevnosti v tahu [MPa] |
| Lo | délka těles před zkouškou [mm] |
| $\Delta L_{O\sigma t}$ | celkové prodloužení při přetrhnutí [mm] |
| $\varepsilon_{\sigma t}$ | poměrné prodloužení [%] |
| $\sigma_B$ | napětí při přetrhnutí [MPa] |
| $\Delta L_{OB}$ | celkové prodloužení při přetrhnutí [mm] |
| $E_t$ | modul pružnosti v tahu [MPa] |
| $\sigma_f$ | mez pevnosti v ohybu [MPa] |
| $\Delta y_{\sigma f}$ | průhyb zkušebního tělesa [mm] |
| $\varepsilon_{\sigma f}$ | poměrné prodloužení [%] |
| $E_f$ | modul pružnosti v ohybu [MPa] |

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Průměrné výsledky 3D Tisk- tah 64

Tab. 2 Průměrné výsledky FDM(naplocho)- tah 64

Tab. 3 Průměrné výsledky FDM(na výšku)- tah 64

Tab. 4 Průměrné výsledky FDM(naT)- tah 64

Tab. 5 Průměrné výsledky ABS – tah 65

Tab. 6 Průměrné výsledky 3D Tisk (OBJET) – ohyb 73

Tab. 7 Průměrné výsledky FDM – ohyb 73

Tab. 8 Průměrné výsledky LOM – ohyb 74

Tab. 9 Průměrné výsledky ABS – ohyb 74

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1 Přístroj SLA250 12

Obr.2 Základní druhy namáhání 14

Obr.3 Zkušební tyče pro zkoušku tahem 16

Obr.3 Zkušební tyče pro zkoušku tahem 16

Obr.5 Zkouška tříbodovým ohybem 18

Obr.6 Zkouška čtyřbodovým ohybem 18

Obr.7 Zkušební vzorek 19

Obr.8 Zatěžování zkušebního tělesa 19

Obr.9 Schéma univerzálního zkušebního stroje 20

Obr.10 Typické křivky napětí/poměrné prodloužení pro polymerní materiály 21

Obr.11 Schéma zařízení pro technologii stereolitografie 26

Obr.12 Zařízení stereolitografi 27

Obr.13 Schéma zařízení pro technologii SLS 29

Obr.14 Zařízení SLS 30

Obr.15 a), b), c) Princip tisku 31

Obr.16 Schéma zařízení pro technologii LOM 32

Obr.17 FDM technologie 33

Obr.18 a), b), c) různé výrobky 34

Obr.19 Klip 35

Obr.20 Ozubená kola 35

Obr.21 Dekorační mísa 36

Obr.22 Porovnání dílů zhotovených technologiemi RP (vlevo) a CNC (vpravo) 38

Obr. 23 OBJET EDEN 250 41

Obr. 24 SRATASYS DIMENSION SST 768 42

Obr. 25 GRAPHTEC CE 3000-60 43

Obr. 26 ARBURG 420C 44

Obr. 27 ZWICK 1456 45

Obr. 28 3D model zkušebního tělea na tah 47

Obr. 28 3D model zkušebního tělea na ohyb 47

Obr. 30 Zkušební těleso naplocho 48

Obr. 31 Zkušební těleso na výšku 48

Obr. 32 Zkušební těleso na T 49

Obr. 33 Zkušební těleso na tah 50

Obr. 34 Graf tah – 3D Tisk 1. 51

Obr. 35 Graf tah-3D Tisk 2. 51

Obr. 36 Graf tah – 3D Tisk 3. 52

Obr. 37 Graf tah – 3D Tisk 4. 52

Obr. 38 Graf tah – 3D Tisk 5. 53

Obr. 39 Graf tah – FDM naplocho 1. 53

Obr. 40 Graf tah – FDM naplocho 2. 54

Obr. 41 Graf tah – FDM naplocho 3. 54

Obr. 42 Graf tah – FDM naplocho 4. 55

Obr. 43 Graf tah – FDM naplocho 5. 55

Obr. 44 Graf tah – FDM na výšku 1. 56

Obr. 45 Graf tah – FDM na výšku 2. 56

Obr. 46 Graf tah – FDM na výšku 3. 57

Obr. 47 Graf tah – FDM na výšku 4. 57

Obr. 48 Graf tah – FDM na výšku 5. 58

Obr. 49 Graf tah – FDM na T 1. 58

Obr. 50 Graf tah – FDM na T 2. 59

Obr. 51 Graf tah – FDM na T 3. 59

Obr. 52 Graf tah – FDM na T 4. 60

Obr. 53 Graf tah – FDM na T 5. 60

Obr. 54 Graf tah – ABS 1. 61

Obr. 55 Graf tah – ABS 2. 61

Obr. 56 Graf tah – ABS 3. 62

Obr. 57 Graf tah – ABS 4. 62

Obr. 58 Graf tah – ABS 5. 63

Obr. 59 Souhrnný graf tah 63

Obr. 60 Graf ohyb – 3D Tisk 1. 66

Obr. 61 Graf ohyb – 3D Tisk 2. 66

Obr. 62 Graf ohyb – 3D Tisk 3. 67

Obr. 63 Graf ohyb – 3D Tisk 4. 67

Obr. 64 Graf ohyb – 3D Tisk 5. 68

Obr. 65 Graf ohyb – FDM 1. 68

Obr. 66 Graf ohyb – FDM 2. 69

Obr. 67 Graf ohyb – FDM 3. 69

Obr. 68 Graf ohyb – LOM 1. 70

Obr. 69 Graf ohyb – LOM 2. 70

Obr. 70 Graf ohyb – ABS 1. 71

Obr. 71 Graf ohyb – ABS 2. 71

Obr. 72 Graf ohyb – ABS 3. 72

Obr. 73 Graf ohyb – ABS 4. 72

Obr. 74 Souhrnný graf ohyb 73