

# **Studium vlivu polymeru na mechanické vlastnosti při laserovém obrábění**

Jaroslav Doležal

---

Bakalářská práce  
2012



**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav DOLEŽAL**  
Osobní číslo: **T090002**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Studium vlivu polymeru na mechanické vlastnosti při laserovém obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Vytvořte zkušební tělíska z různých materiálů na laseru ILS
3. Proveďte mechanické zkoušky
4. Proveďte vyhodnocení experimentálních zkoušek

---

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**-dle doporučení vedoucího bakalářské práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jana Knedlová**  
Fakulta technologická

Datum zadání bakalářské práce:

**13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**25. května 2012**

Příjmení a jméno: DOLEŽAL JAROSLAV

Obor: TECHNOLOG. ZARIŽENÍ

## PROHLÁŠENÍ

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 <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> 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 14.5.2012

  
.....

<sup>1)</sup> 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 nevydávalečně 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) *Dísertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být tiskem nejmeně 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 výtisky, opisy nebo rozmnoženiny.*

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

<sup>2)</sup> 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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

<sup>3)</sup> 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 přihlídá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 2.*

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá mechanickou zkouškou na ohyb. Zkušební tělesa jsou vypálena v pěti sériích pomocí laseru při různých řezných podmínkách a jedné série vzorků vyrobených vstřikováním. Cílem práce je zjistit vliv řezných podmínek na mechanické vlastnosti v ohybu a porovnání zkušebních vzorků vyrobených metodou vstřikováním se zaměřením na modul pružnosti v ohybu, poměrnou deformaci a pevnost.

Klíčová slova: Laser, polymer, trhací stroj, modul pružnosti

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the mechanical bending test. The test specimens are burned in five series with the laser at different cutting conditions and a series of samples produced by injection molding. The aim is to determine the influence of cutting conditions on the mechanical properties in bending and comparison test samples produced by injection with a focus on the bending modulus of elasticity, strain and strength.

Keywords: Laser, polymer, ripper, modulus of elasticity

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing.Janě Knedlové za obětavé vedení, ochotu a strávený čas při vypracování bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE V PRAXI</b> .....	<b>11</b>
1.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA A VLASTNOSTI LASERU.....	11
1.2 ZÁKLADNÍ SOUČÁSTI LASEROVÝCH SYSTÉMŮ.....	13
1.3 POUŽITÍ LASERŮ.....	14
<b>2 VYUŽITÍ LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ</b> .....	<b>15</b>
2.1 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	16
2.2 LASEROVÉ VRTÁNÍ.....	16
2.3 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ.....	17
2.4 HLAVNÍ TYPY LASERŮ.....	18
<b>3 PLASTY VE STROJÍRENSTVÍ</b> .....	<b>21</b>
3.1 DĚLENÍ PLASTŮ.....	21
3.2 VÝROBA A VLASTNOSTI VYBRANÝCH TERMOPLASTŮ.....	22
<b>4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU</b> .....	<b>23</b>
4.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	23
4.2 ZKOUŠKA TLAKEM.....	26
<b>5 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>29</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>30</b>
<b>6 POPIS A PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>31</b>
6.1 LASEROVÁ TISKÁRNA ILS 3NM.....	31
6.2 UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	33
<b>7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK</b> .....	<b>35</b>
<b>8 PROVEDENÍ OHYBOVÉ ZKOUŠKY</b> .....	<b>39</b>
8.1 VYPÁLENÉ VZORKY.....	41
8.2 VSTŘIKOVANÉ VZORKY.....	56
<b>9 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK</b> .....	<b>59</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>64</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>65</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>66</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>68</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>70</b>



## ÚVOD

Předchozí století, tedy století dvacáté bylo provázené společenskou změnou. Ovšem revoluční toto století bylo zejména velkým nárůstem znalostí z vědních a společenských oborů. Každý technický objev, ať už přímo nebo nepřímo značnou měrou ovlivnil nějakým způsobem společnost a její budoucí rozvoj. Člověk je tvorem zvědavým a rád si jakoukoli činnost ulehčuje svými vynálezy. Představme si, kde bychom dnes byli, kdyby se nezačaly vyrábět automobily, jakožto moderní dopravní prostředek. Mnohým lidem by se to vůbec nelíbilo. Stejně tak, jako by se nikomu nelíbilo umírat na zcela dnes běžně léčitelné nemoci. Samozřejmě si také takto prudký rozvoj vyžaduje svou daň. Lidé jsou neustále ve spěchu a celý náš život se neustále zrychluje.

Aby se s tímto trendem dal udržet krok, musí se vyvíjet i technologie, které ve své podstatě tento pokrok umožňují. Jednou z mnoha oblastí, je i technologie obrábění, která zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti a faktory obráběcího procesu. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem tohoto procesu jsou obrobené plochy.

Aplikované materiály, dnes musejí splňovat celou řadu kritérií z hlediska opotřebení, dlouhé životnosti, vzhledu, vlastností, a v neposlední řadě hraje významnou roli i hledisko ekonomické. Kvůli značně velkým požadavkům se musejí vyvíjet i nekonvenční technologie, protože běžné metody nejsou dostačující, aby splnily rychlost výroby a kvalitu zpracování materiálů. Mezi tyto nekonvenční technologie se řadí i laser. Jeho objev může být zcela vážně srovnáván s objevem elektrického proudu, parního stroje, raketové techniky a dalších. Rychlé a ekonomické je zpracování téměř všech druhů materiálů a to všechno nám právě umožňuje technologie laserového zpracování.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE V PRAXI

Od sestrojení prvního funkčního laseru uplynulo více než 50 let. Každá aplikace má své požadavky. Díky těmto požadavkům se objevilo mnoho dalších typů laserů, které odpovídá širokému poli jejich možnému využití.

Laser se postupem času stal nepostradatelným nástrojem nejen vědy a výzkumu, ale i odvětví průmyslu, medicíny. V běžném denním životě se jistě každý mohl setkat alespoň s nějakým zařízením, které využívá laserového paprsku.

Všechny lasery mají jako zdroj druh světla, jež se běžně v přírodě nevyskytuje. Jedná se o monochromatické světlo, které má podobu úzkého směřovaného paprsku a lze jej zaostřit na malý průměr. [1]

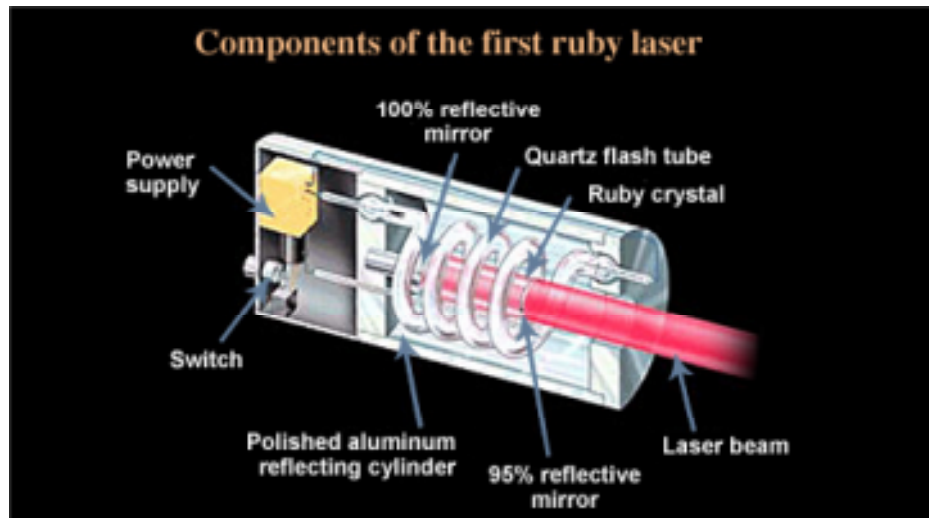
### 1.1 Fyzikální podstata a vlastnosti laseru

Slovo LASER má svůj základ v anglickém jazyce tedy Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Do češtiny lze přeložit jako zesílení světla stimulovanou emisí záření. K zesílení světla dochází opakovanými průchody fotonů optickou dutinou vymezenou zrcadly tzv. rezonátorem.

První funkční laser byl sestrojen v roce 1960 americkým fyzikem T. H. Maimanem. Šlo o rubínový laser zobrazený na obr. 1, s vlnovou délkou 694,3 nm. Ve srovnání s dnešními lasery nebyl příliš efektivní. Využíval jen tři energetické hladiny krystalu rubínu, a proto mohl pracovat pouze v pulsním (pulsy s vysokou opakovací frekvencí) režimu. Tento nedostatek odstranili fyzici N.G.Basov, A. M. Prochorov a CH. H. Townes použitím více energetických hladin, což mělo velký vliv na kontinuitu vyzařovaného paprsku. Za svůj objev společně obdrželi v roce 1964 Nobelovu cenu. Začaly se tak objevovat další lasery lišící se svou vlnovou délkou záření, výkonem, účinností ale i různou konstrukcí.

V současnosti se vyrábí lasery pokrývající širokou část spektra od mikrovlnné, přes infračervenou, viditelnou a ultrafialovou až po rentgenovou.

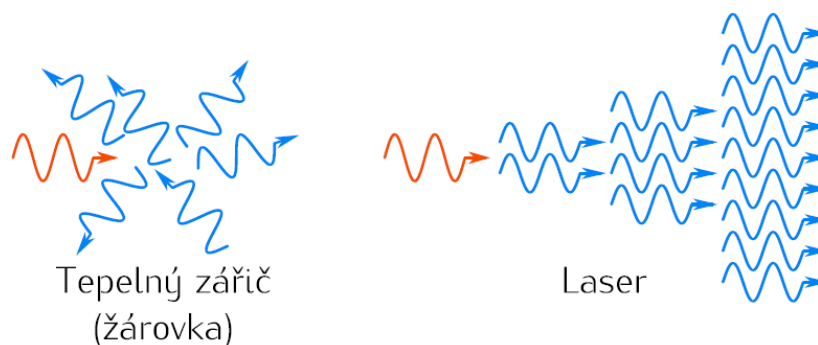
Vlnové délky těchto laserů jsou v rozmezí od stovek mikrometrů až po jednotky nanometrů. [1]



Obr. 1 Schéma a fotografie prvního rubínového laseru[1]

Stimulované emitované fotony (záření) mají všechny stejnou vlnovou délku, a tím i energii. Podle toho jakou má záření vlnovou délku, se odvíjí barva paprsku. Laserové záření je proto monochromatické. Fotony laserového záření jsou navíc ve fázi a postupují stejným směrem (koherence záření).

Srovnání běžného světla a laseru je uvedeno v obr. 2. Je zde patrná vysoká koherence, a nízká rozbíhavost laserového svazku, což umožňuje zaostřit na velmi malý průměr, a tím dosažení určitého výkonu.[1]



Obr. 2 Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru[1]

Důležitým parametrem při volbě laseru pro konkrétní aplikaci je kvalita jeho svazku. Mírou kvality laserového svazku je jeho schopnost být zaostřen.

## 1.2 Základní součásti laserových systémů

Základní součásti laserových systémů lze rozdělit do tří skupin. První skupinou je samotná součástka zvaná rezonátor, znázorněna na obr. 3, která je tvořena dvěma zrcadly, z nichž jedno je zcela odrazivé a druhé částečně propustné. Tato zrcadla nemusí být vždy jen rovinná, lze využít i zrcadla konvexního nebo konkávního tvaru.[2]

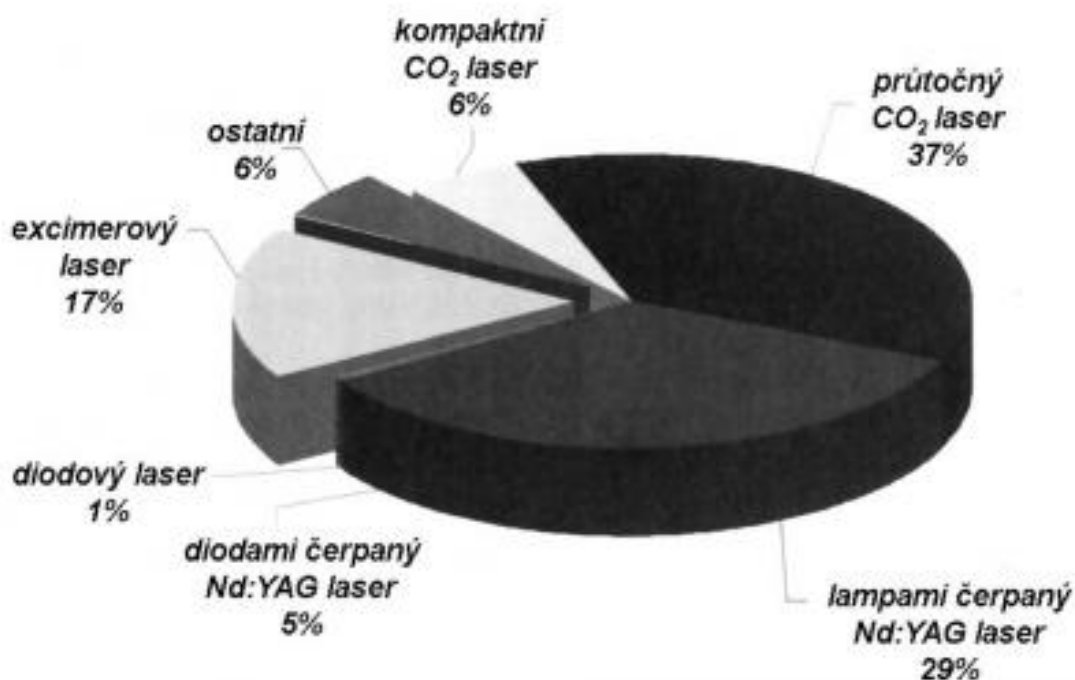


Obr. 3 Schéma optického rezonátoru[1]

Druhou skupinou je aktivní prostředí. Zde se tak může jednat o plyn nebo směs plynů, monokrystal, polovodič nebo volné elektrony. Kromě již zmiňovaného aktivního prostředí, ve kterém dochází ke stimulované emisi, patří mezi nezbytné součásti i třetí skupina a tou je příslušenství. Pod tímto označením si lze představit chladič, měření výkonu, kalibrace zařízení a čerpací zařízení nebo řídicí počítač. [2]

### 1.3 Použití laserů

V celé řadě oborů se dnes můžeme setkat s laserem například laserové ukazovátka, různé snímače používané v bezpečnostní technice, laserová vodováha a mnoho dalších. V neposlední řadě se také používá v lékařství, astronomii, chemii, energetice, ve výpočetní technice, dálkovém řízení. Každý z těchto oborů využívá jiný typ laseru a podle toho mají svůj podíl na trhu, uvedené v obr. 4.[4]



Obr. 4 Podíl na trhu-typy laserů[4]

## 2 VYUŽITÍ LASERŮ VE STROJÍRENSTVÍ

Ve strojírenství se laser začal využívat od druhé poloviny 60. let. Vývoj laseru i jeho aplikace se neustále rozšiřují a inovují. Laserovou technologií definujeme jako opracování materiálu založené:

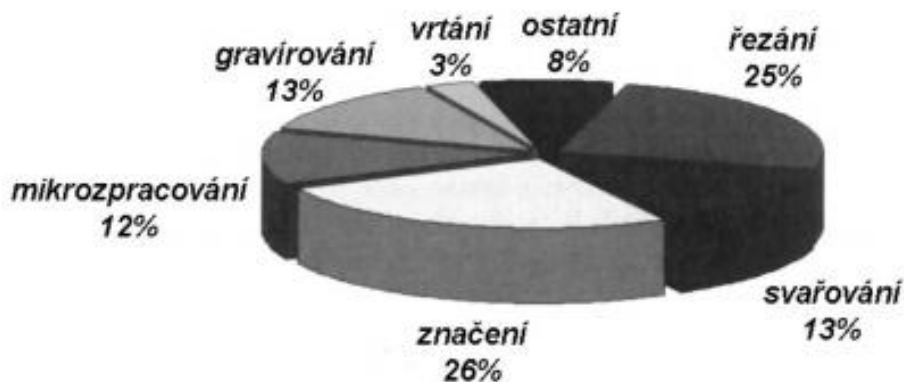
- na využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a spektrálním intervalu
- na interakci optického záření s látkou

Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů.

Ve strojírenství se laser používá pro svařování, vrtání, řezání, tepelné zpracování, značení a gravírování, povrchové úpravy, povlakování, a pro laserovou podporu konvenčního obrábění. Rozdělení podle procent je na obr. 5. Obrobitelnost materiálu laserem je dána zejména těmito vlastnostmi:

- pohltivostí- schopností pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky, tzn. na tepelnou energii
- odrazivostí, která je dána poměrem množství odražené energie k energii dopadající.

Obrobitelnost materiálu laserem je tím lepší, čím větší je pohltivost materiálu a menší jeho tepelná vodivost a odrazivost. [4]

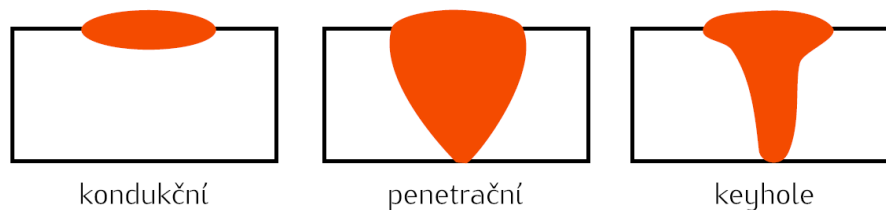


Obr. 5 Procento rozdělení jednotlivých technologií[4]

## 2.1 Laserové svařování

Při působení laserového svazku s vysokou plošnou hustotou výkonu, dochází k rychlému lokálnímu ohřevu, při kterém se nestihnou plně uplatnit mechanismy vedení a sálání tepla. Ohřev, natavení, spojení i následné ochlazení součástí při svařování laserem probíhají velmi rychle, díky čemuž získáváme úzkou tepelně ovlivněnou oblast v okolí svaru, a tím i mnohem menší deformace svarů. Dalšími přednostmi použití laseru jsou vysoká rychlost svařování, vysoká pevnost a také čistota svarů díky bezkontaktnímu přístupu nebo možnost svařovat materiály s velmi rozdílnými teplotami tavení.

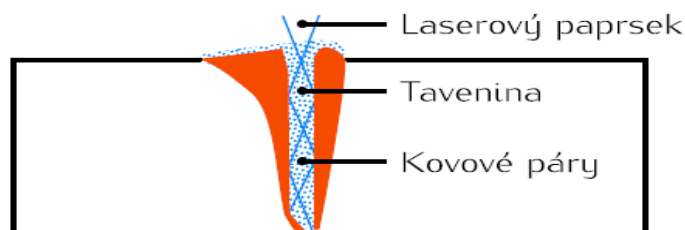
V závislosti na výkonu laseru a průměru fokusovaného svazku, případně poloze ohniska vůči materiálu, získáváme konkrétní velikost hustoty výkonu svazku, podle níž dělíme techniky svařování laserem na kondukční, penetrační a keyhole svařování vzhledem k dosažovanému poměru hloubky k šířce svaru jak je znázorněno na obr. 6. [1]



Obr. 6 Schéma laserového svařování[1]

## 2.2 Laserové vrtání

Laserové vrtání je založeno na odpařování materiálu, a vyžaduje tedy vysokou hustotu výkonu dopadajícího laserového svazku. Po dopadu zaostřeného svazku se materiál lokálně ohřeje na teplotu varu a dojde k jeho částečnému odpaření. Vytvoří se dutina, podle charakteristického tvaru nazývaná keyhole zobrazená na obr. 7. Uvnitř dutiny dochází k mnohonásobným odrazům záření, což má za následek náhlý vzrůst absorpce, a tím i prohloubení otvoru. [1]



Obr. 7 Schéma laserového vrtání[1]



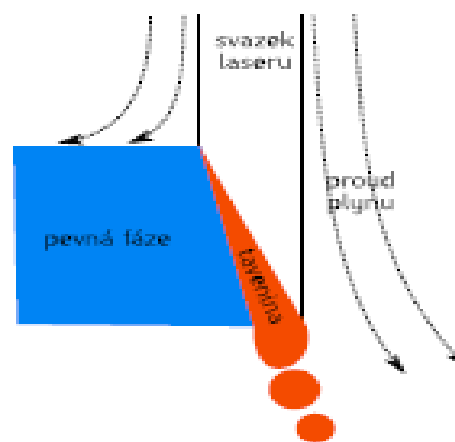
## 2.3 Laserové řezání

Při laserovém řezání se dosahuje velmi úzkých, přesných a hladkých řezů bez okují. Hrany jsou kolmé i při větších tloušťkách materiálu a většinou nejsou další úpravy. Hloubka řezu závisí na výkonu laserového systému a na druhu řezaného materiálu.

Mezi základní a nejčastěji používané patří odpařovací a tavné řezání, a dále laserové orýsování, studené řezání a kontrolovaný lom. [1]

Odpařovací řezání je prakticky vrtáním řady otvorů jeden vedle druhého. Této metody se využívá především pro dělení netavitelných materiálů, jakými jsou dřevo, uhlík nebo některé plasty. Pro dělení kovů by byl zbytečně energeticky náročný, neboť vyžaduje velmi vysokou hustotu výkonu svazku.

Nejčastěji využívané je tavné řezání. Jeho princip spočívá v místním natavení materiálu po dopadu laserového svazku a následném odstranění taveniny ze vznikající spáry proudem vysokotlakého plynu přiváděného koaxiálně s laserovým svazkem, který současně ochlazuje dělený materiál. Schéma laserového řezání je na obr. 8. [1]



Obr. 8 Schéma laserového řezání[1]

Další metodou je laserové orýsování, které spočívá ve vytvoření zářezů nebo řady otvorů pomocí svazku s nízkou energií a vysokou plošnou hustotou výkonu. Mechanickým působením dojde k lomu podél laserem připravených vrypů. Metoda se používá především pro dělení křehkých a tepelně citlivých materiálů a lze ji použít i pro značení materiálů.

Pro dělení některých druhů plastů a především pak organických látek se uplatňuje tzv. studené řezání. Používají se k němu výkonové excimerové lasery, které vyzařují v ultrafialové

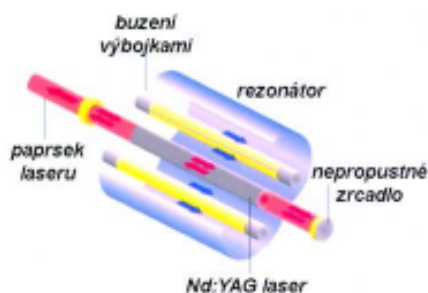
spektrální oblasti. Energie fotonů emitovaného záření dosahuje hodnot 4,9 eV, což odpovídá vazebné energii řady organických látek. Působením tohoto záření dochází k narušení mezimolekulárních vazeb. Materiál je odstraněn bez tavení a nedochází k téměř žádnému ohřevu okolí. Excimerové lasery se v průmyslu používají hlavně pro mikroaplikace a své uplatnění nalézají především v medicíně, kde se používají při operacích rohovek, odstraňování tumorů a řadě dalších chirurgických výkonů.[1]

## 2.4 Hlavní typy laserů

Hlavní dělení laserů je podle typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, způsobu buzení, výkonu, účelu a dalších parametrů.

### Pevnolátkové lasery (vybrané druhy)

- rubínový laser – aktivním prostředím je krystal generující záření o vlnové délce 0,6943  $\mu\text{m}$ . Pracuje většinou v pulzním režimu. Je vhodný pro vrtání tvrdých materiálů, v lékařství v dermatologii a v laserové lokaci družic. Nyní se nahrazuje především Nd:YAG laserem;
- Nd:sklo laser – pracuje v pulzním režimu. Používá se pro vysokoenergetické pulzní režimy práce s malou opakovací frekvencí, např. pro velké termonukleární systémy;
- Nd:YAG laser je na obr. 10 – je dnes nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru. Aktivním prostředím je krystal yttriumaluminumgranát dopovaný neodymem. Tento laser pracuje jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. Dosahuje výkonů 100 až 4 000 W. Je vhodný pro vrtání, svařování, řezání a žíhání. V lékařství se používá kontinuální Nd:YAG laser jako skalpel (v chirurgii) a pulzní Nd:YAG laser v oční mikrochirurgii. Dále pak v radarové technice a ve spektroskopii. [4]



Obr. 9 Konstrukce Nd:YAG laseru[4]

### **Kapalinové lasery**

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny, dopované ionty vzácných zemin. Pro buzení kapalinových laserů se užívá optické záření.

Použití kapalinových laserů je především ve spektroskopii. Novou aplikací je využití možnosti naladění přesné vlnové délky v medicíně – ve fotodynamické terapii, kdy se působením záření přesné vlnové délky ničí rakovinotvorný nádor předem „napuštěný“ speciálním organickým barvivem (barvivo se působením záření rozpadá a volný generovaný kyslík ničí rakovinotvorné buňky).[4]

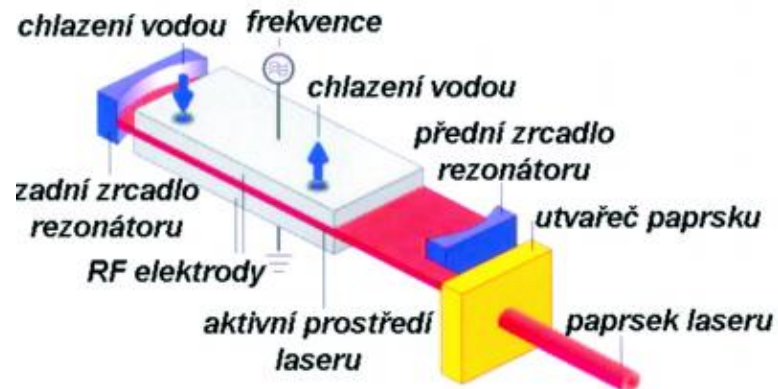
### **Plynové lasery**

Aktivní prostředí je v plynné fázi. Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu. Byly vyvinuty i lasery s mimořádně vysokým výkonem pracující v pulzním provozu. Plynové lasery je možné budit elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky. [4]

Vybrané druhy plynových laserů:

- heliumneonový laser – aktivní prostředí je tvořeno vybuzenými atomy neonu. Budí se v elektrickém výboji ve směsi plynů helia a neonu. Tento laser vyzařuje infračervené záření o vlnové délce 1,15  $\mu\text{m}$ , 3,39  $\mu\text{m}$  a 0,633  $\mu\text{m}$ . Používá se v měřicí technice, holografii a geodézii
- excimerový laser – aktivním prostředím jsou excimery. Používají se v selektivní laserové fotochemii, při technologických aplikacích (např. při popisování součástí, vrtání), v medicíně a ve fyzikálním a biologickém výzkumu

- CO<sub>2</sub> laser je na obr. 11 – aktivním prostředím jsou molekuly oxidu uhličitého. Buzení je elektrickým výbojem, který zapaluje směs plynů CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He. Používají se pro řezání, svařování, vrtání, popisování součástí, nanášení povlaků a tepelné zpracování. [4]



Obr. 10 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru[4]

### 3 PLASTY VE STROJÍRENSTVÍ

Použití plastů ve strojírenství vycházelo v minulosti zejména ze snahy nahrazovat ocel a jiné kovové materiály a to nejen kvůli jejich dobrým vlastnostem, ale hlavně z důvodu nižší ekonomické zátěži a taky možností nahrazovat nedostatkové materiály, tedy jiné než kovové. Dalšími důvody bylo snížení hmotnosti, korozní odolnost, elektrické izolační vlastnosti. Polymerní materiály lze velmi snadno zpracovávat tvářením z taveniny nebo roztoku, a proto představují rychlou a levnou výrobu předmětů hromadné spotřeby, ale i u polymerů existují jisté nedostatky. Použitelnost je omezena teplotou a tvarovou stálostí, také nejsou stejně tuhé jako materiály kovové. [5]

V posledních letech bylo možné pozorovat vedle rychlého růstu produkce i vývoj velkého množství různých nových polymerů. Se stálým růstem výroby a spotřeby polymerů se počítá i nadále. Vývoj nových polymerních materiálů vychází ze stávajících a nepředpokládá se, že by pro výrobu měli být použité nové druhy výchozích monomerů.

Materiály na bázi plastů a kompozitů, a s nimi související technologie přesvědčivým způsobem pomáhají rozvíjet obor strojírenství jako celek. Dosud největší význam mají v leteckém průmyslu (sekundární i primární kompozitové konstrukce), v automobilovém průmyslu (interiér, exteriér i pohonná jednotka) a ve výrobě plavidel všeho druhu.

Ve stále větší míře se prosazují ve stavbě chemických a energetických strojů a zařízení (součásti čerpadel, odsiřovacích jednotek apod.) a v konstrukci výrobních strojů (např. včetně obráběcích strojů). Polymerní a kompozitní materiály umožňují dosáhnout nejen základního požadavku společného pro téměř všechny aplikace, tj. snížení hmotnosti, ale umožňují i mnohem větší "svobodu konstruování" a tím i lepší podmínky pro inovace. [5]

#### 3.1 Dělení plastů

Vycházíme-li z praktického způsobu členění plastů pro strojírenskou konstrukci, lze je rozdělit komoditní plasty, konstrukční plasty, které jsou dražší, ale mají lepší mechanické vlastnosti a drahé speciální plasty. Ekonomická hlediska preferují levné plasty široké spotřeby tedy komoditní plasty. Zde je příklad některých plastů. [5]

- speciální plasty – PPS, PEEK, PA 11, PA 12
- konstrukční plasty – PA 6, PA 66, PC, PBT, POM, SAN, ABS, PMMA, (PP, PETP)
- komoditní plasty – HDPE, PET, LDPE, PVC, PS, PP, LLDPE

## 3.2 Výroba a vlastnosti vybraných termoplastů

### Polymethylmetakrylát-PMMA

Polymethylmetakrylát se může vyrábět dvěma způsoby. Blokovou polymerací nebo suspenzní polymerací metylmetakrylátu. Oba způsoby vedou k čirým materiálům. Blokovaná polymerace slouží na výrobu bloků a desek.

Charakteristickou vlastností PMMA je jeho čírost a naprostá bezbarvost i v tlustých vrstvách. To umožňuje nejen jeho dokonalou průhlednost, ale i snadné vybarvení. Svou odolností předčí všechny běžné termoplasty. PMMA je i při teplotách kolem 135°C kaučukovitý a snadno tvarovatelný. Má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolává vodě, ale i zředěným kyselinám. Neodolává koncentrovanějším kyselinám a ani zásadám. Tepelná odolnost v nezátíženém stavu je kolem 80°C. Jeho nedostatkem je nízká povrchová tvrdost, koroze za napětí a hořlavost. PMMA je relativně drahý plast a řadí se mezi konstrukční plasty. Uplatňuje se všude tam, kde se hodí využití jeho vlastností např. při zasklívání oken dopravních prostředků, při výrobě krytů přístrojů, kancelářských potřeb atd.

Modul pružnosti v tahu je vysoký a pohybuje se mezi 3000-3300 MPa. Pevnost v tahu je mezi 70 MPa -80 MPa. [3]

### Polypropylen-PP

Polypropylen se vyrábí radikálovou nebo kationovou polymerací propylenu. Vzhledem ke své krystalické stavbě je neprůhledný. Dobře odolává vroucí vodě a sterilizaci vodní párou. Jeho tepelná použitelnost je krátkodobě do 135°C a dlouhodobě do 100°C. Je odolný vůči korozi za napětí, nenavlhá, dá se dobře barvit, má dobré dielektrické vlastnosti. PP má výhodnou kombinaci ceny a užitných vlastností, v poslední době je nárůst spotřeby v důsledku nových kopolymerů a kompozitů, ale má také nevýhody. Podléhá oxidaci, pod bodem mrazu homopolymer křehne, je hořlavý a nedá se lepit. Vzhledem k tomu že se řadí mezi běžně používané plasty lze jej s výhodou uplatnit v obalové technice, při výrobě různých fólií, nárazníků, bubnů a krytů praček, injekční stříkačky aj.

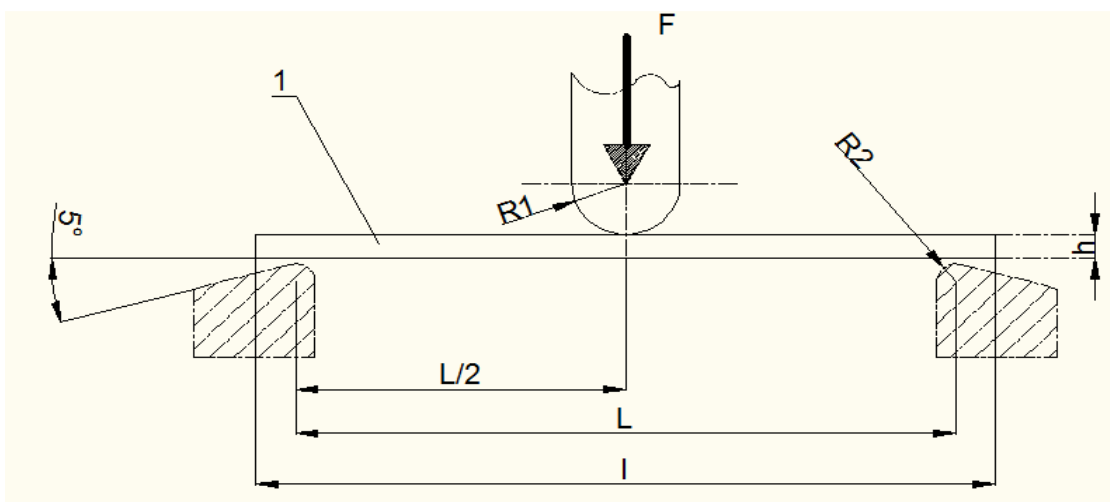
Je středně pevný a tuhý, jeho modul pružnosti se pohybuje od 1100 MPa do 1600 MPa a pevnost v tahu od 20 Mpa do 40 MPa. [3]

## 4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU

### 4.1 Zkouška ohybem

Metoda se používá ke zjišťování chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstatou této zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítláčným trnem uprostřed jejich rozpětí.

Metoda je vhodná pro termoplasty a reaktoplasty. Při zkoušce se zkušební tyč obdélníkového průřezu položí na dvě opory a je konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se zkušební těleso nerozloží na svém vnějším povrchu nebo dokud deformace nedosáhne maximální hodnoty 5 %, podle toho, který případ nastane dřív. V průběhu zkoušky se sleduje průhyb zkoušeného tělesa uprostřed mezi podpěrami a síla, která na toto těleso působí. [6]



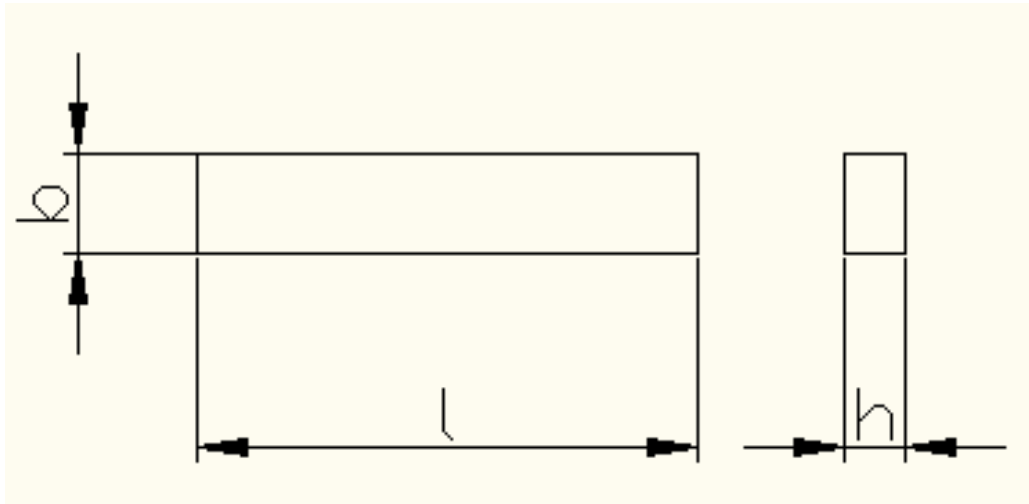
Obr. 11 Poloha zkušebního tělesa na začátku zkoušky

Legenda:

L – rozpětí mezi podpěrami; l – délka zkušebního tělesa; h – tloušťka zkušebního tělesa; R1 – poloměr zatěžovacího trnu; R2 – poloměr podpěr; F – použitá síla; 1 – zkušební těleso [6]

### Tvar a rozměry zkušební tělesa

Tvar a rozměry zkušební tělesa jsou definované podle normy v mm. Na obr. 12 je zkušební těleso, se kterým se bude pracovat.



Obr. 12 Zkušební těleso

### Výpočet a vyjadřování výsledků

#### Napětí v ohybu

Napětí v ohybu se vypočítá z rovnice:

$$\sigma_t = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

kde

$\sigma_t$  – příslušné napětí v ohybu

F – použitá síla, v N

L – rozpětí, v mm

b – šířka zkušební tělesa, v mm

h – tloušťka zkušební tělesa, v mm [6]



### Deformace ohybem

Deformace ohybem se vypočítá z rovnic:

$$\varepsilon_t = \frac{6sh}{L^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{600sh}{L^2} \quad (3)$$

kde

$\varepsilon_t$  – příslušná deformace ohybem, vyjádřená jako bezrozměrné číslo nebo v procentech

$s$  – průhyb, v mm

$h$  – tloušťka zkušebního tělesa, v mm

$L$  – rozpětí, v mm [6]

### Modul pružnosti

Pro stanovení modulu pružnosti v ohybu se vypočítají průhyby  $s_1$  a  $s_2$  odpovídající daným hodnotám deformace ohybem  $\varepsilon_{f1} = 0,0005$  a  $\varepsilon_{f2} = 0,00025$  podle vztahu:

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \quad (i = 1 \text{ nebo } 2) \quad (4)$$

kde

$s_i$  – je jeden z průhybů, v mm

$\varepsilon_{fi}$  – odpovídající deformace ohybem, jejichž hodnoty  $\varepsilon_{f1}$  a  $\varepsilon_{f2}$  jsou uvedeny výše

$L$  – rozpětí, v mm

$H$  – tloušťka zkušebního tělesa, v mm [6]

Modul pružnosti v ohybu  $E_1$ , v MPa, se vypočítá z rovnice:

$$E_1 = \frac{\sigma_{12} - \sigma_{11}}{\varepsilon_{12} - \varepsilon_{11}} \quad (5)$$

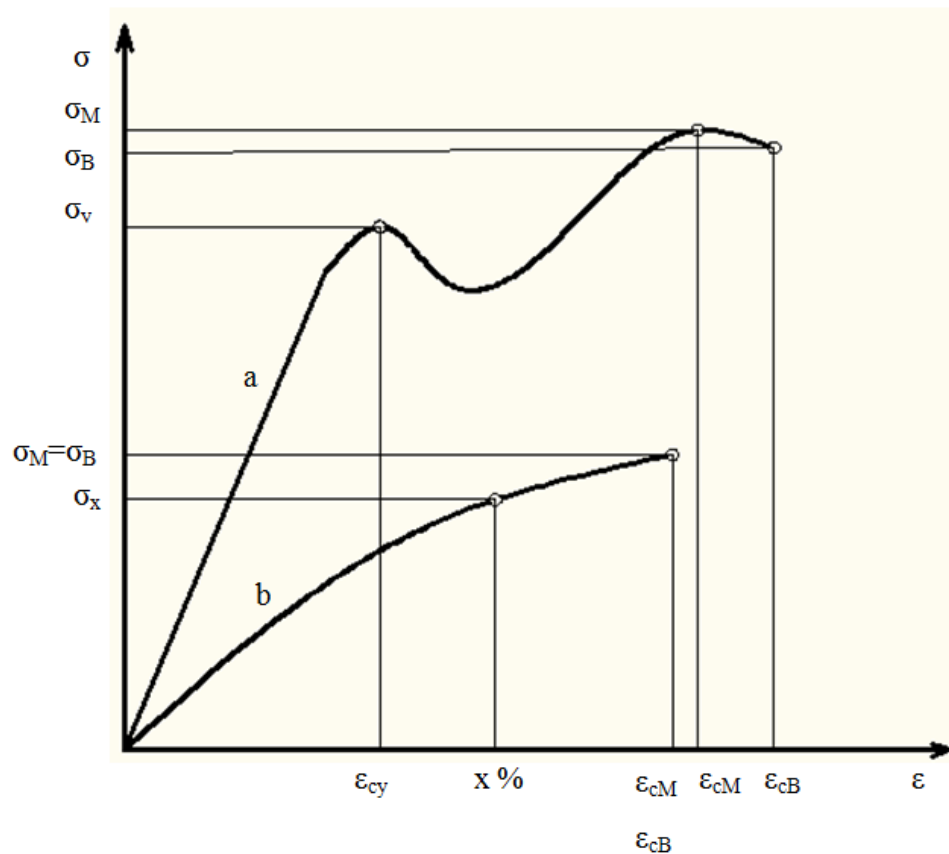
kde

$\sigma_{11}$  – je napětí v ohybu, v MPa, měřené při průhybu  $s_1$ ;

$\sigma_{12}$  – je napětí v ohybu, v MPa, měřené při průhybu  $s_2$ . [6]

## 4.2 Zkouška tlakem

Metoda se používá ke zkoumání chování zkušebních těles při namáhání tlakem a ke stanovení meze pevnosti v tlaku, modulu pružnosti v tlaku a dalších možných charakteristik závislosti síla/poměrné stlačení za definovaných podmínek. Podstatou této zkoušky je stlačování zkušebního tělesa podél hlavní osy stálou rychlostí do porušení tělesa nebo do okamžiku, kdy zatížení nebo zkrácení dosáhne definované hodnoty. Měří se zatížení, které působí na zkušební těleso. Metoda je vhodná pro tuhé a polotuhé termoplasty, dále pak pro tuhé a polotuhé reaktoplasty. V průběhu zkoušky se stanovuje síla (napětí) a odpovídající stlačení (poměrné stlačení) zkušebního tělesa. Přednostně se má použít systém s automatickým záznamem, který poskytuje úplnou křivku napětí v tlaku/poměrné stlačení.[7]



Obr. 13 Typické křivky napětí v tlaku/poměrné stlačení

Legenda:

$\sigma$  – napětí v tlaku;  $\sigma_M$  – mez pevnosti v tlaku;  $\sigma_B$  – napětí v tlaku při porušení;  $\sigma_y$  – napětí na mezi kluzu v tlaku;  $\sigma_x$  – napětí v tlaku při x % poměrném stlačení;  $\epsilon$  – poměrné stlačení;  $\epsilon_{cy}$  – jmenovité poměrné stlačení na mezi kluzu v tlaku;  $\epsilon_{cM}$  – jmenovité poměrné stlačení na mezi pevnosti v tlaku;  $\epsilon_{cB}$  – jmenovité poměrné stlačení při porušení [7]

### Tvar a rozměry zkušebního tělesa

Tvar tělesa může mít podobu přímého pravoúhlého hranolu nebo přímého válce či trubky.

Rozměry zkušebních těles musí splňovat nerovnici:

$$\varepsilon \leq 0,4 \frac{x^2}{l^2} \quad (6)$$

kde

$\varepsilon$  – je největší jmenovité poměrné stlačení během zkoušky vyjádřené jako bezrozměrný poměr

$l$  – je délka zkušebního tělesa měřená rovnoběžně s osou tlakové síly

$x$  – podle tvaru tělesa se jedná buď o průměr válce nebo vnější průměr trubky nebo tloušťku hranolu (nejkratší strana průřezu) [7]

### Výpočet a vyjádření výsledků

#### Napětí v tlaku

Všechny hodnoty napětí v tlaku se vypočtou podle následující rovnice:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

kde

$\sigma$  – je hodnota daného napětí v tlaku vyjádřená v MPa

$F$  – příslušná naměřená hodnota síly vyjádřená v N

$A$  – počáteční plocha průřezu zkušebního tělesa vyjádřená v mm<sup>2</sup>[7]

#### Poměrné stlačení (z měření extenzometrem)

Hodnoty poměrného stlačení se vypočtou z následujících rovnic:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (8)$$

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{\Delta L_0}{L_0}, v \% \quad (9)$$

kde

$\varepsilon$  – je příslušné poměrné stlačení vyjádřené jako bezrozměrný poměr (rovnice 8) nebo v procentech (rovnice 9)

$L_0$  – počáteční měřená délka zkušebního tělesa vyjádřená v mm

$\Delta L_0$  – zkrácení délky zkušebního tělesa mezi značkami vyjádřené v mm [7]

### Jmenovité poměrné stlačení (z pohybu tlačných desek)

Hodnoty jmenovitého poměrného stlačení se vypočtou z následujících rovnic:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L}{L} \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = 100 \cdot \frac{\Delta L}{L}, v \% \quad (11)$$

kde

$\varepsilon_0$  – je příslušné jmenovité poměrné stlačení jako bezrozměrný poměr (rovnice 10) nebo v procentech (rovnice 11)

$L$  – počáteční vzdálenost mezi tlačnými deskami vyjádřená v mm

$\Delta L$  – zkrácení vzdálenosti mezi tlačnými deskami vyjádřené v mm [7]

### Modul pružnosti v tlaku

Modul pružnosti v tlaku se vypočte z rovnice:

$$E_0 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (12)$$

kde

$E_0$  – je modul pružnosti v tlaku vyjádřený v MPa

$\sigma_1$  – je napětí v tlaku naměřené při hodnotě poměrného stlačení  $\varepsilon_1 = 0,0005$

$\sigma_2$  – je napětí v tlaku naměřené při hodnotě poměrného stlačení  $\varepsilon_2 = 0,0025$  [7]

## 5 CÍL PRÁCE

Z desky PMMA se za pomoci CO<sub>2</sub> laseru se vypálí dostatečný počet normou definovaných zkušebních tělísek, která budou vypálena různými řeznými podmínkami, při různých výkonech a různých posuvových rychlostech. Mechanické zkoušky budou provedeny na univerzálním trhacím stroji ve školní laboratoři. Zkušební tělíska se pomocí univerzálního trhacího stroje vyzkouší na ohyb. Touto metodou se bude zjišťovat vliv laserového paprsku na modul pružnosti a poměrnou deformaci v ohybu v závislosti na jiném nastavení výkonu a rychlosti posuvu laserového paprsku.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 POPIS A PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

Pro vyřezání zkušebních tělísek a jejich vyzkoušení na ohyb byla využita zařízení ze školní laboratoře – CO<sub>2</sub>laser ILS 3NM, pro vyřezání zkušebních vzorků a univerzální trhací stroj ZWICK ROELL 1456, pro ohybovou zkoušku.

### 6.1 Laserová tiskárna ILS 3NM

Laserový systém ILS 3NM je zařízení vhodné pro značení, gravírování a řezání různých druhů materiálů, jako jsou plasty, pryž, sklo, dřevo, kov, keramika aj. Zdrojem laserového záření je CO<sub>2</sub>. Zařízení má připravený pojezdový stůl a otevírací čelní dvířka, která slouží pro značení nekonečných desek. Laser se ovládá pomocí softwaru Corel Draw nebo pomocí AutoCAD. K počítači se laser připojuje stejně jako tiskárna. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce 1.



*Obr. 14 Laser ILS 3NM ve školních dílnách*

Tab. 1 Technické parametry laserové tiskárny ILS 3NM

<b>Laser ILS 3NM</b>	
Výkon	100W
Vnější rozměry	900(D) x 865(H) x 990(V) mm
Pracovní pole	660 x 495 x 210(V) mm
Rozlišení	1000, 500, 333, 250, 200, 166 DPI
Řízení rychlosti posuvu	Nastavitelné od 1 do 1524 mm/sec
Řízení výkonu laseru	Nastavitelné od 0 do 100% výkonu
Nastavení ohniskové vzdálenosti	Automatické
Operační módy	Rastrové gravírování , vektorové řezání
Komunikační rozhraní	USB, LPT1, LAN
Integrovaná paměť	64 MB – max. 99 souborů
Displej zobrazuje	seznam vzorů, síla laseru, gravírovací rychlost, čas průběhu, načtené soubory, nastavení a diagnostiku stroje
Napájení	~110 / ~240 V
Chlazení	Vzduchové



## 6.2 Univerzální zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Zařízení umožňuje tři základní zkoušky – tahem, tlakem a ohybem. Pro ovládání a ukládání naměřených dat slouží počítač, který je součástí zařízení. Pracuje se softwarem Test Xpert. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.



*Obr. 15 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456*

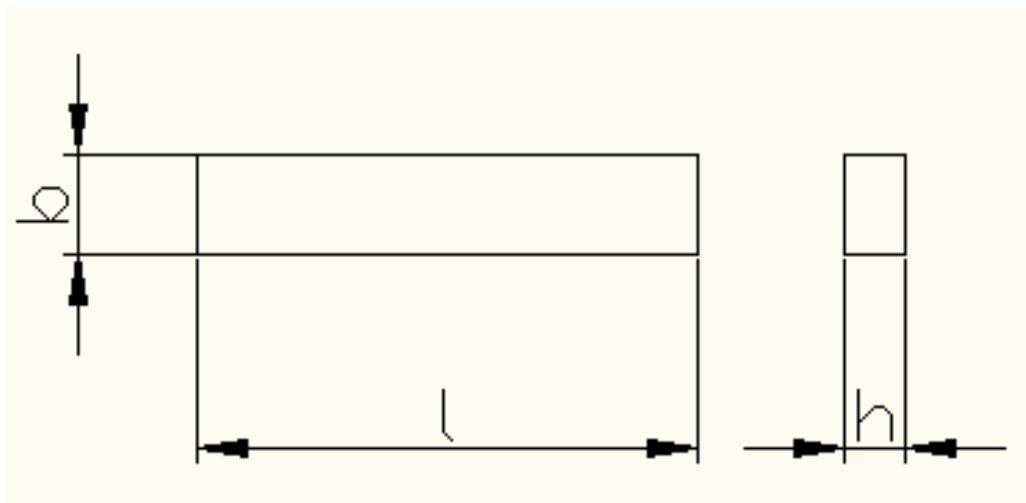
Tab. 2 Technické parametry univerzálního trhačního stroje

<b>ZWICK ROELL 1456</b>	
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg
Maximální zkušební síla	20 kN
Maximální rychlost posuvu příčnicku	750 mm.min <sup>-1</sup>
Extenzometry měření protažení	macro přídavný
Vyhodnocovací software	master-tah  standard-ohyb a tlak  standardní cyklické zkoušky

## 7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Zkušební tělíška byla vypálena pro zkoušku ohybem z běžně dostupného konstrukčního materiálu PMMA ve formě desky. Pro objektivnější hodnocení dosažených výsledků byla vyrobena další tělíška pomocí vstřikování. Rozměr a tvar zkušebního tělíška definuje norma ČSN EN ISO 178. Takto připravená zkušební tělesa musejí být zkontrolována, aby nebyla zkroucená a měla povrch bez škrábanců, vrypů, prohlubenin, propadlin, přetoků a jiných viditelných vad, které by mohli způsobit nepřesnosti ve výsledcích měření. [6]

Tělesa byla vytvořena pomocí programu AutoCAD, kde podle normy ČSN EN ISO 178 byl zvolen přednostní typ zkušebního tělesa podle obrázku 16.



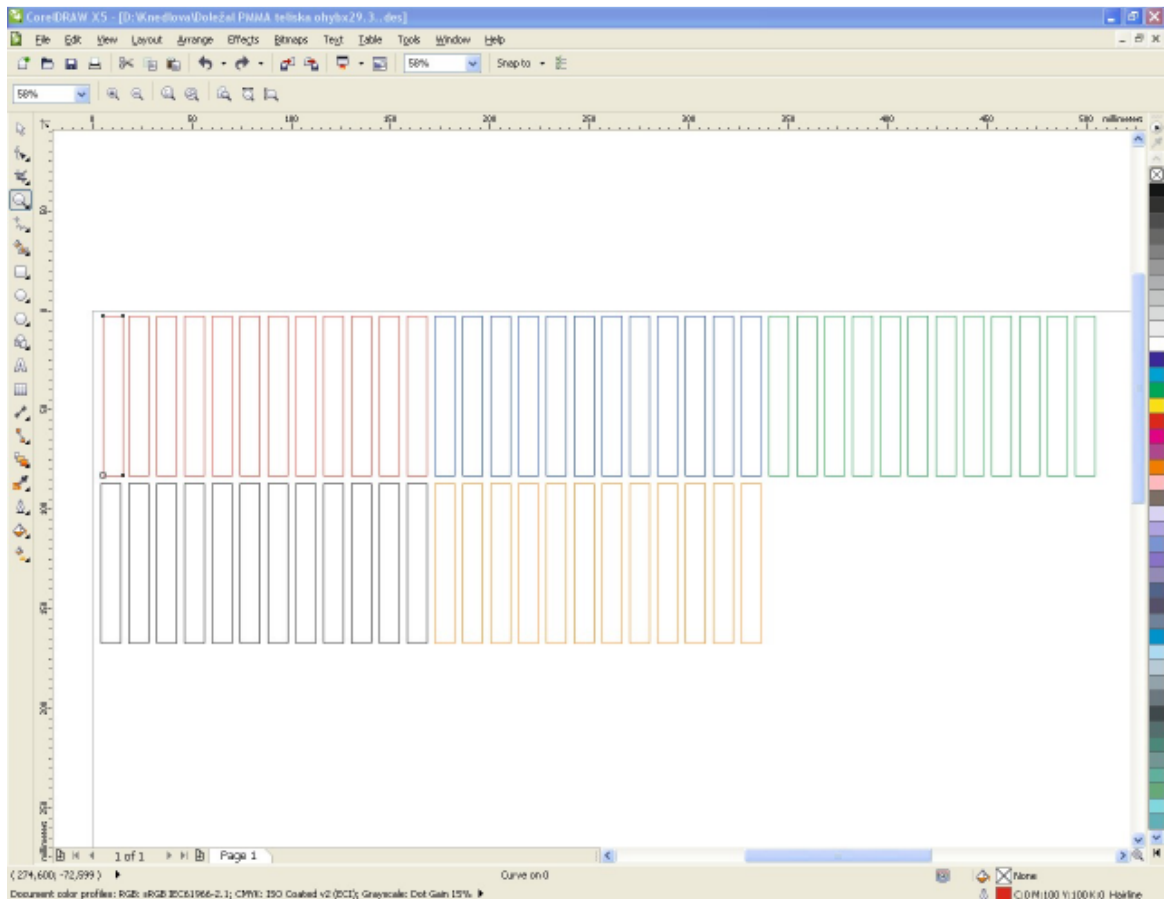
Obr. 16 Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku ohybem

Rozměry zkušebního tělesa jsou vyhotoveny dle tabulky 3.

Tab. 3 Rozměry zkušebního tělesa pro tlakovou zkoušku

Zkušební těleso		
Rozměry v (mm)		
b	šířka	$10 \pm 0,2$
l	délka	$80 \pm 2$
h	tloušťka	$4 \pm 0,2$

Zkušební tělesa byla vypálena ve školní laboratoři na laseru ILS 3NM, který se ovládá pomocí počítače a programu Corel Draw. Před vypálením bylo nutné nakreslit tělesa v programu AutoCAD, uložit je ve formátu dxf a následně otevřít v programu Corel Draw nebo v případě jednoduchých nákresů využít přímo kreslicí prostředí Corel Draw.

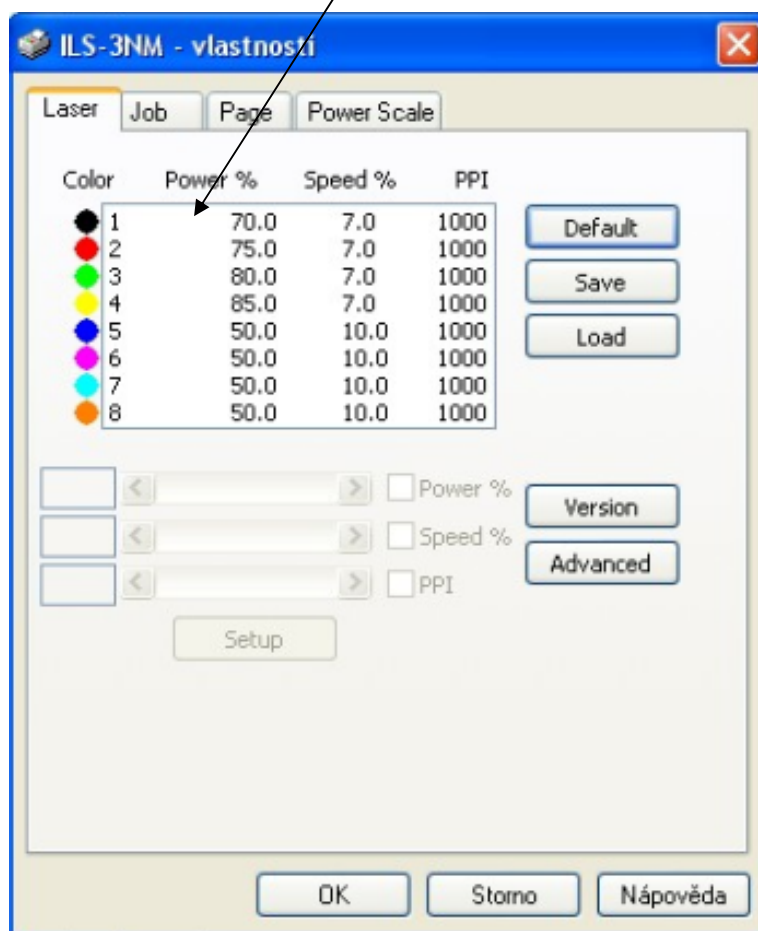
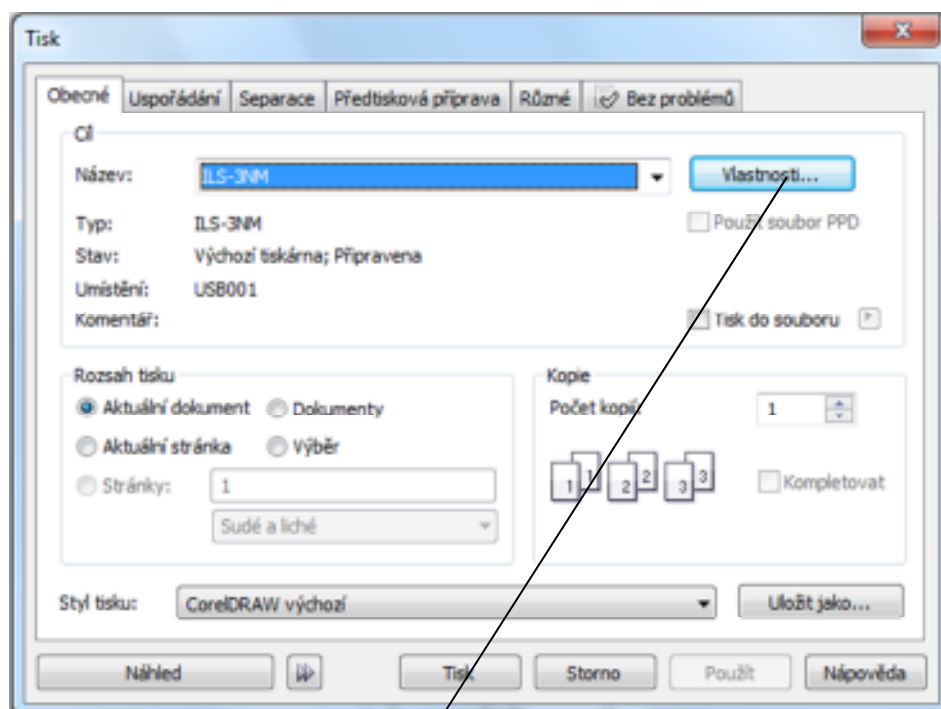


*Obr. 17 Importované zkušební tělesa do CorelDraw*

V Corel Draw je třeba mít nadefinovanou pracovní plochu, která by měla odpovídat velikosti tiskové plochy laseru tj. 495 mm x 660 mm. Pak je možné importovat tělesa. Importovaná tělesa musí tvořit uzavřené křivky, aby byla vyřezána souvislým řezem (jedním tahem). Jinak by laser vyřezával jednotlivé úseky rozdělené do čar, což by vedlo k chladnutí materiálu v jednotlivých úsecích a mohly by tak vznikat nežádoucí vruby.

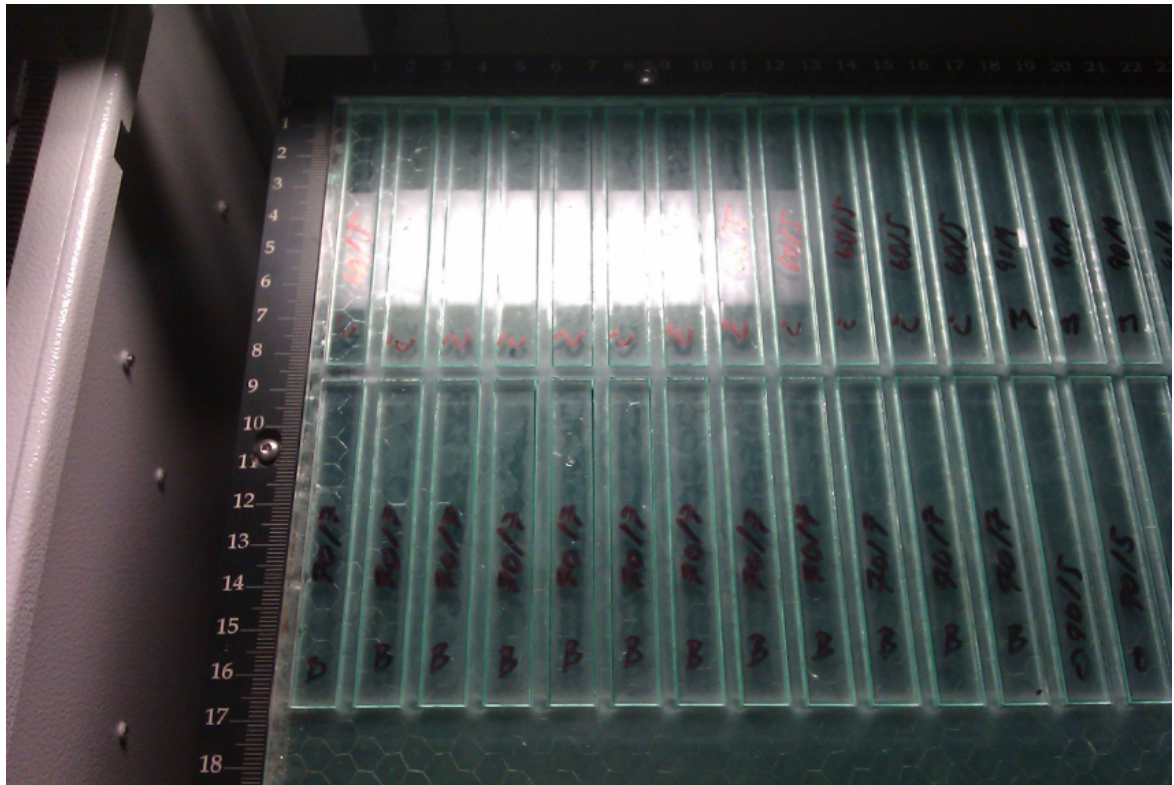
K propálení daného materiálu je třeba zvolit vhodné řezné podmínky do tabulky, kde se nachází nastavení výkonu laseru v % a také rychlost posuvu v % (viz tabulka 1). Pro každou barvu je možné zvolit jiné řezné podmínky.

Tyto parametry lze zadat ve vlastnostech pro tisk, protože laser se chová jako tiskárna.



Obr. 18 Nastavení rezných podmínek laseru

Po nastavení parametrů laseru se musí provést kalibrace laseru a fokusace čočky podle přiloženého návodu ke stroji. Po té může být odeslán příslušný soubor pro vypálení, vyzkouší se nejprve na nečisto, pro případné odhalení nedostatků (např. špatné vložení materiálu). Na obrázku jsou vidět již vypálená tělesa.



Obr. 19 Vypálená zkušební tělesa na ILS 3NM

## 8 PROVEDENÍ OHYBOVÉ ZKOUŠKY

K vyhodnocení výsledků byl využit program MINITABs použitím vztahů statického vyhodnocování:

- Aritmetický průměr  $\bar{x}$  – hodnotapopisující soubor mnoha hodnot. Je to součet všech hodnot vydělený jejich počtem.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

- Medián M – polovina hodnot výběrového (základního) souboru leží pod resp .nad mediánem. Soubor je však nutno uspořádat vzestupně (sestupně). V souborech o sudém počtu členů je za medián považována hodnota v půli intervalu mezi dvěma prostředními hodnotami.
- Směrodatná odchylka s – průměrná hodnota, o kterou se průměrně liší naměřené hodnoty od aritmetického průměru.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

- Nejistota typu A  $u_A$  – způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Tyto nejistoty se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšují.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

- Variační rozpětí R – rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou výběrového (základního) souboru.
- Minimum  $x_{\min}$  – minimální hodnota z naměřených dat
- Maximum  $x_{\max}$  – maximální hodnota z naměřených dat

Ohybová zkouška byla provedena ve školní laboratoři na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456. Měření probíhalo při teplotě 22°C. Zkušební tělesa obdélníkového průřezu byla konstantní rychlostí prohýbána uprostřed rozpětí podpor tak dlouho, dokud se zkušební tělesa nezlomila. V průběhu tohoto postupu byla měřena síla působící na zkušební tělesa a také výsledný průhyb zkušebních těles uprostřed mezi podpěrami. Rychlost posuvu čelistí byla nastavena na 10 mm.min<sup>-1</sup> a předzatížení 2 N. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny počítačem, který naměřená data jednotlivých sérií vyhodnotil a graficky znázornil v grafech.

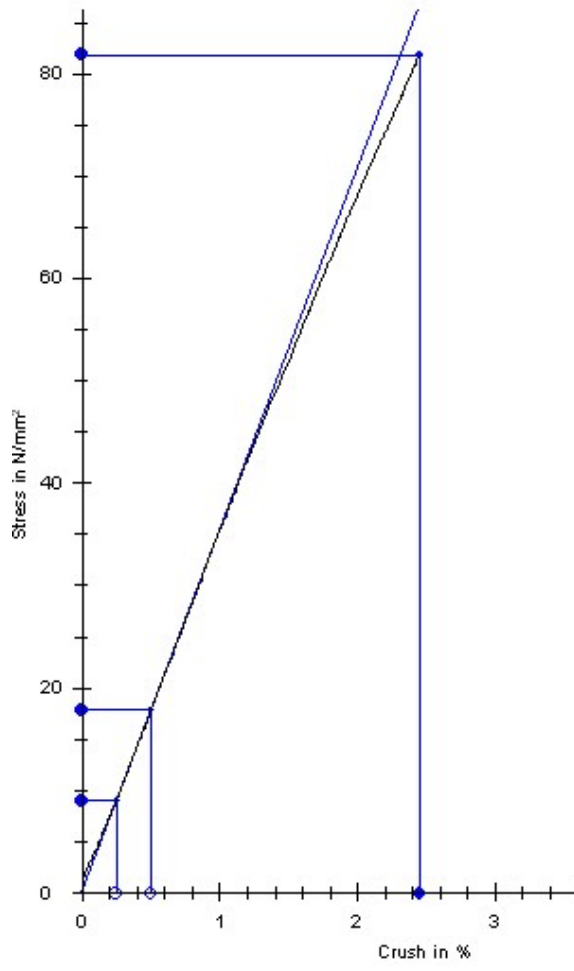


*Obr. 20 Podpěry a zátěžovací trn stroje ZWICK ROELL 1456*



## 8.1 Vypálené vzorky

Měření 1-12: Zkušební tělesa z materiálu PMMA, vypálená laserem o výkonu 70 % a posuvu 7 %.



Obr. 21 Zkouška ohybem při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %



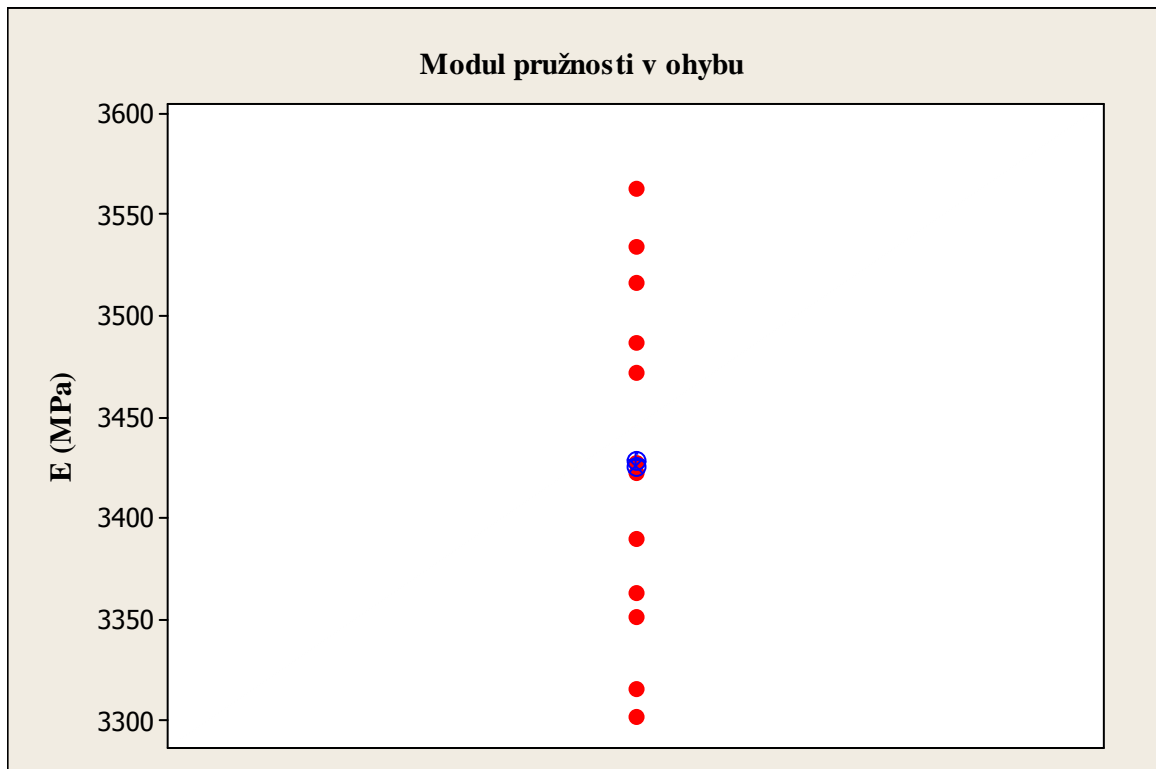
Obr. 22 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %

Tab. 4 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %

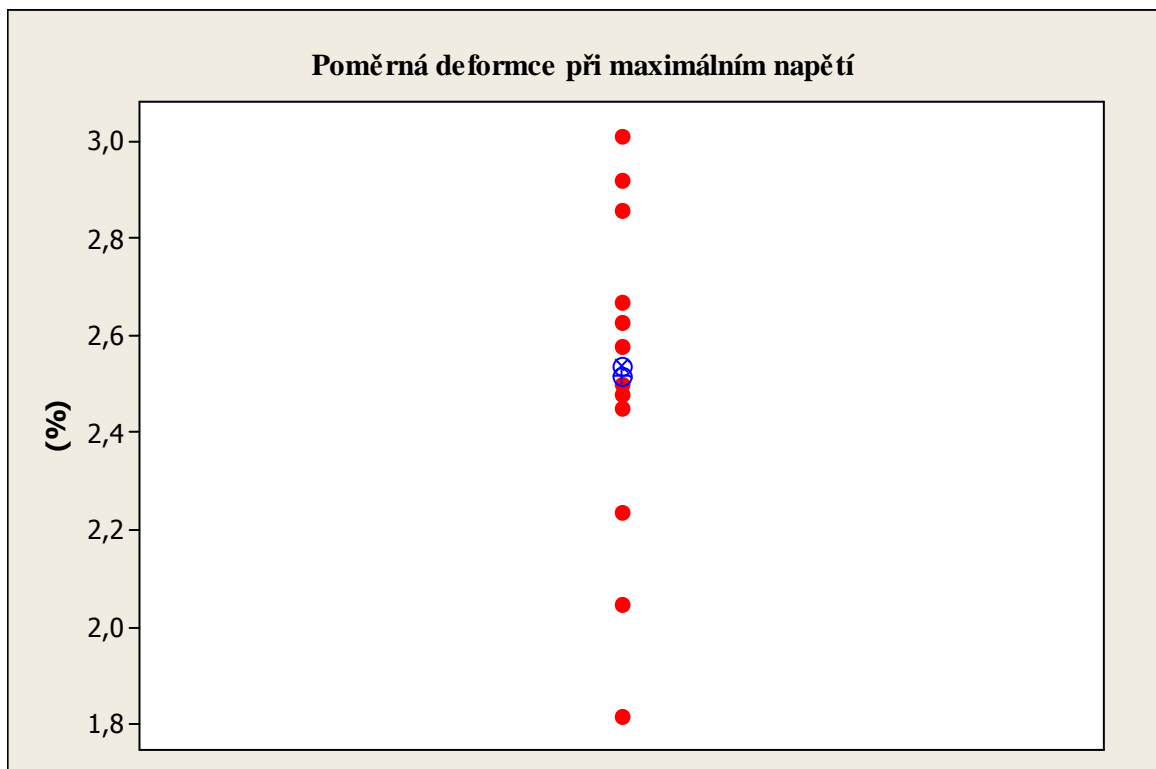
n	h (mm)	b (mm)	R <sub>m</sub> (Mpa)	ε(%)	s (mm)	F <sub>max</sub> (N)	E (MPa)
1	3,99	9,84	70,96	2,05	3,5	115,8	3472,32
2	4	9,84	84,59	2,5	4,27	138,72	3563,32
3	4	9,86	86,81	2,67	4,56	142,66	3423,02
4	4	9,87	95,05	3,01	5,14	156,36	3302,59
5	4	9,91	81,81	2,45	4,18	135,12	3534,88
6	4	9,84	74,08	2,24	3,82	121,49	3351,79
7	4	9,87	62,06	1,82	3,11	102,1	3516,96
8	4	9,85	91,51	2,86	4,88	150,23	3316,26
9	4	9,86	84,23	2,58	4,4	138,41	3364,26
10	4	9,9	93,69	2,92	4,99	154,58	3487,42
11	4	9,84	86,14	2,63	4,49	141,26	3428,69
12	3,99	9,89	81,72	2,48	4,26	134,03	3390,36

Tab. 5 Vyhodnocení naměřených hodnot

n=12	R <sub>m</sub> (MPa)	ε(%)	s (mm)	E (MPa)	F <sub>max</sub> (N)
x	82,72	2,52	4,30	3429,32	135,90
s	9,24	0,34	0,57	82,99	15,33
M	84,41	2,54	4,335	3425,86	138,57
u <sub>a</sub>	2,69	0,097	0,17	23,96	4,43
R	32,99	1,19	2,03	260,73	54,26
x <sub>min</sub>	62,06	1,82	3,11	3302,59	102,1
x <sub>max</sub>	95,05	3,01	5,14	3563,32	156,36

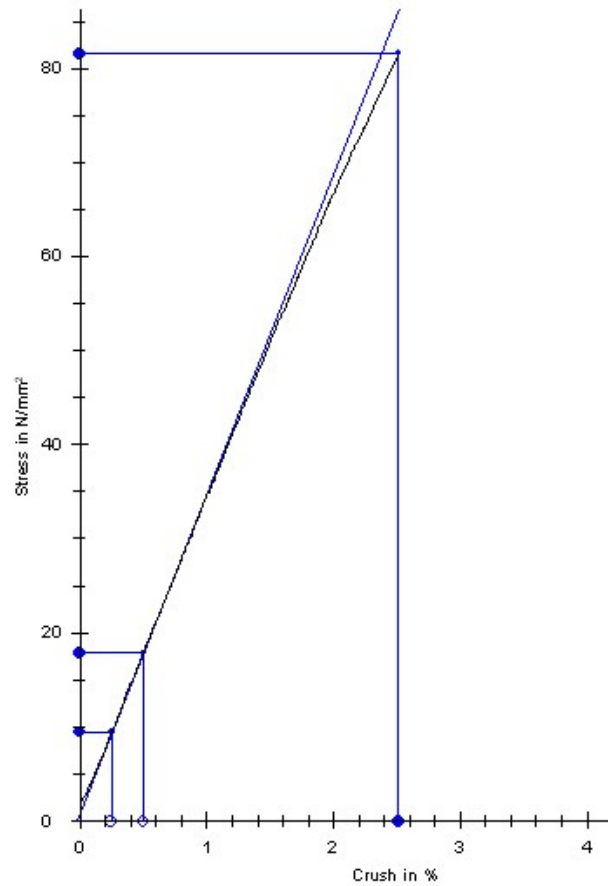


Obr. 23 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %



Obr. 24 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %

Měření 12-24: Zkušební tělesa z materiálu PMMA, vypálená laserem o výkonu 60 % a posuvu 5 %.



Obr. 25 Zkouška ohybem při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %



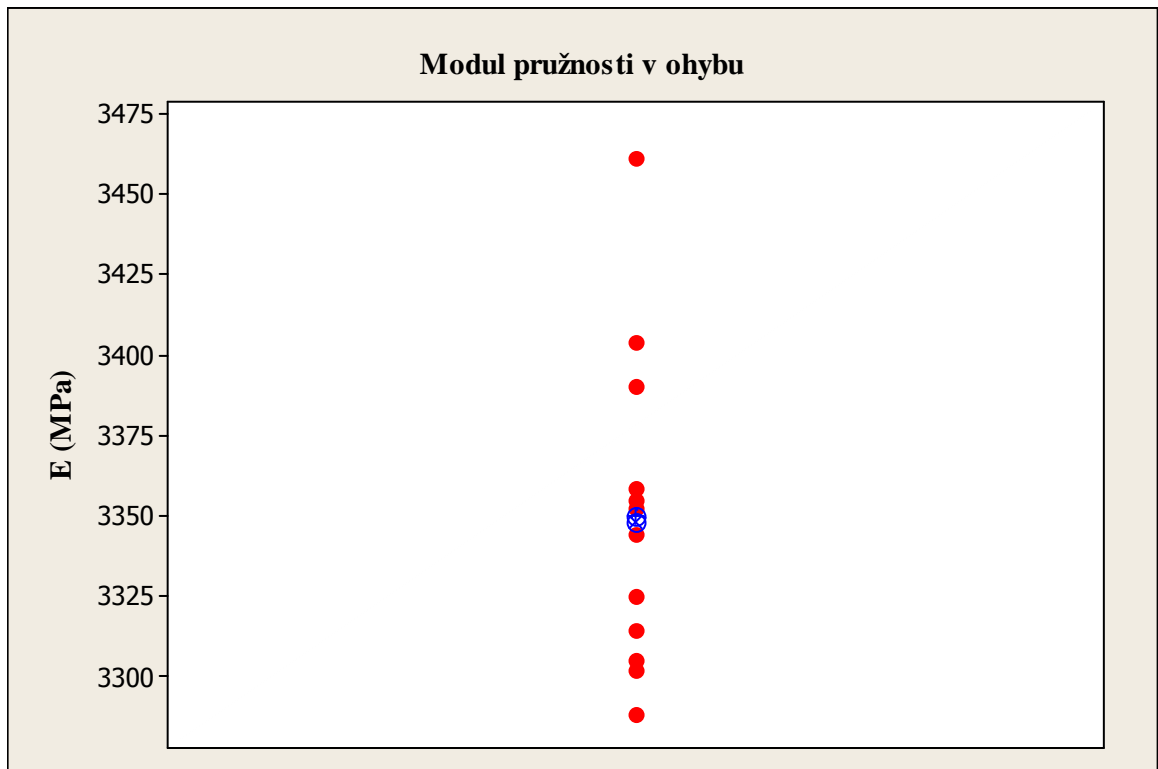
Obr. 26 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %

Tab. 6 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %

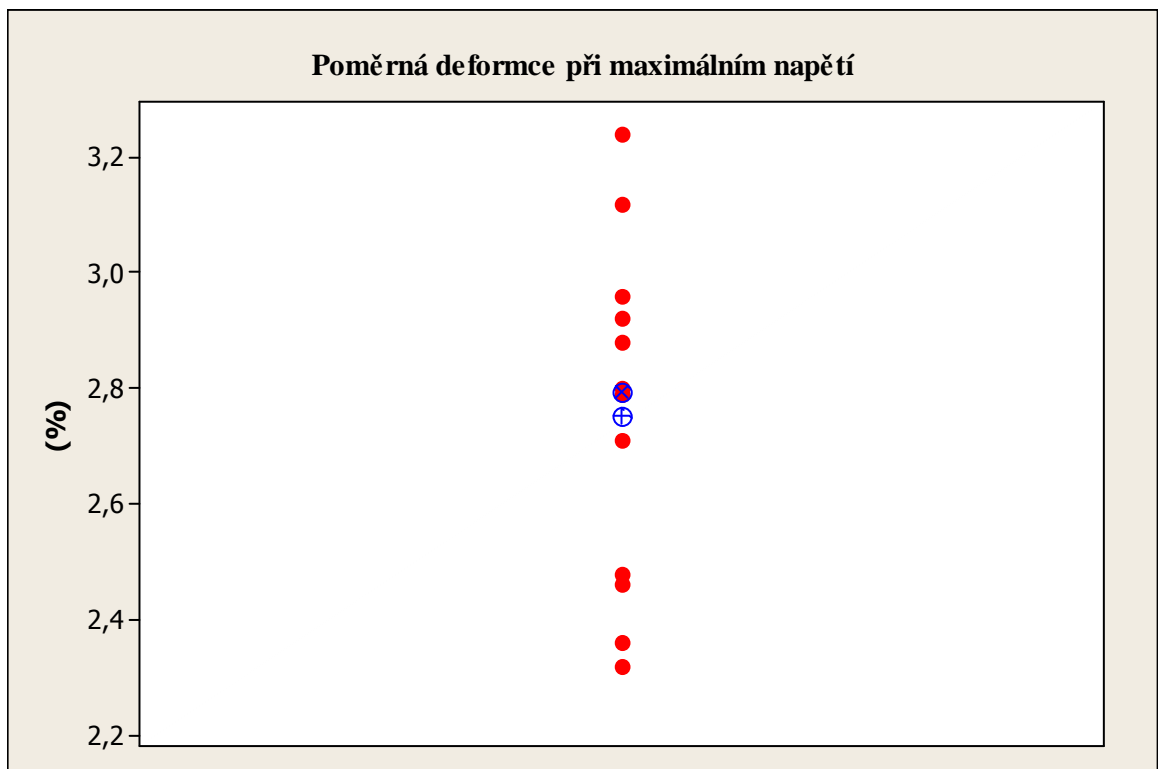
n	h (mm)	b (mm)	R <sub>m</sub> (MPa)	ε (%)	s (mm)	F <sub>max</sub> (N)	E (MPa)
1	3,99	9,89	81,72	2,48	4,26	205,97	3390,36
2	3,99	9,81	82,28	2,46	4,22	141,26	3461,37
3	4	9,83	91,76	2,88	4,92	134,03	3352,37
4	4	9,87	101,26	3,24	5,53	133,85	3288,5
5	4	9,83	91,32	2,8	4,77	150,33	3354,97
6	4	9,87	98,28	3,12	5,33	166,57	3314,48
7	4	9,89	77,63	2,36	4,03	149,61	3358,73
8	4	9,81	92,74	2,92	4,99	161,67	3403,75
9	4	9,85	94,58	2,96	5,05	127,96	3302,25
10	4	9,86	90,48	2,79	4,77	151,64	3305,29
11	4	9,91	86,1	2,71	4,62	155,27	3325,08
12	3,98	9,88	76,22	2,32	3,97	141,49	3344,48

Tab. 7 Vyhodnocení naměřených hodnot

n=12	R <sub>m</sub> (MPa)	ε (%)	s (mm)	E (MPa)	F <sub>max</sub> (N)
x	<b>88,70</b>	2,75	4,71	<b>3350,14</b>	151,64
s	7,61	0,28	0,48	47,44	19,77
M	90,90	2,80	4,77	3348,43	149,97
u <sub>a</sub>	2,20	0,08	0,14	13,69	5,71
R	25,04	0,92	1,56	172,87	78,01
x <sub>min</sub>	76,22	2,32	3,97	3288,50	127,96
x <sub>max</sub>	101,26	3,24	5,53	3461,37	205,97

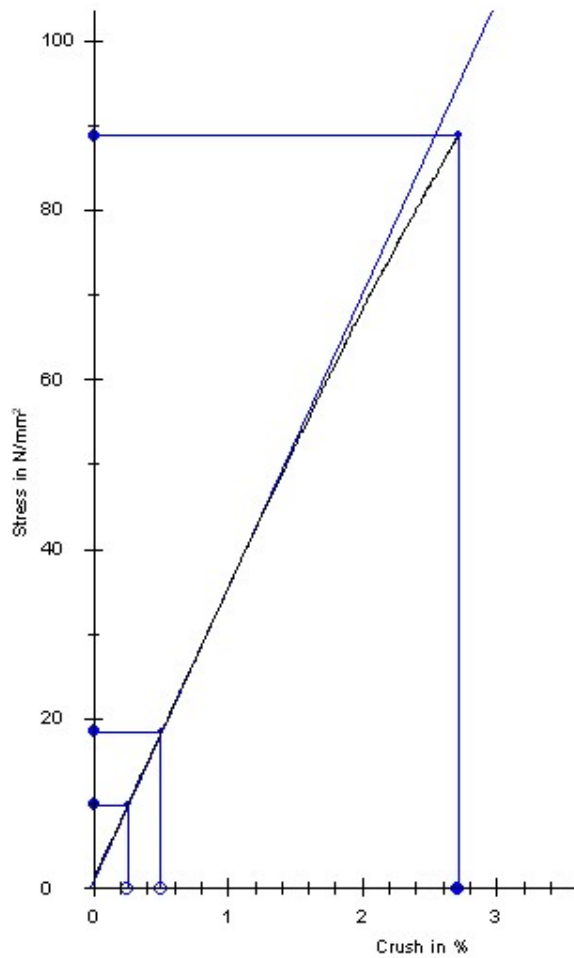


Obr. 27 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %



Obr. 28 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %

Měření 24-36: Zkušební tělesa z materiálu PMMA, vypálená laserem o výkonu 50 % a posuvu 5 %.



Obr. 29 Zkouška ohybem při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %



Obr. 30 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %

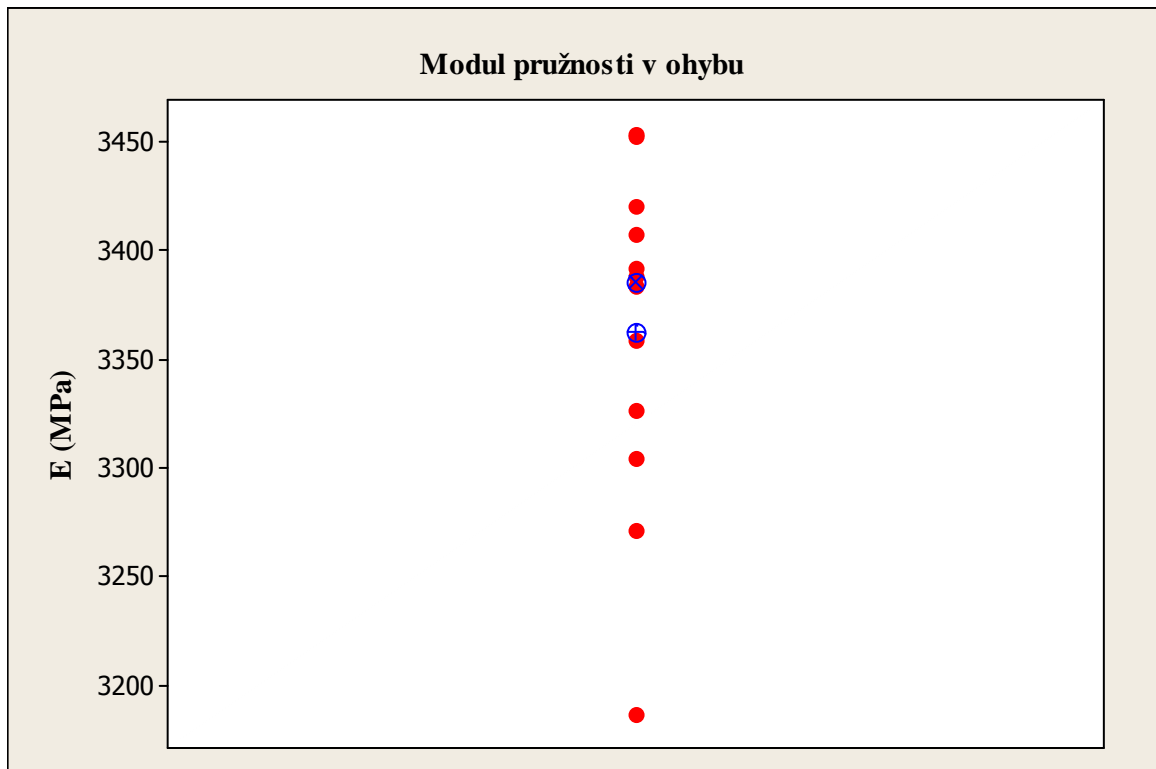
Tab. 8 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %

n	h (mm)	b (mm)	R <sub>m</sub> (Mpa)	ε (%)	s (mm)	F <sub>max</sub> (N)	E (MPa)
1	4	9,85	81,58	2,52	4,29	126,15	3388,74
2	3,97	9,85	88,81	2,72	4,67	148,69	3452,6
3	3,97	9,89	97,46	3,14	5,39	142,21	3305,2
4	3,99	9,84	86,71	2,76	4,72	124,26	3187,43
5	3,97	9,85	82,35	2,51	4,32	133,93	3420,19
6	3,98	9,88	87,87	2,67	4,58	143,62	3407,81
7	3,97	9,87	81,15	2,46	4,23	158,25	3326,39
8	3,97	9,82	91,48	2,8	4,81	141,49	3453,39
9	3,98	9,84	94,47	3,04	5,21	133,17	3272,1
10	3,98	9,85	93,78	2,91	5,01	143,24	3359,36
11	3,97	9,84	84,22	2,6	4,47	132,52	3392,37
12	3,97	9,84	91,13	2,83	4,87	131,49	3383,44

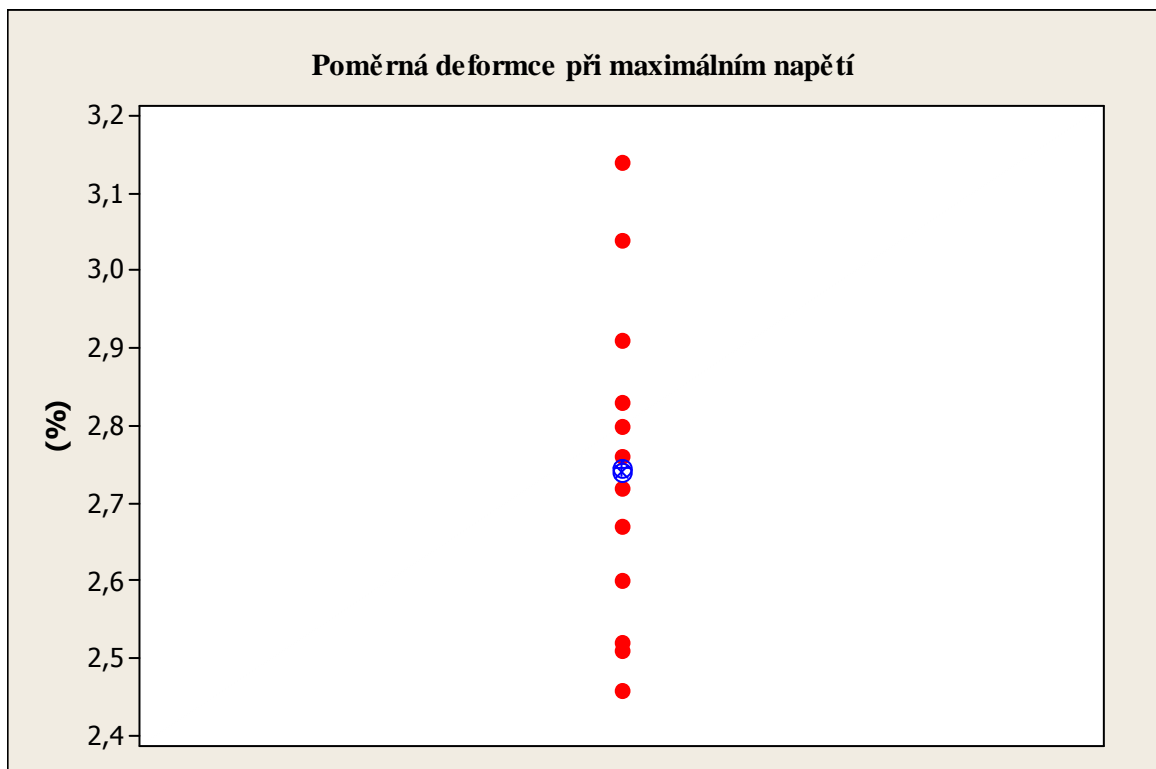
Tab. 9 Vyhodnocení naměřených hodnot

n=12	R <sub>m</sub> (Mpa)	ε (%)	s (mm)	E (Mpa)	F <sub>max</sub> (N)
x	88,42	2,75	4,71	3362,42	138,25
s	5,17	0,20	0,35	74,83	9,37
M	88,34	2,74	4,70	3386,09	137,71
u <sub>a</sub>	1,49	0,06	0,10	21,60	2,71
R	16,31	0,68	1,16	265,96	33,99
x <sub>min</sub>	81,15	2,46	4,23	3187,43	124,26
x <sub>max</sub>	97,46	3,14	5,39	3453,39	158,25



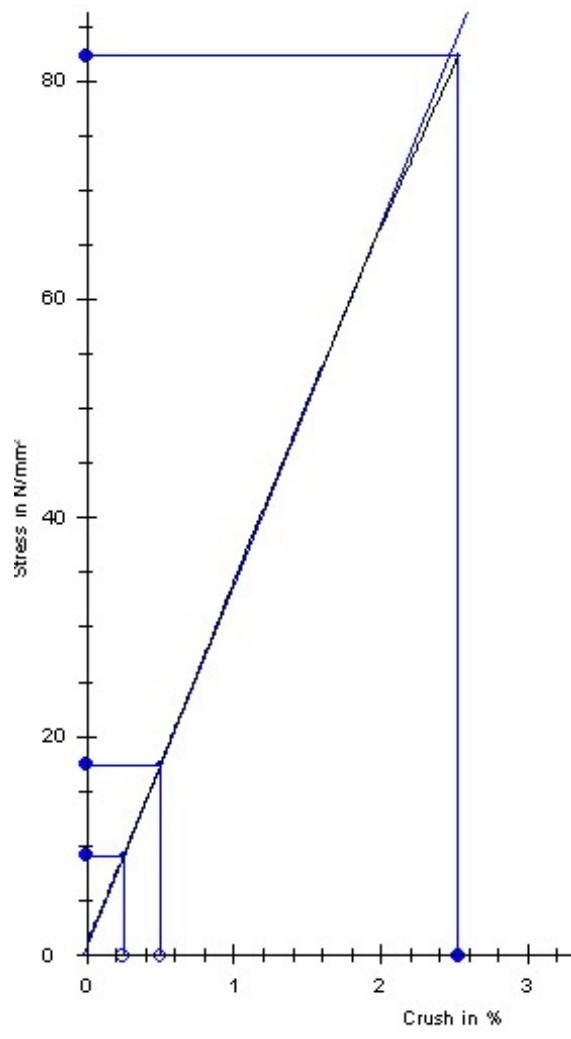


Obr. 31 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %



Obr. 32 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %

Měření 36-48: Zkušební tělesa z materiálu PMMA, vypálená laserem o výkonu 90 % a posuvu 9 %.



Obr. 33 Zkouška ohybem při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 %



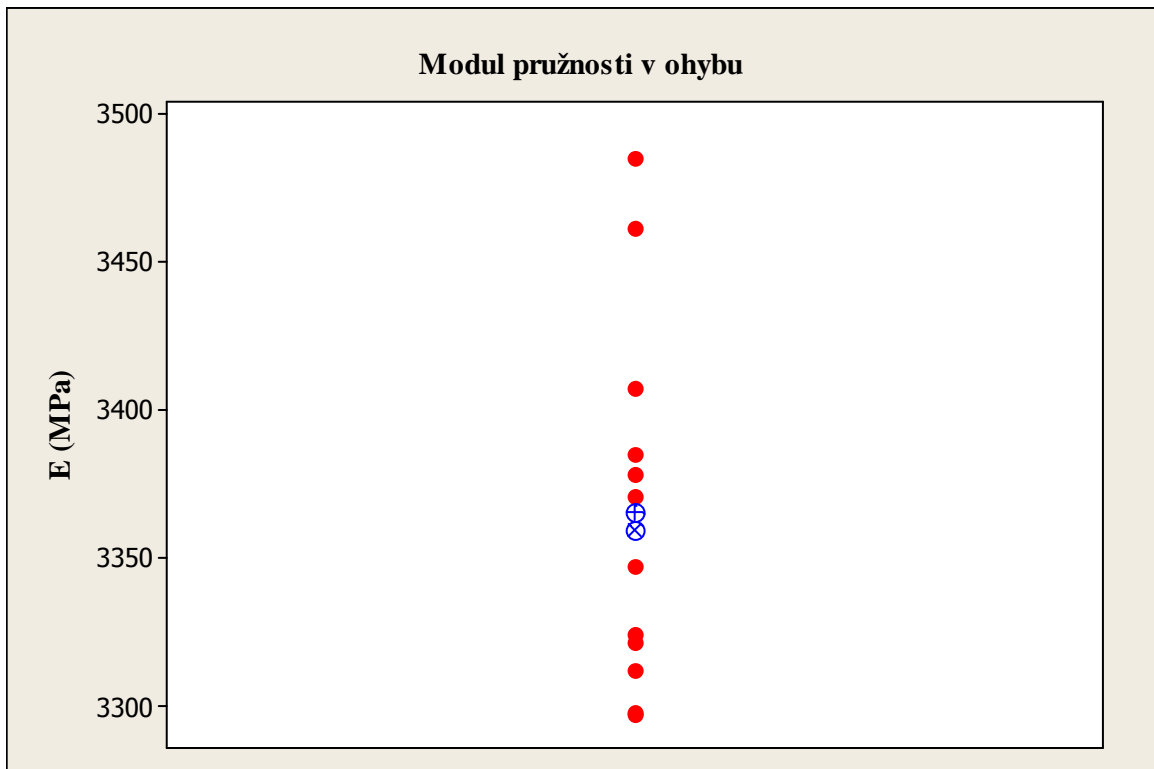
Obr. 34 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 %

Tab. 10 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 %

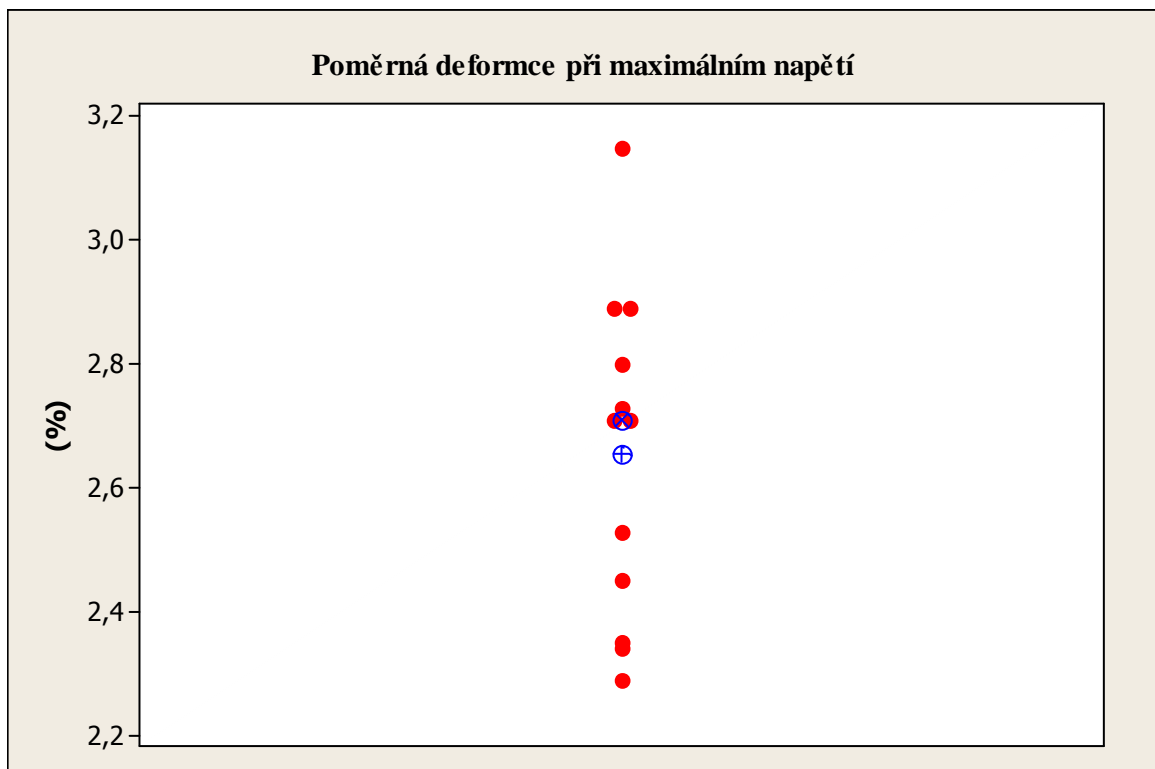
n	h (mm)	b (mm)	R <sub>m</sub> (MPa)	ε (%)	s (mm)	F <sub>max</sub> (N)	E (MPa)
1	3,98	9,9	86,89	2,71	4,64	147,49	3297,6
2	3,97	9,89	86,95	2,73	4,7	153,38	3378,83
3	3,99	9,84	82,3	2,53	4,33	152,42	3312,79
4	3,99	9,87	80,46	2,45	4,19	136,05	3461,65
5	3,99	9,83	76,9	2,34	4,01	147,22	3384,98
6	3,98	9,93	88,89	2,8	4,81	124,95	3321,83
7	3,99	9,86	77,61	2,29	3,92	141,94	3484,81
8	3,98	9,81	92,75	2,89	4,95	141,19	3407,41
9	3,99	9,86	88,36	2,71	4,63	134,3	3347,79
10	3,98	9,84	92,32	2,89	4,95	131,7	3371,09
11	3,98	9,89	76,54	2,35	4,03	125,36	3324,95
12	3,98	9,87	97,86	3,15	5,4	145,64	3298,58

Tab. 11 Vyhodnocení naměřených hodnot

n=12	R <sub>m</sub> (MPa)	ε %	s (mm)	E (MPa)	F <sub>max</sub> (N)
x	85,65	2,65	4,55	3366,03	140,14
s	6,63	0,25	0,44	58,85	9,29
M	86,92	2,71	4,64	3359,44	141,57
u <sub>a</sub>	1,91	0,07	0,13	16,99	2,68
R	21,32	0,86	1,48	187,21	28,43
x <sub>min</sub>	76,54	2,29	3,92	3297,60	124,95
x <sub>max</sub>	97,86	3,15	5,40	3484,81	153,38

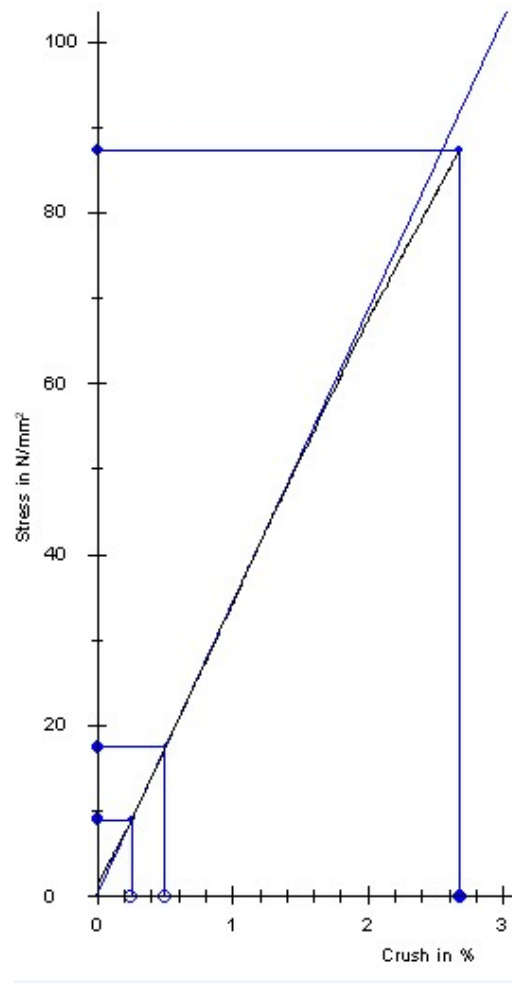


obr. 35 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 %



Obr. 36 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %

Měření 48-60: Zkušební tělesa z materiálu PMMA, vypálená laserem o výkonu 70 % a posuvu 5 %.



Obr. 37 Zkouška ohybem při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 %



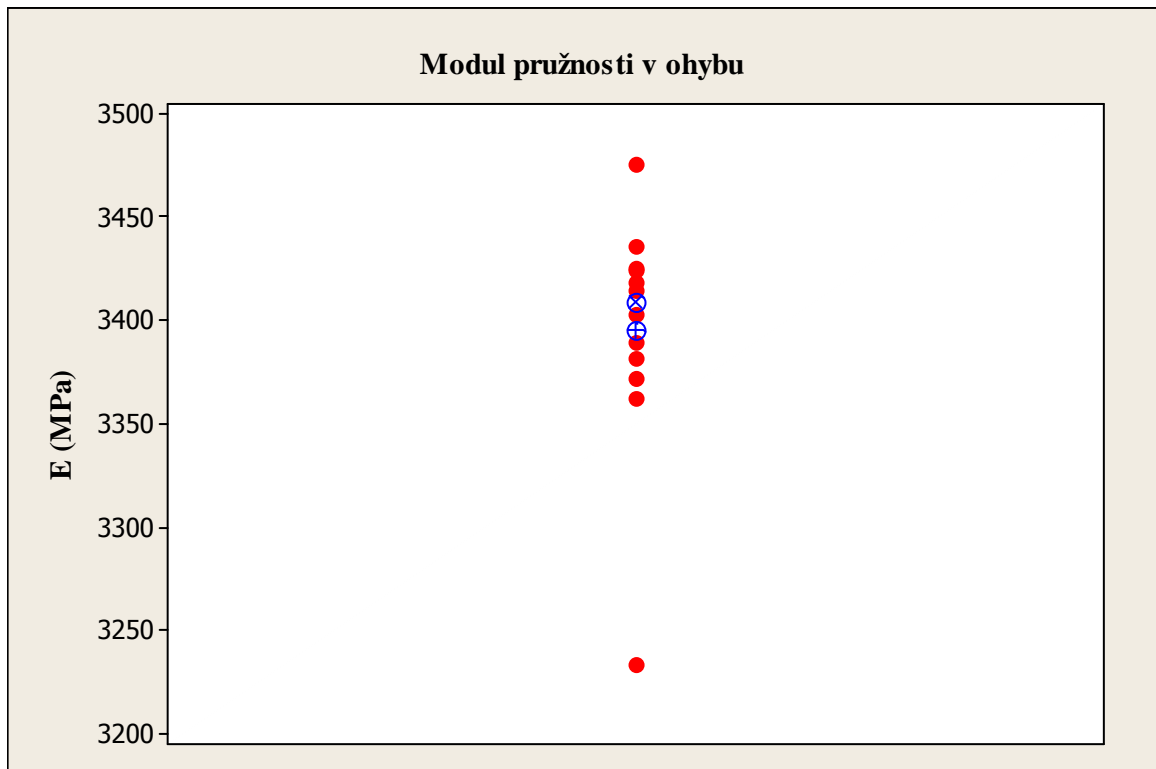
Obr. 38 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 %

Tab. 12 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 %

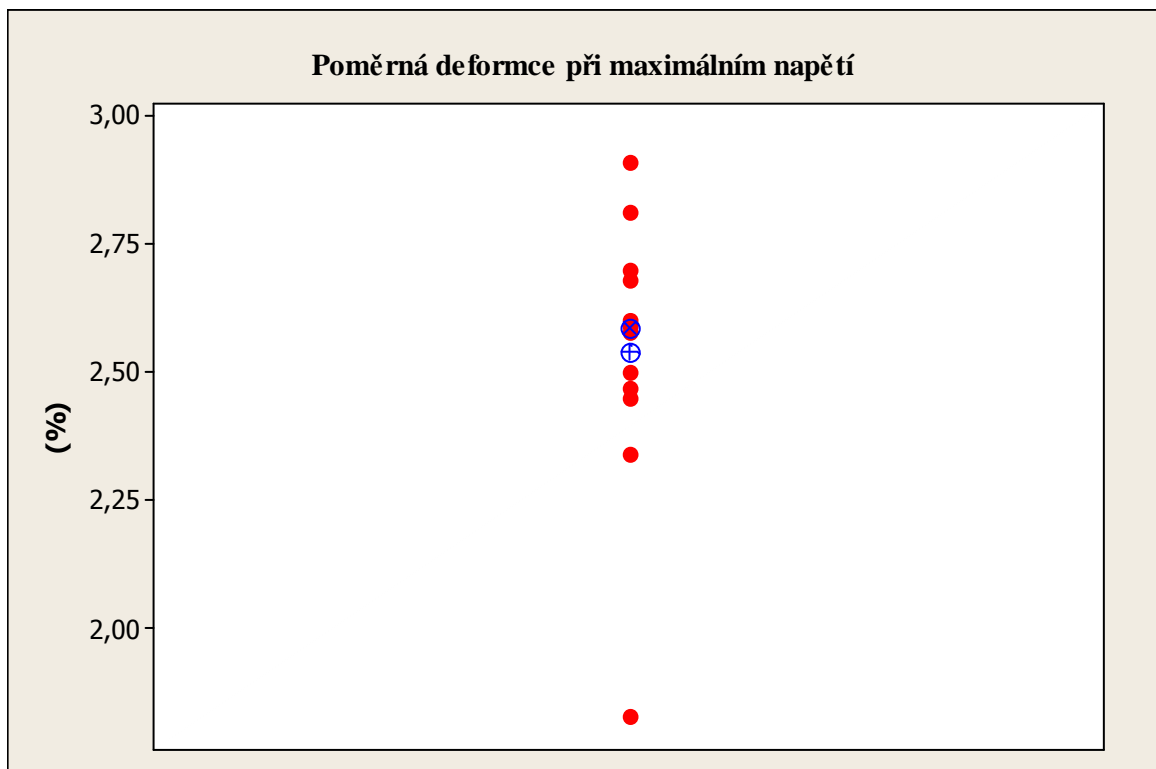
n	h (mm)	b (mm)	R <sub>m</sub> (MPa)	ε(%)	s (mm)	F <sub>max</sub> (N)	E (MPa)
1	3,99	9,85	87,78	2,81	4,81	126,9	3234,36
2	3,98	9,85	86,64	2,7	4,62	150,13	3390,04
3	3,99	9,84	61,94	1,83	3,13	144,48	3363,01
4	3,98	9,85	84,99	2,6	4,46	149,89	3372,39
5	3,99	9,96	80,35	2,45	4,21	124,91	3419,02
6	3,98	9,83	81,36	2,47	4,23	159,38	3414,35
7	3,97	9,81	82,28	2,5	4,3	143,38	3435,87
8	3,98	9,85	92,86	2,91	4,99	140,81	3403,56
9	3,97	9,87	87,32	2,68	4,61	101,07	3424,66
10	3,97	9,84	78,09	2,34	4,02	138,14	3475,57
11	3,97	9,87	84	2,59	4,45	130,33	3382,16
12	3,97	9,84	84,04	2,58	4,44	131,97	3425,16

Tab. 13 Vyhodnocení naměřených hodnot

n=12	R <sub>m</sub> (MPa)	ε(%)	s (mm)	E (MPa)	F <sub>max</sub> (N)
x	82,64	2,54	4,36	3395,01	136,78
s	7,27	0,26	0,45	56,65	14,61
M	84,02	2,59	4,45	3408,96	139,48
u <sub>a</sub>	2,10	0,08	0,13	16,35	4,22
R	30,92	1,08	1,86	241,21	58,31
x <sub>min</sub>	61,94	1,83	3,13	3234,36	101,07
x <sub>max</sub>	92,86	2,91	4,99	3475,57	159,38



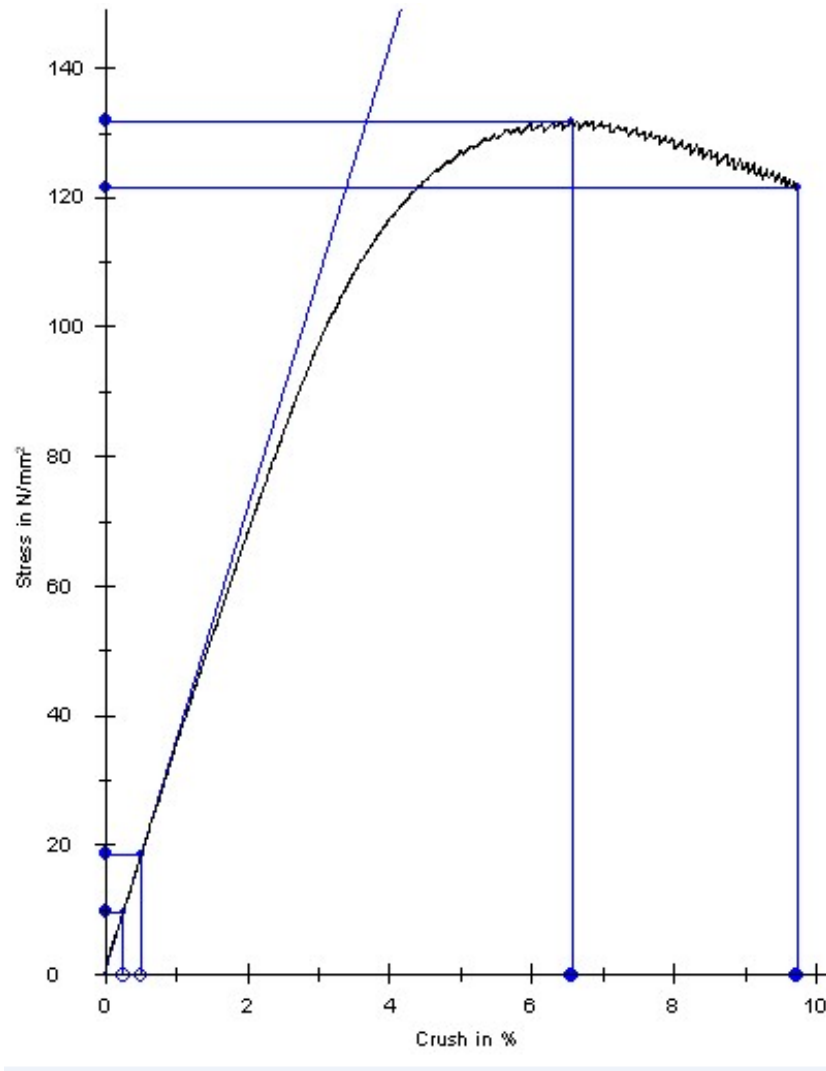
Obr. 39 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 %



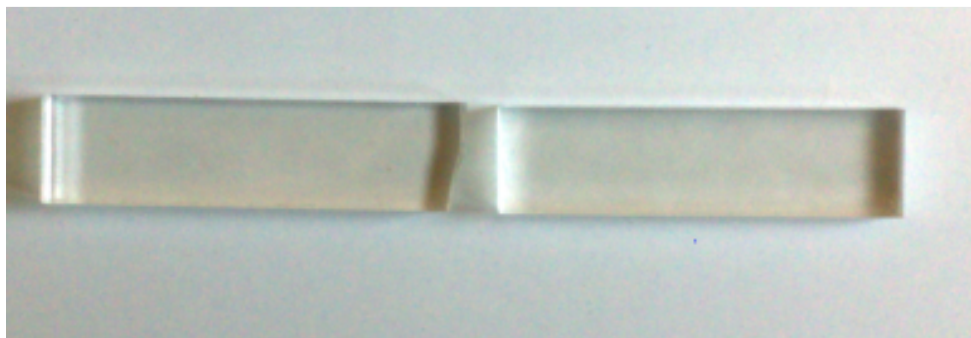
Obr. 40 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 %

## 8.2 Vstříkované vzorky

Měření 60-72: Zkušební tělesa z materiálu PMMA, vstříkovaná.



Obr. 41 Zkouška ohybem vstříkovaných těles



Obr. 42 Zlomení vstříkovaného vzorku

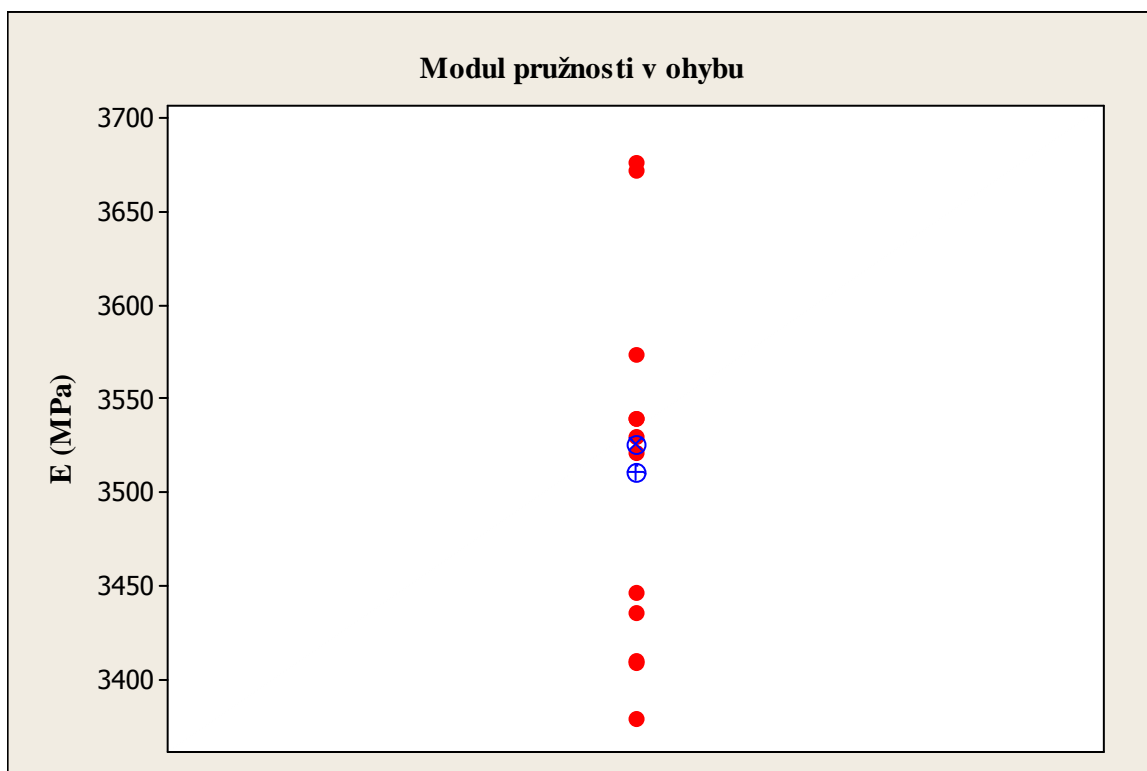


Tab. 14 Naměřené hodnoty vstříkovaných vzorků

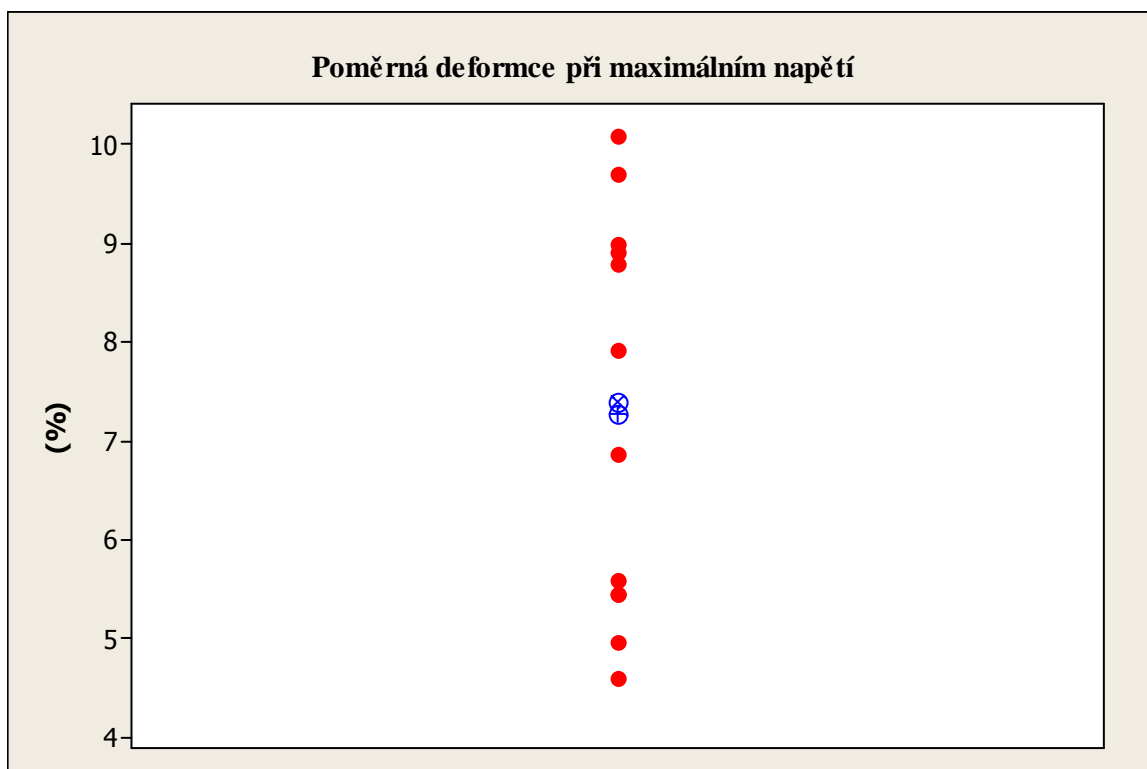
n	h (mm)	b (mm)	R <sub>m</sub> (MPa)	ε (%)	s (mm)	F <sub>max</sub> (N)	E (MPa)
1	3,99	9,96	124,7	4,96	8,48	205,97	3411,16
2	3,99	9,95	131,76	5,44	9,3	217,42	3539,6
3	3,99	9,96	136,38	8,92	15,26	225,26	3672,23
4	4	9,96	134,56	5,59	9,54	223,38	3521,73
5	3,99	9,96	136,36	9	15,39	225,23	3676,03
6	4,04	10,02	128,46	5,45	9,19	220,36	3410,47
7	4,05	10,05	125,72	4,59	7,74	215,87	3530,01
8	4,03	10	133,7	7,92	13,41	226,19	3540,04
9	4,04	10,04	131,78	9,71	16,42	224,95	3573,57
10	4,06	10,06	133,3	6,86	11,54	230,26	3447,38
11	4,05	10,08	129,36	8,78	14,79	222,79	3379,84
12	4,05	10,01	132,23	10,08	16,99	226,15	3436,97

Tab. 15 Vyhodnocení naměřených hodnot

n=12	R <sub>m</sub> (MPa)	ε (%)	s (mm)	E (MPa)	F <sub>max</sub> (N)
x	131,53	7,28	12,34	3511,59	221,99
s	3,64	1,92	3,25	94,02	6,15
M	132,01	7,39	12,48	3525,87	224,17
u <sub>a</sub>	1,05	0,56	0,94	27,14	1,77
R	11,68	5,49	9,25	296,19	24,29
x <sub>min</sub>	124,70	4,59	7,74	3379,84	205,97
x <sub>max</sub>	136,38	10,08	16,99	3676,03	230,26



Obr. 43 Vyhodnocení modulu pružnosti při vstřikování



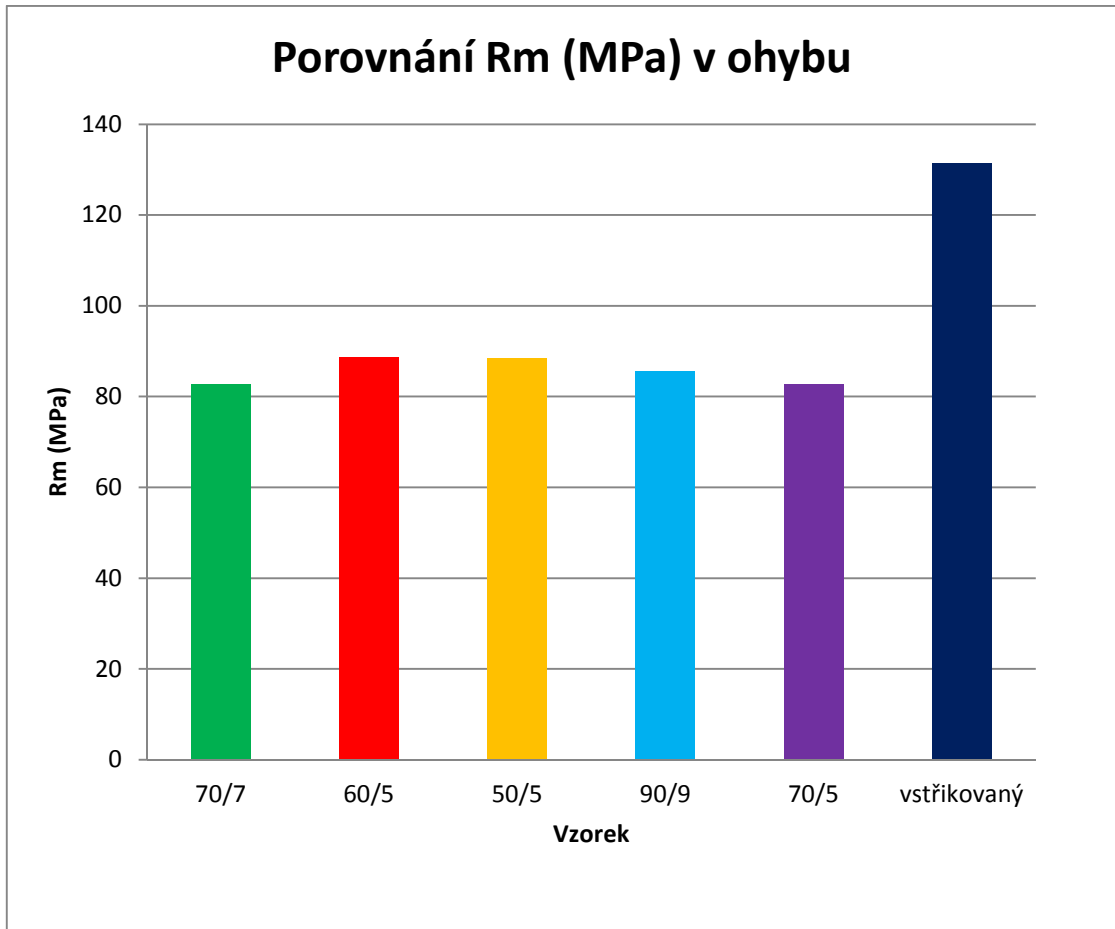
Obr. 44 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při vstřikování

## 9 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

V následující tabulce jsou uvedeny všechny průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek měřených vzorků. Výsledky se znázorní ve sloupcovém grafu, ve kterém se ukáže kolísání jednotlivých měření.

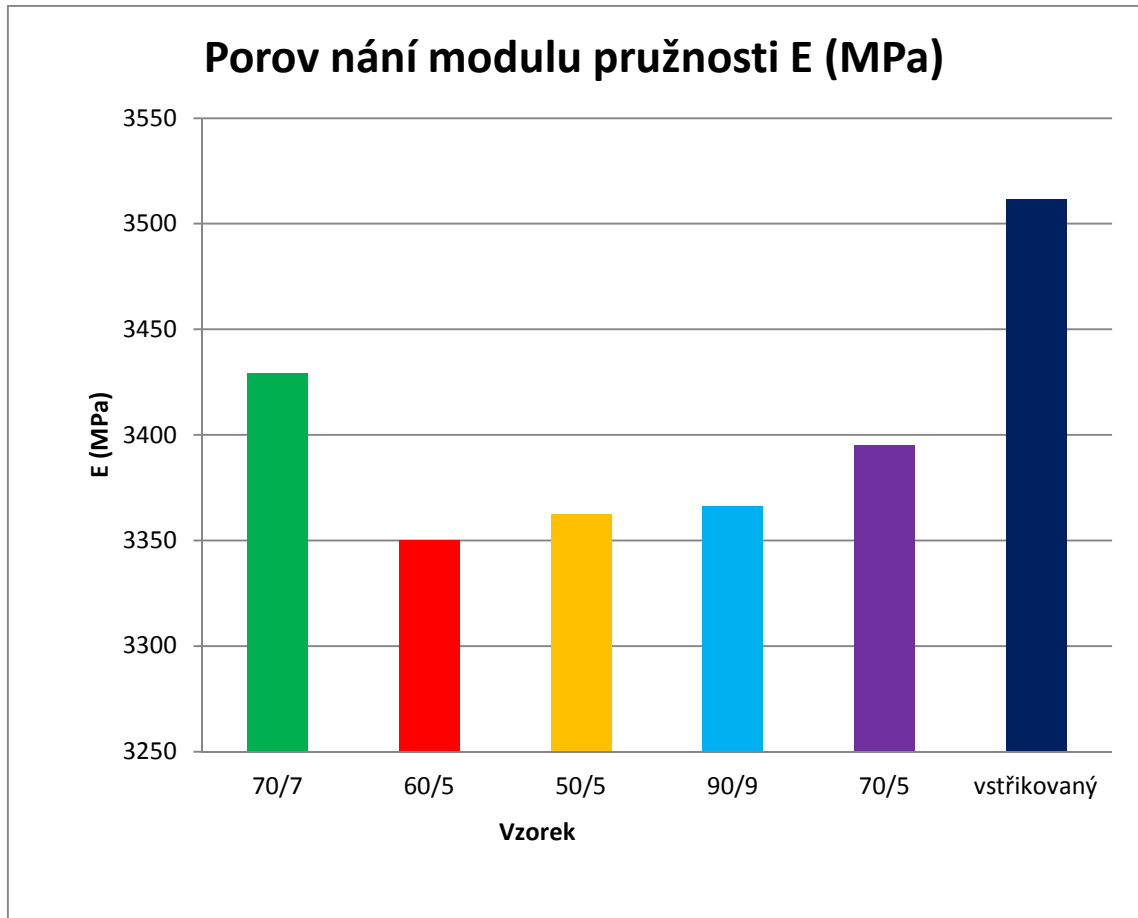
Tab. 16 Výsledné průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek

Vzorek výkon/posuv	R <sub>m</sub> (MPa)	ε (%)	s (mm)	E (MPa)	F (N)
70/7	82,72±9,24	2,52±0,34	4,3±0,57	3429,32±82,99	135,9±15,33
60/5	88,7±7,61	2,75±0,28	4,71±0,48	3350,14±47,44	151,64±19,77
50/5	88,42±5,17	2,75±0,2	4,71±0,35	3362,42±74,83	138,25±9,29
90/9	85,65±6,63	2,65±0,25	4,55±0,44	3366,03±58,85	140,14±9,29
70/5	82,64±7,27	2,54±0,26	4,36±0,45	3395,01±56,65	136,78±14,61
vstříkovaný	131,53±3,64	7,28±1,92	12,34±3,25	3511,59±94,02	221,99±6,15
R	48,89	4,76	8,04	161,45	86,09
x <sub>min</sub>	82,64	2,52	4,3	3350,14	135,9
x <sub>max</sub>	131,53	7,28	12,34	3511,59	221,99



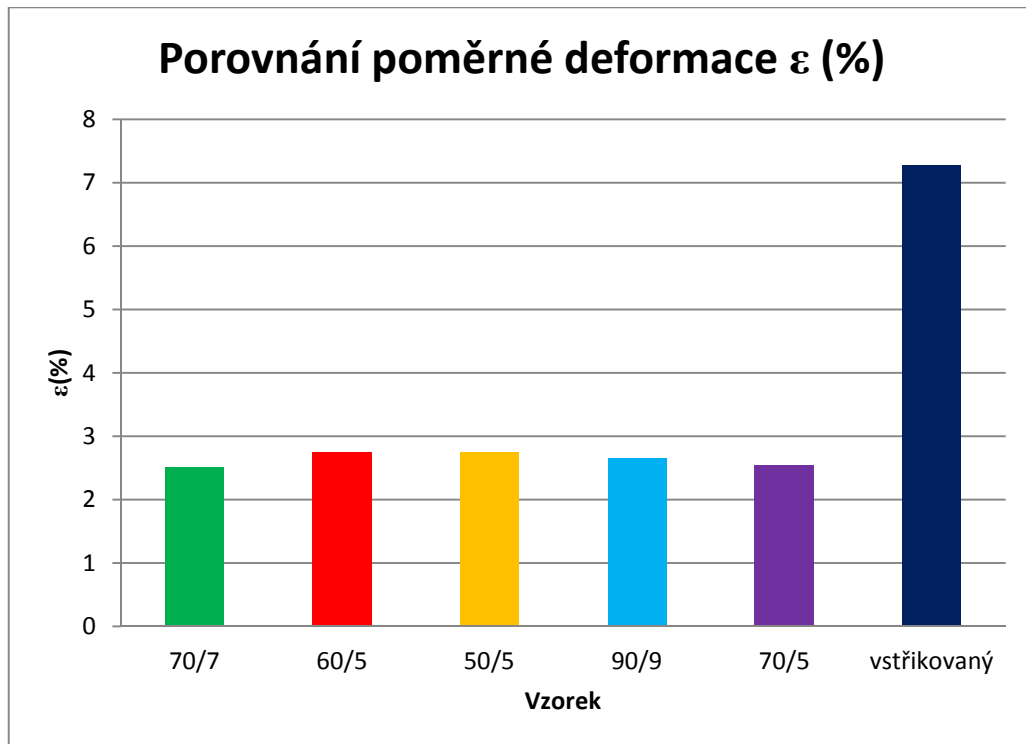
*Obr. 45 Porovnání pevnosti v ohybu*

U vzorků vyráběné jinou technologií výroby než je vstřikování je variační rozpětí 6,06 MPa, v procentech 6,8 %, hodnoty se pohybují v rozmezí 80 MPa – 90 MPa a tudíž lze usuzovat, že různé řezné podmínky u vypalovaných vzorků nemají zásadní vliv na pevnost v ohybu. V grafu je taky jasně patrné, že vstřikované vzorky vykazovaly větší odolnost v ohybu, což je způsobeno polymerními vlákny, která tvoří klubka místo lineárních řetězců u vytlačování desek.

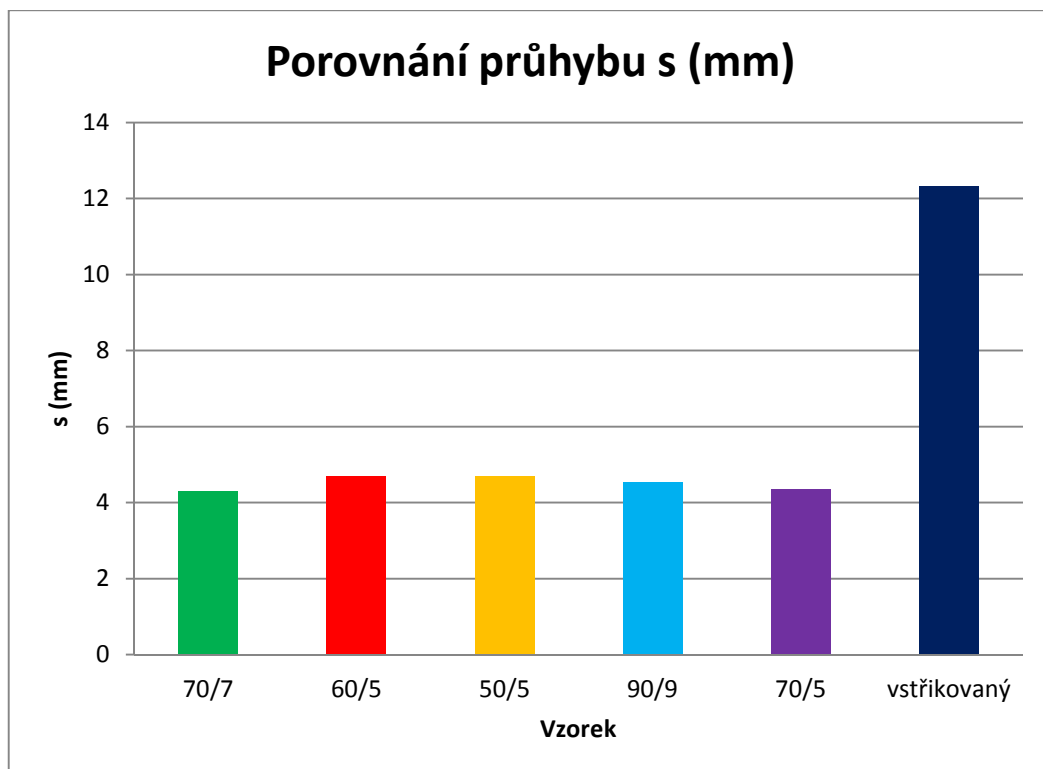


*Obr. 46 Porovnání modulu pružnosti v ohybu*

U modulu pružnosti si lze všimnout, že vzorky vyřezané při optimálních podmínkách pro daný typ laseru má i výrazně vyšší modul pružnosti. Lze říci, že čím více se vzorky blíží k optimálním řezným podmínkám, tím vyšší je i modul pružnosti. Modul pružnosti má variační rozpětí 79,18 MPa (2,31%), pro vzorky vypálené laserem a 161,45 MPa (4,59%) celkově i se vstřikovanými vzorky.



Obr. 47 Porovnání poměrné deformace



Obr. 48 Porovnání průhybů

Mezi poměrnou deformací a průhybem je přímá souvislost, protože vycházejí ze stejného vzorce. Proto je zde na pohled vidět, že jsou grafy totožné, ale s jinými čísly. U modulu pružnosti záleželo na optimálních podmínkách, a čím byly lepší řezné podmínky, tím vyšší byl modul pružnosti v ohybu. U průhybu a poměrné deformace je tomu přesně naopak. Čím více se vzorky blíží k optimální řezným podmínkám, tím méně snášejí deformaci způsobenou ohybem a jsou tak méně odolnější proti prasknutí.

Ve všech případech vykazují vstříkované vzorky nejlepší výsledky všech sledovaných parametrů.

## ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval výrobou a provedením mechanických zkoušek na připravených vzorcích z materiálu PMMA. Při přípravě vzorku z polykarbonátu nebylo možné vzorky použít, protože se i při různých řezných podmínkách na laseru ILS 3NM nepodařilo vzorky vyřezat. Polykarbonát hned prohořel a nebylo možné vypálené vzorky z polotovaru vyjmout kvůli následnému spečení, proto byly použity vzorky pro ohyb pouze z PMMA. K výrobě vzorků jsem podle normy ČSN EN ISO 178 zvolil přednostní typ zkušební tělesa. Pro návrh tohoto typu tělesa byl využit program AutoCAD, ze kterého se narýsovaná tělesa převedla do typu soboru dxf, jež se dá otevřít v programu Corel Draw. Tento program je standartně nastavený pro komunikaci s laserem ILS 3NM.

Celkem bylo vytvořeno šest sérií vzorků, přičemž jedna z nich byla vyrobena vstříkováním.

Bylo vypáleno pět sérií vzorků při různých řezných podmínkách. Každá série obsahovala 12 kusů. První série byla vypálena s nastaveným výkonem 70 % a posuvem 7 %. Druhá série byla vypálena s výkonem 60 % a posuvem 5 %. Třetí 50/5, čtvrtá 90/9, pátá 70/5. Výkon a posuv laseru pro vypalování vzorků byl stanoven z optimálních řezných podmínek pro PMMA.

Z laboratorního měření mechanických vlastností byla vyhodnocována naměřená data. Podle získaných grafů lze říci, že vypálené vzorky laserem při různých podmínkách řezu nemají výrazný vliv na změnu mechanických vlastností PMMA, zejména na modul pružnosti v ohybu a také na výslednou pevnost v ohybu. Pokud ale vzorky budou porovnávat se vstříkovanými vzorky je tomu už jinak. Vstříkované vzorky vytvářejí jinou výslednou strukturu než vzorky připravené z desky, která je vyrobená jinou technologií (vytlačováním). V důsledku toho jsou takové vzorky odolnější vůči vnějším zatěžujícím silám a stalo se, že takový vzorek ani nepraskl při zkoušce ohybem.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] LAPČANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: Laserové technologie v praxi [elektronická skripta]. 2010 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z:  
<http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [2] Laser. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001- [cit. 2012-02-15]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser#cite\\_note-vesmir-0](http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser#cite_note-vesmir-0)
- [3] MLEZIVA, Josef. *POLYMERY- výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
- [4] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [5] STEIDL, Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 1 [cit. 2012-02-16]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens.html>
- [6] ČSN EN ISO 178. *Plasty-Stanovení ohybových vlastností*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [7] ČSN EN ISO 604. *Plasty-Stanovení tlakových vlastností*. Praha: ČNI, 2004.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

L – rozpětí mezi podpěrami (mm)

l – délka zkušebního tělesa (mm)

h – tloušťka zkušebního tělesa (mm)

R1 – poloměr zatěžovacího trnu (mm)

R2 – poloměr podpěr (mm)

F – použitá síla (N)

b – šířka zkušebního tělesa (mm)

$\sigma_t$  – příslušné napětí v ohybu (MPa)

$\varepsilon_t$  – je příslušná deformace ohybem (-),(%)

s – průhyb, (mm)

$E_1$  - modul pružnosti v ohybu (MPa)

$\sigma$  – napětí v tlaku (MPa)

$\sigma_M$  – mez pevnosti v tlaku (MPa)

$\sigma_B$  – napětí v tlaku při porušení (MPa)

$\sigma_y$  – napětí na mezi kluzu v tlaku (MPa)

$\sigma_x$  – napětí v tlaku při x % poměrném stlačení (MPa)

$\varepsilon$  – poměrné stlačení (-),(%)

$\varepsilon_{cy}$  – jmenovité poměrné stlačení na mezi kluzu v tlaku (-),(%)

$\varepsilon_{cM}$  – jmenovité poměrné stlačení na mezi pevnosti v tlaku (-),(%)

$\varepsilon_{cB}$  – jmenovité poměrné stlačení při porušení (-),(%)

x – podle tvaru tělesa se jedná buď o průměr válce nebo vnější průměr trubky nebo tloušťku hranolu (mm)

A – počáteční plocha průřezu zkušebního tělesa vyjádřená (mm<sup>2</sup>)

$L_0$  – počáteční měřená délka zkušebního tělesa vyjádřená (mm)

$\Delta L_0$  – zkrácení délky zkušebního tělesa mezi značkami vyjádřené (mm)

$\varepsilon_0$  – je příslušné jmenovité poměrné stlačení (-)

L – počáteční vzdálenost mezi tlačnými deskami vyjádřená (mm)

$\Delta L$  – zkrácení vzdálenosti mezi tlačnými deskami vyjádřené (mm)

$E_0$  – je modul pružnosti v tlaku vyjádřený (MPa)

M – medián

$s$  – směrodatná odchylka

$u_a$  – nejistota typu A

$R$  – variační rozpětí

$x_{\min}$  – minimální hodnota

$x_{\max}$  – maximální hodnota

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma a fotografie prvního rubínového laseru[1]</i> .....	12
<i>Obr. 2 Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru[1]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Schéma optického rezonátoru[1]</i> .....	13
<i>Obr. 4 Podíl na trhu-typy laserů[4]</i> .....	14
<i>Obr. 5 Procento rozdělení jednotlivých technologií[4]</i> .....	15
<i>Obr. 6 Schéma laserového svařování[1]</i> .....	16
<i>Obr. 7 Schéma laserového vrtání[1]</i> .....	16
<i>Obr. 8 Schéma laserového řezání[1]</i> .....	17
<i>Obr. 9 Konstrukce Nd:YAG laseru[4]</i> .....	18
<i>Obr. 10 Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru[4]</i> .....	20
<i>Obr. 11 Poloha zkušební tělesa na začátku zkoušky</i> .....	23
<i>Obr. 12 Zkušební těleso</i> .....	24
<i>Obr. 13 Typické křivky napětí v tlaku/poměrné stlačení</i> .....	26
<i>Obr. 14 Laser ILS 3NM ve školních dílnách</i> .....	31
<i>Obr. 15 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456</i> .....	33
<i>Obr. 16 Rozměry zkušební tělesa pro zkoušku ohybem</i> .....	35
<i>Obr. 17 Importované zkušební tělesa do CorelDraw</i> .....	36
<i>Obr. 18 Nastavení rezných podmínek laseru</i> .....	37
<i>Obr. 19 Vypálená zkušební tělesa na ILS 3NM</i> .....	38
<i>Obr. 20 Podpěry a zatěžovací trn stroje ZWICK ROELL 1456</i> .....	40
<i>Obr. 21 Zkouška ohybem při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %</i> .....	41
<i>Obr. 22 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %</i> .....	41
<i>Obr. 23 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %</i> .....	43
<i>Obr. 24 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %</i> .....	43
<i>Obr. 25 Zkouška ohybem při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %</i> .....	44
<i>Obr. 26 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %</i> .....	44
<i>Obr. 27 Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %</i> .....	46
<i>Obr. 28 Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %</i> .....	46
<i>Obr. 29 Zkouška ohybem při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %</i> .....	47
<i>Obr. 30 Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %</i> .....	47

<i>Obr. 31</i>	<i>Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 32</i>	<i>Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 33</i>	<i>Zkouška ohybem při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 % .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 34</i>	<i>Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 % .....</i>	<i>50</i>
<i>obr. 35</i>	<i>Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 % .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36</i>	<i>Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 37</i>	<i>Zkouška ohybem při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 38</i>	<i>Zlomení vzorku vypáleného při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 39</i>	<i>Vyhodnocení modulu pružnosti při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 40</i>	<i>Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 % .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 41</i>	<i>Zkouška ohybem vstříkovaných těles .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 42</i>	<i>Zlomení vstříkovaného vzorku .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 43</i>	<i>Vyhodnocení modulu pružnosti při vstříkování .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 44</i>	<i>Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí při vstříkování .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 45</i>	<i>Porovnání pevnosti v ohybu .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 46</i>	<i>Porovnání modulu pružnosti v ohybu .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 47</i>	<i>Porovnání poměrné deformace .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 48</i>	<i>Porovnání průhybů .....</i>	<i>62</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Technické parametry laserové tiskárny ILS 3NM .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 2 Technické parametry univerzálního trhacího stroje.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 3 Rozměry zkušebního tělesa pro tlakovou zkoušku .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 4 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 70 % a posuvu 7 %.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5 Vyhodnocení naměřených hodnot.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 60 % a posuvu 5 %.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7 Vyhodnocení naměřených hodnot.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 50 % a posuvu 5 %.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 9 Vyhodnocení naměřených hodnot.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 10 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 90 % a posuvu 9 %.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 11 Vyhodnocení naměřených hodnot.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 12 Naměřené hodnoty při výkonu laseru 70 % a posuvu 5 %.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 13 Vyhodnocení naměřených hodnot.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 14 Naměřené hodnoty vstříkovaných vzorků .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 15 Vyhodnocení naměřených hodnot.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 16 Výsledné průměrné hodnoty včetně směrodatných odchylek .....</i>	<i>59</i>