

Vliv technologie přípravy vzorků na mechanické vlastnosti

Zdeněk Polášek

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvořit zkušební těleso pro tahovou zkoušku na laseru ILS 3NM a provést zkoušku tahem s vyhodnocením. Teoretická část se zabývá samotnou tahovou zkouškou, polymery a jejich rozdělení pro použití. Praktická část se zabývá návrhem zkušebního tělíska a výrobou pro tahovou zkoušku. Pro práci je využit laseru ILS 3NM a stroj pro tahovou zkoušku. Naposled vyhodnotíme naměřené údaje.

Klíčová slova: Polymer, Modul pružnosti, Laser, Trhací stroj

ABSTRACT

The aim of this thesis is to create a test specimen for tensile test for the ILS laser 3NM and perform the test with the evaluation of stroke. The theoretical part discusses the tensile test, polymers and their distribution for use. The practical part deals with experiments and contains, reproducing for tensile test. To operate the ILS laser 3NM is used for tensile test machine. Last evaluate the measured data.

Keywords: Polymer, Modulus, Laser, The ripper

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janě Knedlové, za odborné vedení, čas a ochotu, kterou mi věnovala při vypracovávání bakalářské práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 TERMOPLASTY	15
1.2 REAKTOPLASTY	17
2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ	18
2.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	18
2.2 ZKOUŠENÍ ZÁKLADNÍCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ	19
3 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM	21
3.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESA	22
3.2 PROVEDENÍ ZKOUŠKY	23
3.3 ZÁKLADNÍ TYPY TAHOVÝCH DIAGRAMŮ.....	24
3.4 VYHODNOCENÍ ZÁKLADNÍCH CHARAKTERISTIK.....	25
3.5 NAPĚŤOVÉ CHARAKTERISTIKY	26
CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	33
4 CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU PMMA	34
5 POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ	36
5.1 PLOTROVÝ LASER ILS 3NM	36
5.2 ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	38
6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ Z PMMA	40
7 PROVEDENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY A VYHODNOCENÍ	46
7.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA	47
7.2 VZOREK DLE NORMY TYP 1A NEZÚŽENÝ	48
7.3 VZOREK DLE NORMY TYP 1A ZÚŽENÝ 8MM.....	51
7.4 VZOREK DLE NORMY TYP 1A ZÚŽENÝ 6MM.....	54
7.5 VZOREK DLE NORMY TYP 1A ZÚŽENÝ 4MM.....	57
7.6 VZOREK TYP 1A NEZÚŽENÝ OPTIMÁLNÍ PODMÍNKY LASERU.....	60
7.7 VZOREK TYP 1A ZÚŽENÝ NA 8MM OPTIMÁLNÍ PODMÍNKY LASERU	63
7.8 VZOREK TYP 1A ZÚŽENÝ NA 6MM OPTIMÁLNÍ PODMÍNKY LASERU	66
7.9 VZOREK TYP 1A ZÚŽENÝ NA 4MM OPTIMÁLNÍ PODMÍNKY LASERU	69
7.10 ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ 8 MĚŘENÍ.....	72
ZÁVĚR	77

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	78
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	79
SEZNAM OBRÁZKŮ	81
SEZNAM TABULEK.....	83

ÚVOD

Rozvoj výroby a zpracování plastů v posledních letech zaznamenal velký růst ve většině oborů. To je dáno jejich velmi širokou použitelností pro technické i netechnické účely, snadnou zpracovatelností a výhodnými specifickými vlastnostmi. Ve spotřebním průmyslu se výrobky z plastů uplatňují stále více, kde nahrazují materiály klasické.

Při použití plastů pro konstrukční dílce nás bude zajímat vedle jiných vlastností, jako je chemická odolnost, stárnutí apod., také i rozsah teploty, při které bude změna strukturních vlastností tak malá, že nám neovlivní požadované mechanické hodnoty.

Vhodnost materiálu k použití na výrobek, který je zatěžován základními druhy namáhání, stanovujeme pomocí mechanických statických zkoušek. Tyto zkoušky nesou názvy podle druhu namáhání, kterým je zkoušený materiál zatěžován. Například pokud materiál namáháme tahem, jedná se o zkoušku tahem a podobně odvozujeme zkoušky tlakem, ohybem, krutem, smykem. Nejčastěji prováděná je zkouška tahem a provádí se téměř u všech materiálů. Pro zajištění zkoušky vždy za stejných podmínek a dosažení výsledků používáme předepsanou normu, která určuje postup a podmínky měření.

V dnešní době je rozvoj polymerních materiálů obrovský. Samotné polymerní materiály můžeme obohacovat o plniva a různé přísady do zpracovatelských směsí. Vliv těchto změn můžeme také vyhodnotit pomocí mechanických zkoušek a stanovit zda-li je pro naše využití přínosné či nikoliv.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou tzv. makromolekulami, obsahující výchozí složenými z jednotlivých opakujících se dílců - monomerů. Liší se nejen chemickou strukturou, ale i strukturou nadmolekulární - uspořádání krystalické, amorfní nebo částečně krystalické (semikrystalické) - chemickou strukturou nerozumíme jen složení, ale i způsob uspořádání navzájem (stechiometrie molekul) - rozdílná konfigurace atomu nebo jejich skupin (různá poloha v prostoru) se projevuje v rozdílných možnostech vytvářet nadmolekulární struktury a tím určuje rozdílné vlastnosti - v nekovových látkách jsou atomy navzájem poutány vazbami kovalentními nebo iontovými [1, 4]

Lineární polymery

V tomto případě jsou jednotlivé monomery seřazeny za sebou, viz (Obr. 1a), takže vytvoří jednoduchý řetězec. Mezi těmito pružnými řetězci působí slabé Van der Waalsovy vazby. Typickými představiteli této skupiny jsou polymery vznikající z nenasycených uhlovodíků s jednou dvojnou vazbou. Nejjednodušší strukturu má polymer ethenu – polyethylen.

Rozvětvené polymery

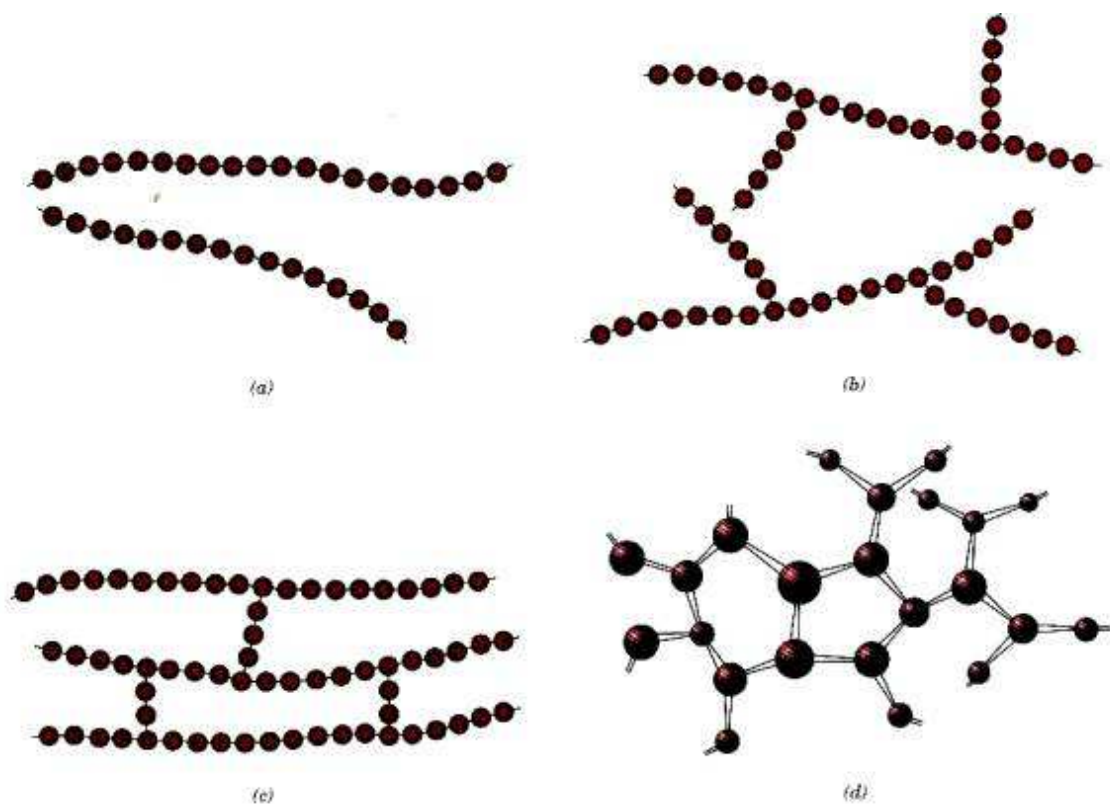
Struktura těchto polymerů je schematicky znázorněna na (Obr. 1b). Jejich makromolekula se vyznačuje hlavním řetězcem, z něhož vystupují postranní „větve“. Celá struktura má menší hustotu, než lineární polymery.

Polymery se zkříženými články

Schematický obrázek takových polymerů je uveden na (Obr. 1c). Z obrázku plyne, že sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silné kovalentní vazby. Sem patří různé elastické materiály, jako je např. přírodní i syntetický kaučuk.

Sítované polymery

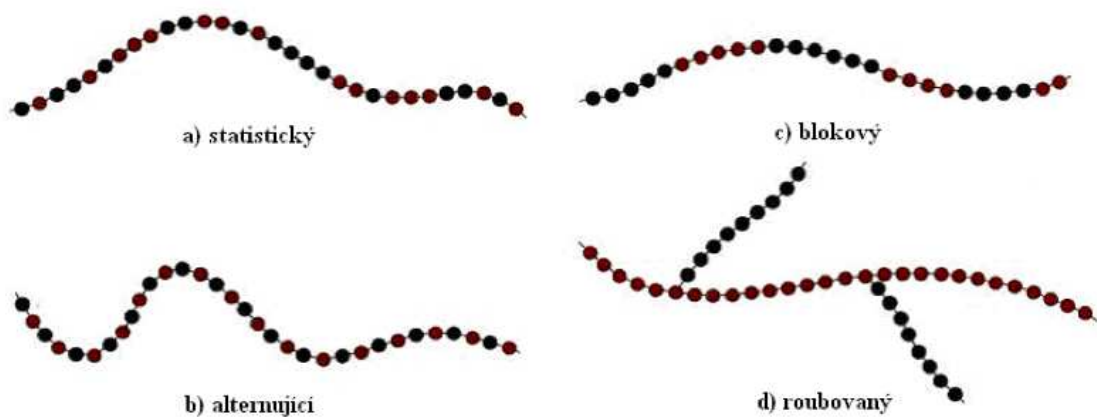
Trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby vytvářejí trojrozměrnou síť (Obr. 1d). Tyto polymery mají zajímavé mechanické vlastnosti. Patří sem epoxidy a fenolformaldehydy. [2]



Obr. 1. Struktura polymerů [2]

Kopolymery

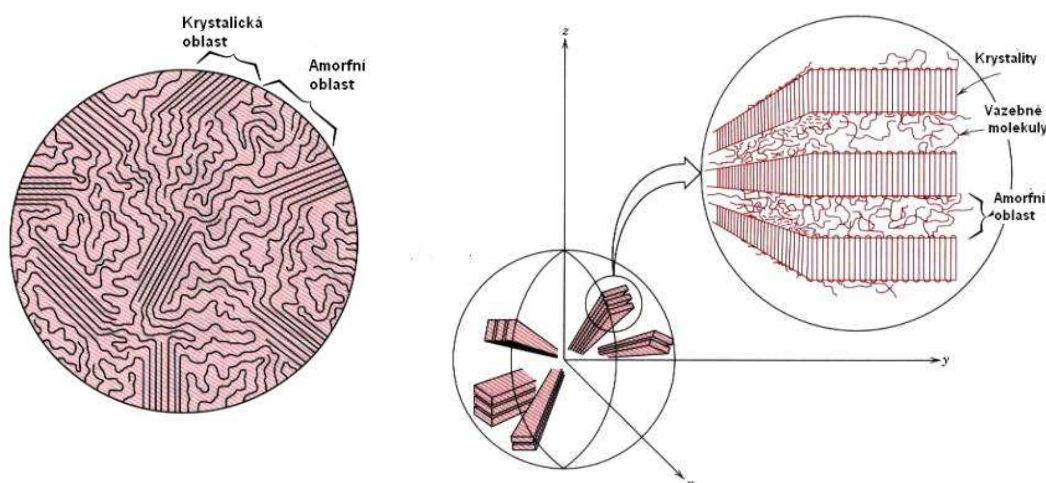
Tyto polymery vznikají polymerací více než jednoho druhu monomerů. Tyto monomery se mohou střídát buď náhodně, nebo střídavě. Různé struktury kopolymerů jsou znázorněny na (Obr. 2). [2]



Obr. 2. Struktura kopolymerů [2]

Krystalické a semikrystalické polymery

Velká délka makromolekul je na překážku jejich úplné krystalizaci. Přesto i u polymerů pozorujeme krystalický stav takový, že makromolekuly jsou pravidelně uspořádány v omezeném objemu (Obr. 3). Protože jsou uspořádány jenom částečně, hovoříme také o semikrystalickém stavu. Mnohé polymery, krystalizující z taveniny, vytvářejí tzv. sférolity (Obr. 3), které mají, jak zní jejich název kulovitý tvar. [2]



Obr. 3. Semikrystalický polymer a Sféroolit [2]

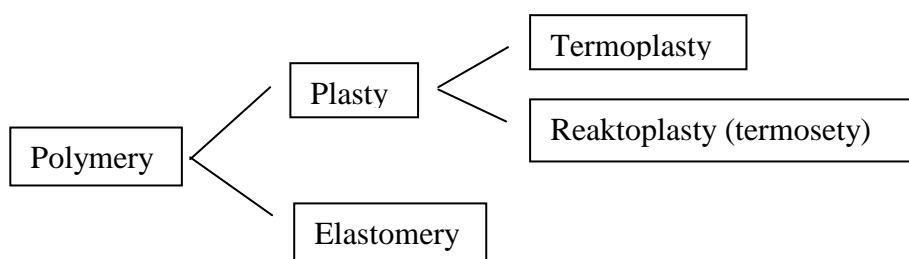
Plasty jsou makromolekulární látky, které se dají formovat do požadovaného tvaru teplem nebo tlakem, popř. oběma činiteli současně. Jsou pevné a dobře tvarovatelné, lehké, snadno se obrábějí a většinou mají dobré i tepelně-izolační vlastnosti. Ve srovnání s kovy mají strukturu tvořenou s krystalických mřížek, tj. dlouhé molekuly s opakující se základní strukturální jednotkou, téměř nepodléhají korozi, což je výhodné z hlediska trvanlivosti výrobků z nich zhotovených, ale nevýhodné z hlediska ekologického, protože odpad z plastů se v přírodě jen pomalu rozkládá.

Podstatnou složkou jsou makromolekulární organické sloučeniny přírodního nebo syntetického původu, tvořené atomy uhlíku a vodíku, k nimž přistupují atomy dalších prvků. Další důležitou složkou jsou tzv. příměsi, které často označujeme přímo účelem, za kterým se do makromolekulárních látek přidávají (plniva, změkčovadla, stabilizátory, maziva, ...).

Užité vlastnosti polymerů je možno v široké míře měnit plnivem. Plniva snižují cenu výrobků, ale také mění mechanické vlastnosti, které dělíme na nevyztužující, která jsou obvykle

prášková (např. grafit), mající vliv na kluzné a tepelné vlastnosti a na vyztužující (vláknité, např. sklo, tkaniny), jež zvyšují především pevnost při současném zvýšení modulu pružnosti. [1]

Eleastomer je polymer s vysokou schopností vratné deformace s volně zesíťovanými molekulami 1 příčná vazba na 1000 atomů hlavního řetězce (zabránění plastické deformace). Ve svém molekulárním řetězci mají reaktivní místa umožňující chemickou síťovací reakci, nazývanou vulkanizace. Vulkanizace probíhá za přítomnosti vulkanizačního činidla, kterým je nejčastěji síra. Při vulkanizaci se plasticky tvárný kaučuk mění na pryž. [2, 4]



Obr. 4. Základní rozdělení polymerů

1.1 Termoplasty

Termoplasty tvoří lineární nebo rozvětvený polymerní jednotky obsahující opakující se monomer. Při tváření se roztaví a ochlazením převedou opět do tuhého stavu. Většina termoplastů se používá v plastikářském průmyslu, převážně na vstřikování. Z hlediska nadmolekulární stavby rozlišujeme termoplasty amorfnní a semikrystalické. [1]

Polyetylén - PE

výroba : vysokotlakou polymerací - rozvětvený (LDPE) – měkký

nízkotlakou polymerací - lineární (HDPE) – tvrdý

Vlastnosti - Je hořlavý, odkapává. Elektroizolační a dielektrické vlastnosti jsou velmi dobré. Má nízkou odolnost proti UV záření a vlivům povětrnosti. Nenavlhá, má velmi dobrou chemickou odolnost proti kyselinám, zásadám a solným roztokům. Odolává alkoholům a rozpouštědlům, neodolává chlorovaným uhlovodíkům a částečně benzínu. Nedá se lepit. Dá se modifikovat velkou řadou přísad plnidly, omezovači šíření plamenů, kaučukem, činidly pro zesíťení struktury a antioxidanty. [3]

Polypropylen - PP

Vlastnosti - středně pevný a tuhý materiál. Je hořlavý, odkapává, elektroizolační a dielektrické vlastnosti jsou nepatrně horší než u PE. Neodolává povětrnosti. Chemická odolnost dobrá jako u PE. Nenavlhá. Velmi dobře se dá barvit, nedá se lepit. Výrobky se vyznačují větší průhledností, než PE. Polypropylen má výhodnou kombinaci ceny a užitných vlastností, v poslední době je nárůst spotřeby v důsledku nových kopolymerů a kompozitů, podléhá však oxidaci, pod bodem mrazu homopolymer křehne, vlastnosti závisí na poměru a uspořádání monomerů, obvykle se používá ve své izotaktické, vysoce krystalické formě. Dá se modifikovat velkou řadou přísad plnidly (např. talkem, skelnými vlákny, apod.), kaučukem (reaktorová modifikace polypropylenů s elastomerem za účelem poklesu T_g je aplikována k výrobě nárazníků). [3]

Mezi další zástupce termoplastů patří:

- **Styrénové polymery (PS, SB, ABS, SAN, ASA)** - amorfní plasty, jsou tuhé, pevné, ale bez přísad křehké a čiré.
- **Polyvinylchlorid (PVC)** - amorfní termoplast s vyšší pevností a tuhostí, s nižší tažností a rázovou a vrubovou houževnatostí, hlavně za nízkých teplot.
- **Fluoroplasty PTFE (polytetrafluoretylén)** - semikrystalický plast podobný PE, H je nahrazen F mechanické vlastnosti závisí na stupni krystalinity, je měkký, povrch se snadno poškrábe, nejdražší plast.
- **Polymethylmetakrylát (PMMA)** - amorfní termoplast, tuhý a velmi pevný s nízkou tažností. Je to konstrukční plast. Má především výborné optické vlastnosti (dokonalá čirost), jeho výroba se však omezuje, protože je zdlouhavá a tím i nákladná.
- **Polyamidy (PA)** - semikrystalický, vláknotvorný plast, tuhý pevný, tažný, s výraznou mezí kluzu, vysokou rázovou houževnatostí a dobrou odolností proti nárazu. Je to konstrukční plast.
- **Polyformaldehyd - polyoxymethylen (polyacetát) (POM)** - semikrystalický termoplast, je velmi tuhý a pevný - konstrukční plast. Stupeň krystalizace se snižuje kopolymerací. Struktura (sférolity) by měla být jemnozrnná, potom je POM houževnatější, což se ovlivňuje nukleárními činidly. Vyrábí se polymerací formaldehydu.

- **Polykarbonát (PC)** - amorfní termoplast, středně tuhý s vyšší pevností, není vhodný pro styk s potravinami, konstrukční plast.
- **Lineární polyuretan (PUR)** - amorfní termoplast charakteru tuhé pryže. Dobrá ohebnost i za mrazu. [3]

1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty procházejí při zpracovatelském procesu chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovacích činidel vytvářejí husté, prostorově sesíťované struktury, v nichž jsou původní molekuly vzájemně pospojovány kovalentními vazbami. Tento proces se nazývá vytvrzování. Reaktoplast je ve vytvrzeném stavu netavitelný a nerozpustný, což dokazuje lepší chování za zvýšené teploty. [2]

Zástupci reaktoplastů:

- **Melaminové plasty (MF)** - fenol-formaldehydová pryskyřice s různými plnivými.
- **Fenoplasty (PF) melamin** - formaldehydová pryskyřice s různými plnivými.
- **Aminoplasty močovinoformaldehydová pryskyřice (UF)** - močovinoformaldehydová pryskyřice plněná bavlněnými vlákny či bělenou celulózou.
- **Polyesterové skelné lamináty (PESL)** - polyesterová pryskyřice, která je rozpouštěna ve vhodném monomeru, katalyzátoru a urychlovači. Plnivo jsou skleněná vlákna. Lisovací hmota Premix.
- **Epoxidové hmoty (EP)** - lisovací hmoty jsou epoxidové pryskyřice s různými plnivými, jinak laky, lepidla, kompozity. [3]

2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

Zkoušení materiálů je v praxi nezbytnou součástí kontroly jakosti jak pro dodavatele i pro odběratele. Umožňuje nám poznat vlast. materiálů nutné pro jejich účelné využití v praxi. Pro různé vlastnosti materiálů byla vyvinuta řada zkoušek, které lze podle povahy údajů o materiálech rozdělit do těchto hlavních skupin :

- a) **Chemické zkoušky** – stanovení složení materiálu - často bez porušení (polarografie, fotometrie, spektrální analýza, atd.).
- b) **Fyzik.-chemické zkoušky** – odolnost materiálu vůči různým agresivním prostředím
- c) **Fyzikální zkoušky** – stanovení základních fyzikálních konstant a vlastností tepelných, elektrických, magnetických, akustických, optických a dalších (např. - teplotní roztažnost, tepelná vodivost, měrná hmotnost, krystal. stavba kovů a poruchy krystal. mřížky, apod.).
- d) **Metalografické zkoušky** - hodnocení struktury – rozložení strukturních součástí (makro a mikro strukturní rozložení) tvořící slitinu pomocí optické a elektronové mikroskopie.
- e) **Mechanické zkoušky** – přímé posouzení užití různých materiálů v praxi. Stanovují pevnostní vlastnosti, tvrdost, plasticitu, houževnatost a další.
- f) **Technologické zkoušky** – ověřuje se schopnost a vhodnost materiálů k technologickému zpracování (obrobitelnost, svařitelnost, slévatelnost, opotřebení, atd).
- g) **Defektoskopické (nedestruktivní) zkoušky** – zjišťují se vady necelistvosti materiálu (vnitřní a povrchové vady), slouží k ověření způsobilosti materiálu. [7]

2.1 Mechanické vlastnosti polymerních materiálů

Tuhost vyjadřuje sílu, kterou je nutno vynaložit pro deformaci tělesa v pružné oblasti deformací. Mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu.

Pevnost polymerů se liší v návaznosti na jejich molekulární i nadmolekulární strukturu. Tvary tahových křivek se liší podle toho, zda daný polymer se nachází v oblasti teplot pod či nad teplotou skelného přechodu T_g . U amorfních polymerů pod T_g dochází k přetržení

tělesa ihned po překonání pružné deformace. Některé semikrystalické polymery mají schopnost se dále zpevňovat po překonání meze kluzu a napětí na mezi pevnosti pak může být i několikrát větší než napětí na mezi kluzu.

Tvrдость je složitou veličinou, která souvisí jak s kvalitou povrchu tak s vnitřními vlastnostmi polymeru. Zejména u elastomerů existují empirické vztahy přepočtu mezi tvrdostí a modulem pružnosti ve smyku. Literatura uvádí tvrdosti, které jsou obvykle používány pro charakterizaci elastomerů, dále tvrdosti HRC pro tvrdé polymerní materiály pod T_g a nejobsáhleji používané tvrdosti vtiskem kuličky.

Houževnatost je důležitou vlastností materiálu, která vyjadřuje množství práce nutné na vznik nového povrchu. Tuto vlastnost materiálu lze nejlépe vystihnout hodnotou lomové houževnatosti a hnací síly trhliny. Tyto údaje se naneštěstí v literatuře nevyskytují a jsou předmětem dalších zkoušek. Většinou je nutné se omezit na údaje, které poskytují plastická zkušební metody, t.j. rázová houževnatost metodou Charpy a Izod s vrubem a bez vrubu. Vzhledem k tomu, že pro vysoce houževnaté materiály je nutné použít tělesa s jiným tvarem vrubu než u méně houževnatých materiálů, je vzájemné srovnání na základě číselných údajů o vynaložených energiích složité. [5]

2.2 Zkoušení základních mechanických vlastností materiálů

Vlastnosti jsou takové stránky materiálních objektů, které člověk pozoruje a pomocí určitého experimentálního zařízení zkoumá z hlediska svých zájmů a potřeb. Mechanické vlastnosti materiálů vyjadřují schopnost materiálu odolávat mechanickému namáhání. Jsou měřeny klasicky definovanými charakteristikami (určitým způsobem definovanými mírami kvantitativní i kvalitativní stránky dané vlastnosti), které se určují na konvenčně definovaných vzorcích jednotných velikostí a tvarů. Metody zjišťování základních mechanických vlastností jsou založeny na principu působení vnějších mechanických sil na zkušební těleso vyrobené ze zkoušeného materiálu. Cílem je stanovit číselnou hodnotu materiálové charakteristiky. Reakce zkoušeného materiálu na působení vnějších sil je dána vzájemným působením čtyř základních faktorů:

1. zatížením
2. zkušebním tělesem
3. materiálem zkušebního tělesa

4. podmínkami zkoušky

Zatížení je dáno definovanou vnější silou, která vyvolá v tělese stav napjatosti a působí na jednu nebo více ploch zkušebního tělesa.

Zkušební těleso představuje tuhé těleso definovaného tvaru a rozměrů, které je dohodnutým způsobem vyrobené ze zkoušeného materiálu.

Materiál zkušebního tělesa je definován chemickým složením a mikrostrukturou.

Podmínky zkoušky jsou určeny teplotou zkoušky a dohodnutým zkušebním postupem vlastní zkoušky. [6]

Mechanické zkoušky rozdělujeme dle:

- charakteru zatěžování
 - statické
 - dynamické
- zjišťované vlastnosti či souborů vlastností
 - zkoušky pevnostních vlastností
 - zkoušky tvrdosti
 - zkoušky únavy
- druhu namáhání
 - zkoušky tahové
 - zkoušky tlakové
 - zkoušky ohybu
- teploty a prostředí

3 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více napěťových a deformačních charakteristik zavedených v normě ČSN 420310. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10°C do 35°C, pokud není stanoveno jinak, v arbitrážních případech při teplotách (23±5) °C. Rychlost zatěžování se pohybuje od 0,5 do 2,0 mm/min.

Jednou z nejdůležitějších zkoušek materiálu hodnotících jeho pevnost je tahová zkouška. Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou tak, že dojde k jeho porušení. Kdyby byl materiál isotropní, bylo by napětí v celém průřezu zkušebního tělesa rozloženo rovnoměrně. V praxi se tento ideální stav nevyskytuje, vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí je rozloženo nerovnoměrně. Vznikají tím smyková napětí.

Je nutné si předem uvědomit pochody při namáhání tahem. Jestliže budeme působit na průřez tělesa S_0 silou F , bude osově napětí působící v průřezu zkušebního tělesa při tahové zkoušce. Průřez tělesa se nám při zkoušce však bude měnit až do okamžiku, kdy se dosáhne rovnováhy mezi deformací a napětím. Při dalším zatěžování síly se dostaneme do okamžiku, kdy se těleso přetrhne. Protože průřez tělesa se při zkoušce stále mění, je zjišťování skutečného napětí obtížné. V praxi se obvykle pracuje s tak zvaným **smluvním napětím**, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušebního tělesa:

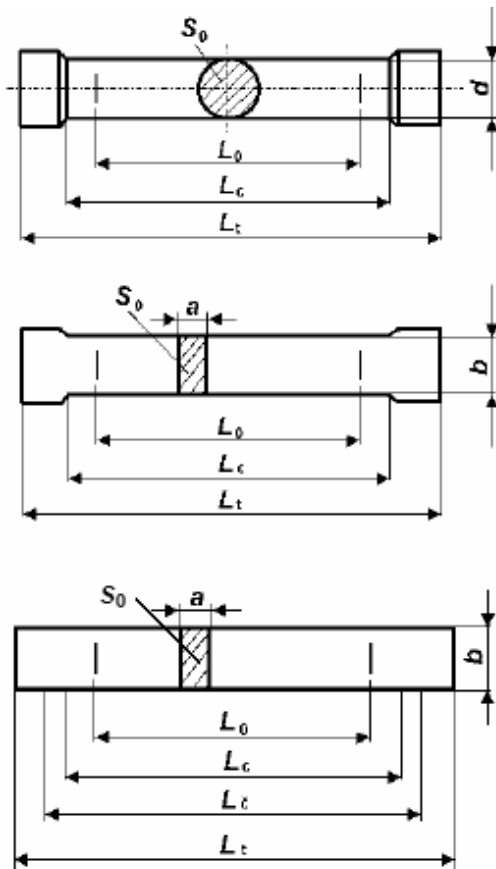
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Tento způsob vyjadřování je vžitý pro kovy a byl také převzat pro plasty. Tam, kde dochází k malým deformacím jako jsou reaktoplasty, polystyren apod., tento stav ještě vyhovuje. U elastomerů, kde nastává prodloužení o několik desítek procent, je však již potom podstatné zmenšení průřezu tělesa a tím i velký rozdíl mezi napětím na začátku a na konci zkoušky.

[7]

3.1 Zkušební tělesa

Tvar a rozměry zkušebních tyčí, které nám stanovuje norma, závisí na tvaru a rozměrech výrobků, pro které jsou určovány mechanické vlastnosti. Příčný průřez zkušebních těles může být kruhový, čtvercový, obdélníkový, prstencový nebo jiného tvaru. [6]



Výklad použitých symbolů a označení:

- L_0 [mm] počáteční měřená délka
- L_c [mm] zkoušená délka
- L_z [mm] vzdálenost mezi upínacími čelistmi zkušebního stroje
- L_t [mm] celková délka zkušební tyče
- S_0 [mm²] počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče
- d [mm] průměr zkoušené délky válcové zkušební tyče
- a [mm] tloušťka ploché zkušební tyče
- b [mm] šířka zkoušené délky ploché zkušební tyče

Zkušební tyče jsou dvojího druhu:

Poměrné - pro jejichž počáteční měřenou délku L_0 a počáteční průřez S_0 platí vztah $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$, kde k je 5,65 a délka $L_0 > 20$ mm. Jestliže příčný průřez zkušební tyče nesplňuje požadavky kladené na hodnoty k a L_0 , používá se větší hodnota k ; přednostně $k = 11,3$. Pro poměrné zkušební tyče je délka L_0 zaokrouhlována na nejbližší násobek 5 mm za předpokladu, že rozdíl mezi vypočtenou a označenou délkou je menší než 10 % L_0 . Délka L_0 musí být určena s přesností ± 1 % a označena značkou nebo ryskou, která netvoří vrub, jenž by mohl vyvolat předčasný lom.

nepoměrné - jsou zkušební tyče, u nichž je délka L_0 nezávislá na počátečním příčném průřezu.

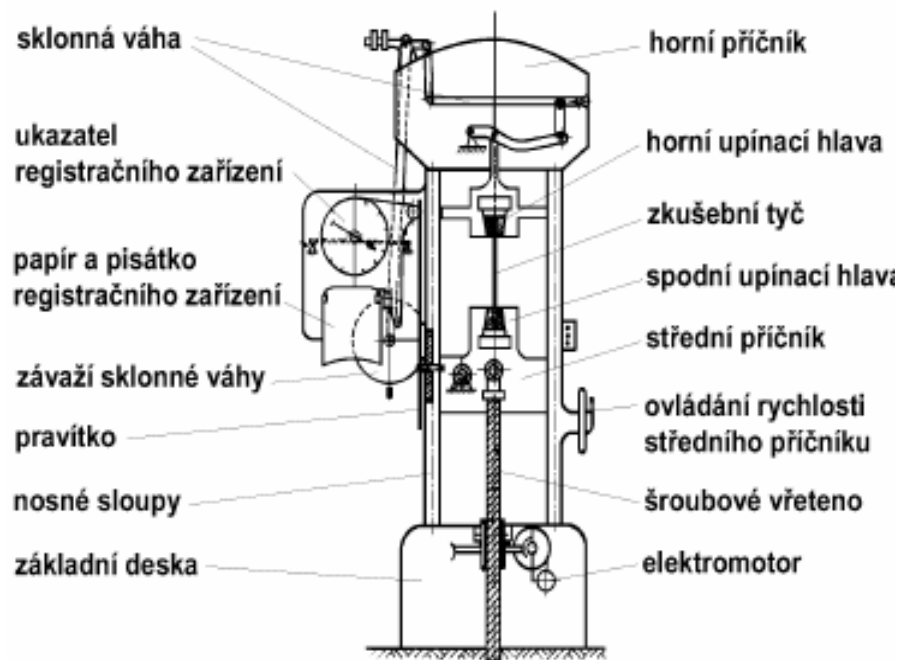
Upnutí vzorků do stroje :

Zkušební tyče musí být do zkušebního stroje upnuty vhodným způsobem (pomocí klínů, závitových, osazených nebo hydraulických čelistí) tak, aby zatížení působilo pokud možno v ose zkušební tyče. [7]

3.2 Provedení zkoušky

Zkušební tyč je upnuta do čelistí trhacího stroje. Po spuštění elektromotoru je uveden do pohybu střední příčník. Zkušební tyč je tak zatěžována silou F [N], jejíž velikost je registrována pomocí zapisovacího zařízení v závislosti na prodloužení ΔL [mm] zkušební tyče. Zkouška tahem obvykle končí porušením zkušební tyče.

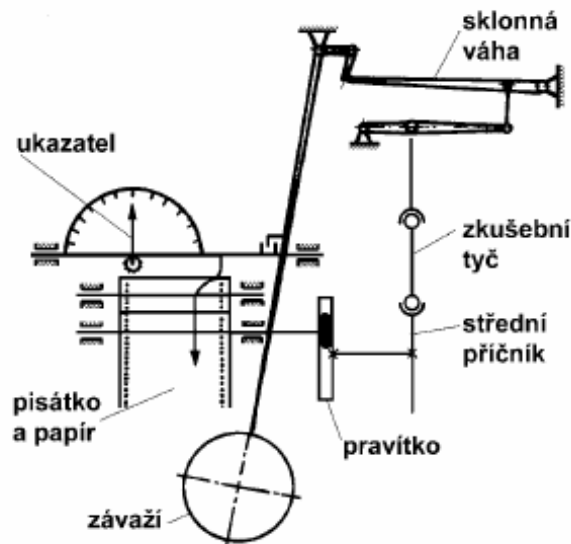
U mechanického zkušebního stroje je zátěžná síla F [N] měřena pomocí sklonné váhy (vychýlením závaží) a přes hřebenovou tyč s pastorkem je přenášena na ukazatel a pisátko registračního zařízení. Pohyb středního příčníku vyvolává prodloužení ΔL [mm] zkušební tyče a zároveň zajišťuje odvíjení registračního papíru. [6]



Obr. 5. Schéma trhacího stroje pohled z boku [6]

Moderní elektronické zkušební stroje umožňují registrovat skutečné prodloužení zkušební tyče pomocí zařízení zvaného průtahoměr, který se pomocí měřicích břitů připevňuje na

zkušební tyč. Prodlužování tyče je pomocí indukčního nebo tenzometrického snímače převedeno na elektrický signál, který je možno dále elektronicky zpracovávat. Současně je pomocí tenzometrické hlavy upevněné v horním příčniku zaznamenávána i velikost působící zátěžné síly.



Obr. 6. Schéma trhacího stroje přední pohled

3.3 Základní typy tahových diagramů

Vynesením zátěžné síly F [N] a prodloužení zkušební tyče ΔL [mm] do grafu vznikne tahový diagram, v němž je nezávisle proměnnou ΔL a závisle proměnnou F . [9]

- Křehký materiál
- Materiál s výraznou mezí kluzu
- Materiál s horní a dolní mezí kluzu
- Materiál se smluvní mezí kluzu



Obr. 7. Základní typy pracovních tahových diagramů [9]

3.4 Vyhodnocení základních charakteristik

Definice základních pojmů používaných při vyhodnocování napěťových a deformačních charakteristik :

- měřená délka $L[mm]$ - délka válcové nebo prismatické části zkušební tyče, na které se měří prodloužení v každém okamžiku během zkoušky,
- počáteční měřená délka $L_0[mm]$ - měřená délka před zatížením,
- konečná měřená délka $L[mm]$ - měřená délka po přetržení zkušební tyče,
- prodloužení $\Delta L[mm]$ - přírůstek počáteční měřené délky (L_0) v každém okamžiku zkoušky; $\Delta L = L - L_0$
- poměrné prodloužení vyjádřené v %, počáteční měřené délky (L_0) ;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

- smluvní napětí – pevnost v tahu $\sigma_M [MPa]$ poměr zátěžné síly F a počátečního průřezu zkušební tyče S_0 ;

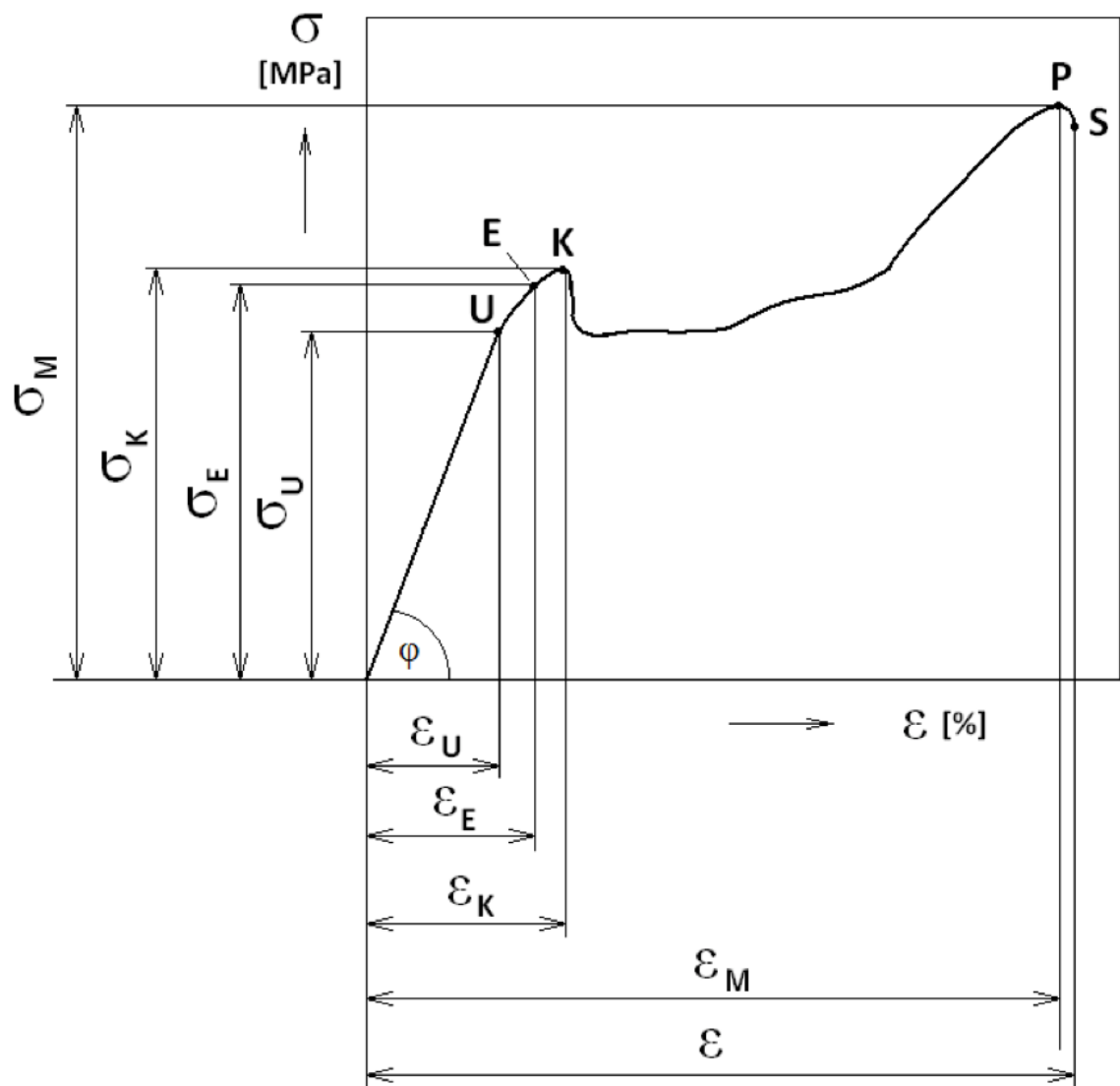
$$\sigma_M = \frac{F}{S_0} \quad [MPa] \quad (4)$$

- trvalé prodloužení ΔL - přírůstek počáteční měřené délky zkušební tyče po odlehčení příslušného napětí vyjádřené v % počáteční měřené délky (L_0),
- největší zatížení (F_m) – největší zatížení, které je zaznamenáno v průběhu zkoušky po dosažení meze kluzu,

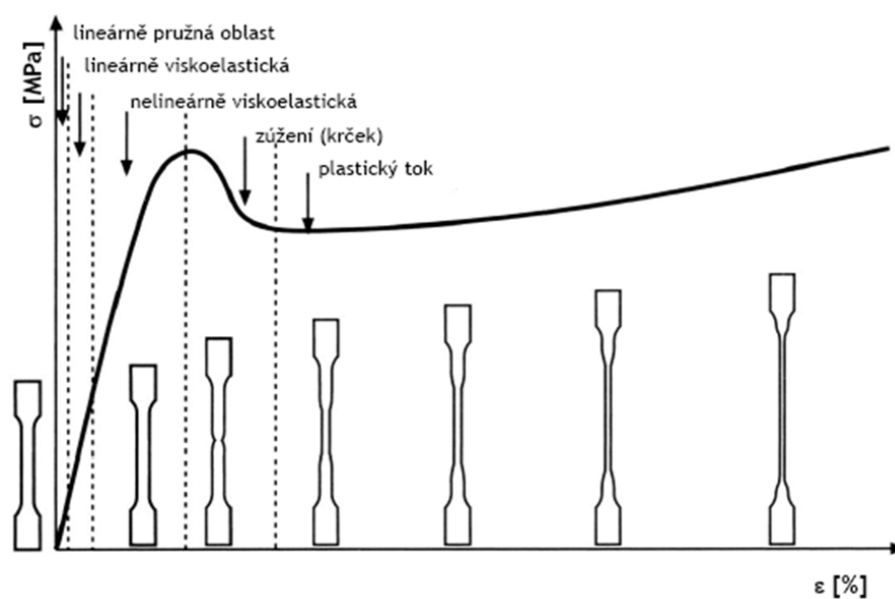
- napětí – poměr zatížení v okamžiku během zkoušky k ploše počátečního příčného průřezu (S_0) zkušební tyče,
- Zkoušená délka L_c [mm] – délka zúžené části zkušební tyče se stálou plochou příčného průřezu,

3.5 Napět'ové charakteristiky

Pracovní diagram nám vyznačuje několik důležitých bodů: U – mez úměrnosti σ_U , E – mez pružnosti σ_E , K – mez kluzu σ_K , P – mez pevnosti (pevnost v tahu) σ_M , S – napětí při přetržení. Bodům σ_U , σ_E , σ_K , σ_M , S odpovídají hodnotám deformace ε_u , ε_e , ε_k , ε_m , ε . [8]



Obr. 8. Pracovní diagram pro zkoušku tahem



Obr. 9. Chování zkušebního tělesa při tahové zkoušce [8]

Mez úměrnosti – mezní napětí, pro které platí úměrnost mezi napětím a celkovou deformací. Je to bod na křivce, do kterého platí hookovské chování materiálu, a vyjadřuje se smluvním napětím. [8]

$$\sigma_U = \frac{F_U}{S_0} \quad [MPa] \quad (5)$$

Mez úměrnosti – Po překročení meze úměrnosti vzrůstá deformace zkušebního tělesa rychleji než příslušné napětí. Přestane-li v určitém okamžiku napětí působit, deformace okamžitě zcela nevymizí. Po okamžitém vymizení ideálně elastické deformace zůstává ještě deformace viskoelastická neboli zpožděně elastická, jejíž vymizení je časově závislé. Působí-li napětí delší dobu, dochází k částečné nastické deformaci, dokonale nevratné. [8]

$$\sigma_E = \frac{F_E}{S_0} \quad [MPa] \quad (6)$$

Mez kluzu – napětí, při kterém se zkoušený materiál začíná plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací je dán typem materiálu. Mohou se vyskytovat následující závislosti $F - \Delta L$.

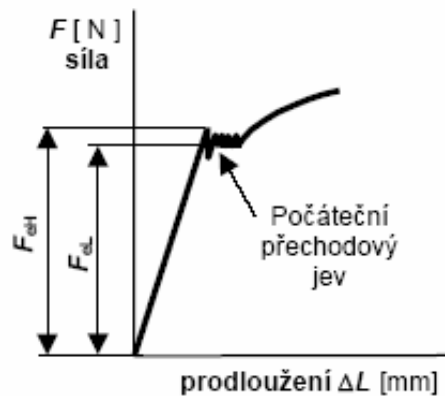
$$\sigma_K = \frac{F_K}{S_0} \quad [MPa] \quad (7)$$

Horní mez kluzu – bod na křivce, do kterého se zvyšovalo prodloužení se stoupajícím napětím. Za touto horní mezí se dále zvyšuje deformace, přičemž napětí poklesne. Pokles napětí pokračuje až k dolní mezi kluzu. Deformace přestává být homogenní. V jednom místě tělesa se vytvořilo tenčí místo nazývané krček. Krček má menší průřez nežli původní vzorek a v souvislosti s tím napětí v této oblasti protažení klesá, protože průřez krčku se zmenšuje. Současně však dochází k orientaci molekul v místě krčku a tím se jeho odpor proti deformaci zvětšuje. Postupně dosáhne deformační zpevnění krčku takového stupně, že jeho tuhost je větší než tuhost neprodloužené části tělesa. Proto se průřez krčku již téměř nemění a dochází k prodloužení částí tělesa, při němž se délka krčku zvětšuje. [6,7,8]

$$\sigma_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [MPa] \quad (8)$$

Dolní mez kluzu – tento bod udává na křivce kam až pokračuje pokles napětí při dalším prodlužování vzorku. Od tohoto bodu napětí opět stoupá, protože bylo celé těleso zpevněno orientací. Dochází k homogennímu protahování tělesa.

$$\sigma_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad [MPa] \quad (9)$$



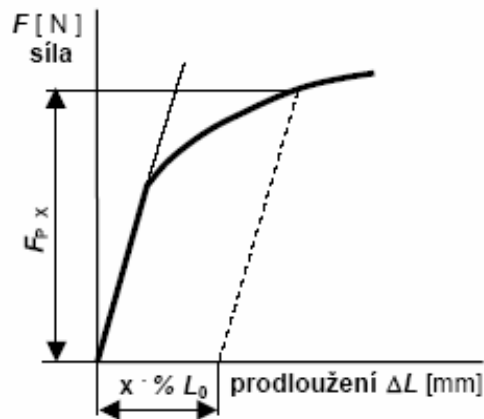
Obr. 10. Graf mezí kluzu

Smluvní mez kluzu – stanovuje se v případech, kdy zkoušený materiál nemá mez kluzu. Se stanovuje graficky jako průsečík křivky „síla – prodloužení“ s přímkou vedenou rovnoběžně s počáteční přímkovou částí této křivky a vytínající na ose úseček prodloužení odpovídající poměrnému prodloužení, např. 1%

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_0} \quad [MPa] \quad (10)$$

Napětí, při kterém plastické prodloužení zkušební tyče dosáhne předepsané hodnoty vyjádřené v % počáteční měřené délky L_0 . Symbol x v označení meze kluzu znamená násobek % počáteční měřené délky L_0 . Příklad: $R_{p0,2}$ je napětí způsobující plastickou deformaci o velikosti

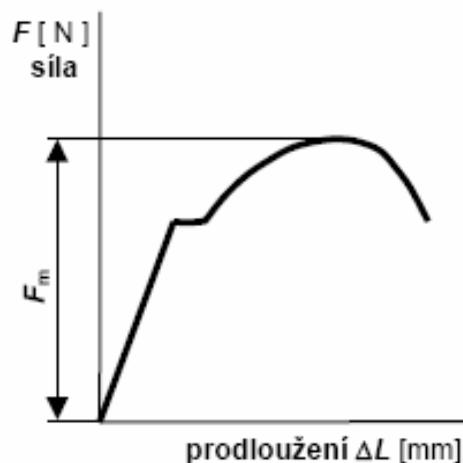
$$0,2 = \frac{L_0}{100}$$



Obr. 11. Graf Smluvní mez kluzu

Pevnost v tahu je napětí odpovídající největšímu zatížení F_{\max} .

$$\sigma_M = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [MPa] \quad (11)$$



Obr. 12. Graf pevnosti v tahu

Modul pružnosti odráží tuhost vazeb mezi atomy a charakterizuje odolnost materiálu vůči elastické deformaci.

Lineární závislost mezi působícím napětím σ a elastickou deformací ε_{el} popisuje Hookeův zákon $\sigma = E \cdot \varepsilon_{el}$, kde konstantou úměrnosti je Youngův modul pružnosti v tahu E (E je měřítkem tuhosti a jeho převrácená hodnota je měřítkem poddajnosti v oblasti pružných

deformací). Hodnotu E je možno určit ze sklonu počátečního přímkového úseku tahového diagramu. [8]

Tažnost v % (A) - trvalé prodloužení měřené délky po přetržení ($L - L_0$), vyjádřené v % počáteční měřené délky (L_0). Většinou se řeší u kovů.

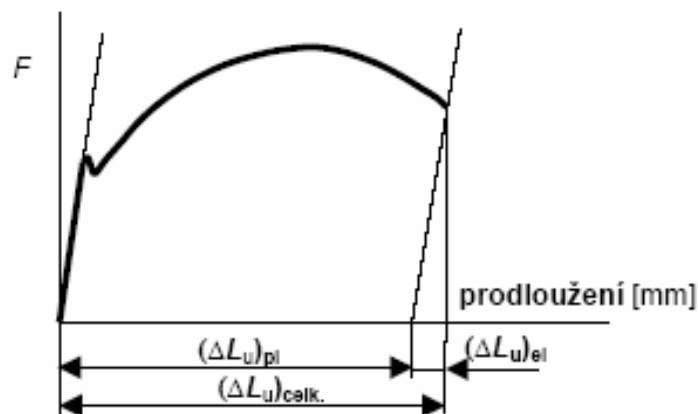
Tažnost může být určena několika způsoby :

- Přímým zjištěním konečné měřené délky L_u po přetržení zkušební tyče a výpočtem

$$\text{podle uvedeného vztahu} \quad A = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (12)$$

- Z tahového diagramu odečtením prodloužení (ΔL) zkušební tyče z počáteční měřené délky L_0 na konečnou měřenou délku po přetržení L a výpočtem podle vztahu

$$A = \frac{(\Delta L)}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$



Obr. 13. Graf prodloužení

Kontrakce v % (Z) – největší změna příčného průřezu po přetržení zkušební tyče ($S_0 - S$) vyjádřená v procentech počátečního příčného průřezu (S_0)

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (14)$$

$S [mm^2]$ je nejmenší plocha příčného průřezu zkušební tyče po přetržení. [5, 6, 7]

CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této práce je vyhodnotit výsledky tahových zkoušek polymerních materiálů, získané vypálením vzorků z plastu na laseru ILS 3.

Výsledky zkoušek budou vyhodnoceny a porovnány. Na základě tohoto porovnání budou stanoveny a zformovány příslušné závěry pro jednotlivá měření.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU PMMA

Pro své optické vlastnosti podobné vlastnostem skla bývají akryláty nazývané také organická nebo akrylátová skla. Česká verze "plexisklo" je dnes běžně užívána plastikářskou veřejností pro označení akrylátových materiálů, nejčastěji polymethylmetakrylátu (PMMA). Vyrábí se blokovou polymerací methylmetakrylátu (lité plexisklo), nebo extruzí methylmetakrylátu (extrudované plexisklo). Oba způsoby vedou k čirým materiálům. Bloková polymerace slouží především pro výrobu bloků a desek, případně polotovarů jiných tvarů. Použijeme-li rotační formy, můžeme tímto postupem vyrábět také trubky. Blokovou polymerací se dosahuje vysokých hodnot polymeračního stupně. Tím se zlepšují mechanické vlastnosti desek a zejména kvalita jejich povrchu. Extrudované plexisklové desky mají oproti litým plexisklovým deskám lepší tloušťkovou toleranci a jsou méně finančně náročné.

Modul pružnosti PMMA vyniká především vysokou tuhostí. Jeho modul pružnosti v tahu leží mezi 2300 až 3300 MPa. Vlivem zvyšování teploty ztrácí PMMA tuhost obdobně jako ostatní termoplasty. To znamená, že modul pružnosti se vzrůstající teplotou klesá. Ukazuje se, že pokles tuhosti se vzrůstající teplotou je tím pomalejší, čím je molární hmotnost vyšší. Se vzrůstající teplotou pevnost PMMA klesá obdobně jako u ostatních termoplastů. Rázová a vrubová houževnatost není ve srovnání s ostatními termoplasty nijak veliká. Obdobně jako u polystyrénu nezávisí prakticky na teplotě, to znamená, že i při vyšších teplotách si PMMA uchovává svůj křehký charakter. To vyplývá i z jeho malé tažnosti, která činí jen 2-4 %.

Vyniká optickými vlastnostmi. Je bezbarvý, čirý a viditelné světlo téměř nepohlcuje. Jeho propustnost pro světlo činí 92 % a index lomu je 1,491. Má nejvyšší propustnost světla ze všech plastů. Propustnost lze zachovat i při vybarvení PMMA transparentními barvivy. Rovněž povrchový lesk je vynikající. Desky z PMMA pohlcují ultrafialové světlo. Stačí deska o tloušťce 2 mm, aby došlo k pohlcení veškerého UV záření.

Odolává slabým kyselinám a louhům, roztokům solí, alifatickým uhlovodíkům, nepolárním rozpouštědlům, tukům, olejům, vodě, detergentům. Je napadán silnými kyselinami a louhy, benzenem, polárními rozpouštědly, ketony, estery, étery, aromatickými a chlorovanými uhlovodíky. Je náchylný ke korozi za napětí. To snižuje jeho použitelnost při zvýšených teplotách nebo při dlouhodobém styku s rozpouštědly. [10]

Přednosti polymethylmetakrylátu jsou následující:

- vysoká tvrdost, tuhost a pevnost
- vysoká kvalita povrchu: vysoký lesk, odolnost proti poškrábání, možnost leštění
- homopolymery jsou křehké, kopolymery houževnaté
- výborné optické vlastnosti, především vysoká průzračnost; kopolymery jsou mírně nažloutlé
- vysoká tepelná odolnost Výrobky lze dlouhodobě trvale používat až do teplot 70-100 °C
- dobré elektrické a dielektrické vlastnosti
- odolnost proti slabým kyselinám a louhům, nepolárním rozpouštědlům, tukům, olejům a vodě
- vysoká odolnost proti povětrnostnímu stárnutí
- lze jej dobře zpracovávat i následně mechanicky opracovávat

K nevýhodám patří:

- náchylnost k prasknutí při nárazu
- Hořlavost - Hoří svítivým plamenem i po oddálení zdroje plamene. Plyny uvolňované při hoření mají typický nasládlý zápach.

PMMA nalézá uplatnění všude tam, kde se využijí jeho přednosti, zejména optické, tedy vysoká průhlednost. Vyrábějí se z něj různé průhledné kryty, kryty svítlen, displejů. Značné rozšíření uplatnění našel v automobilovém průmyslu při výrobě krytů světel, tachometrů atd. V optice našel uplatnění jako surovina pro výrobu čoček do přístrojů i brýlí. Ve spotřebním průmyslu jsou to vázy, misky, bižuterní výrobky, reklamní předměty, reklamní stojánky. Významné místo zaujímá ve světelné reklamě a výstavnictví. Další uplatnění PMMA nachází jako akrylátového sanitárního zboží. Tepelným tvarováním desek se vyrábějí moderní vany, umývadla, sprchové kouty atd. [10]

5 POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

Pro cíl práce jsou použity ve školních dílnách laser ILS 3NM k přípravě zkušebních vzorků a provedení samotné tahové zkoušky pak probíhalo na trhačím stroji ZWICK ROELL 1456.

5.1 Plotrový laser ILS 3NM

Značící laserový systém ILS 3NM je zařízení vhodné pro značení a řezání. Připojuje se stejně jednoduše jako laserová tiskárna. Zdrojem laserového záření je CO_2 v několika výkonových variantách. Splňuje podmínky pro zařazení do třídy bezpečnosti 1. Výhodou tohoto zařízení je již připevněný pojezdový stůl a otevírací čelní dvířka. Ty slouží pro značení nekonečně dlouhých desek. Laser může pracovat pomocí softwaru Corel Draw nebo AutoCAD. Se strojem lze popisovat, gravírovat a řezat širokou škálu materiálů, například plasty, pryž, kůži, sklo, povlakovaný kov, kámen, dřevo, keramiku. Technické parametry zařízení jsou obsaženy (Tab. 1).



Obr. 14. Laser ILS 3NM

Tab. 1: Technické parametry plotrového laseru ILS 3NM

Laser ILS 3NM	
Výkon	100W
Vnější rozměry	900(D) x 865(H) x 990(V)
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 panel zobrazuje	seznam vzorů, síla laseru, gravírovací rychlost, čas průběhu, načtené soubory, nastavení a diagnostiku stroje
Napájení	~110 / ~240 V
Chlazení	Vzduchové

5.2 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Zařízení nám dovoluje zkoušku tahem, tlakem a ohybovou zkoušku. K ovládání stroje, ukládání a vyhodnocování dat získaných ze zkoušek slouží osobní počítač, který je součástí stroje a obsahuje software Test Xpert. Pro provedení zkoušky za zvýšené nebo snížené teploty je zařízení vybaveno temperační komorou, která je v případě potřeby instalována posunutím po kolejnicích. Technické parametry stroje můžeme shlédnout (Tab. 2).



Obr. 15 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Tab. 2: Technické parametry zkušebního stroje

ZWICK ROELL 1456	
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 mm
Maximální zkušební síla	20 kN
Maximální rychlost posuvu příčnicku	750 mm.min ⁻¹
Extenzometry měření protažení	macro
	přídavný
Vyhodnocovací software	master – tah
	standard – ohyb a tlak
	standardní hysterzní (cyklické) zkoušky

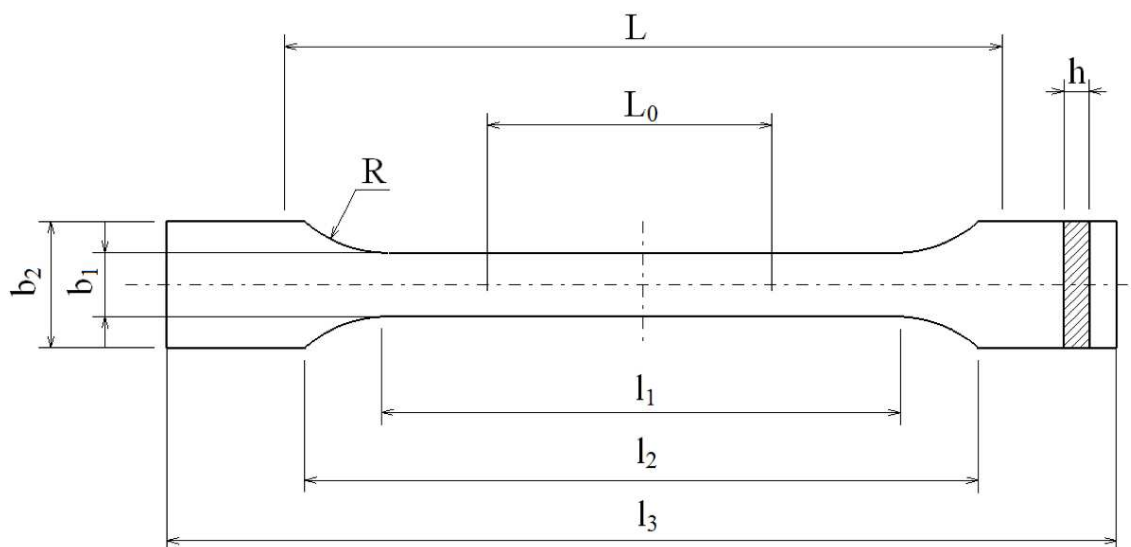
6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ Z PMMA

Zkušební vzorek použitý pro experiment byl vyroben z běžně dostupného konstrukčního materiálu PMMA ve formě desky. Normalizovaná tělesa pro zkoušku tahem jsou uvedena v normě ČSN EN ISO 527. Všechna zkušební tělesa musí být předem zkontrolována jestli neobsahují žádnou viditelnou vadu, vryp nebo jiné nedostatky.

K návrhu zkušebního tělesa jsem použil program AutoCAD, kde podle normy ČSN EN ISO 527, zvolen Typ 1A. Díky delší měřené části je snadnější urči poměrné prodloužení a deformaci u zvoleného materiálu PMMA, který se vyznačuje svou křehkostí a malou deformací.

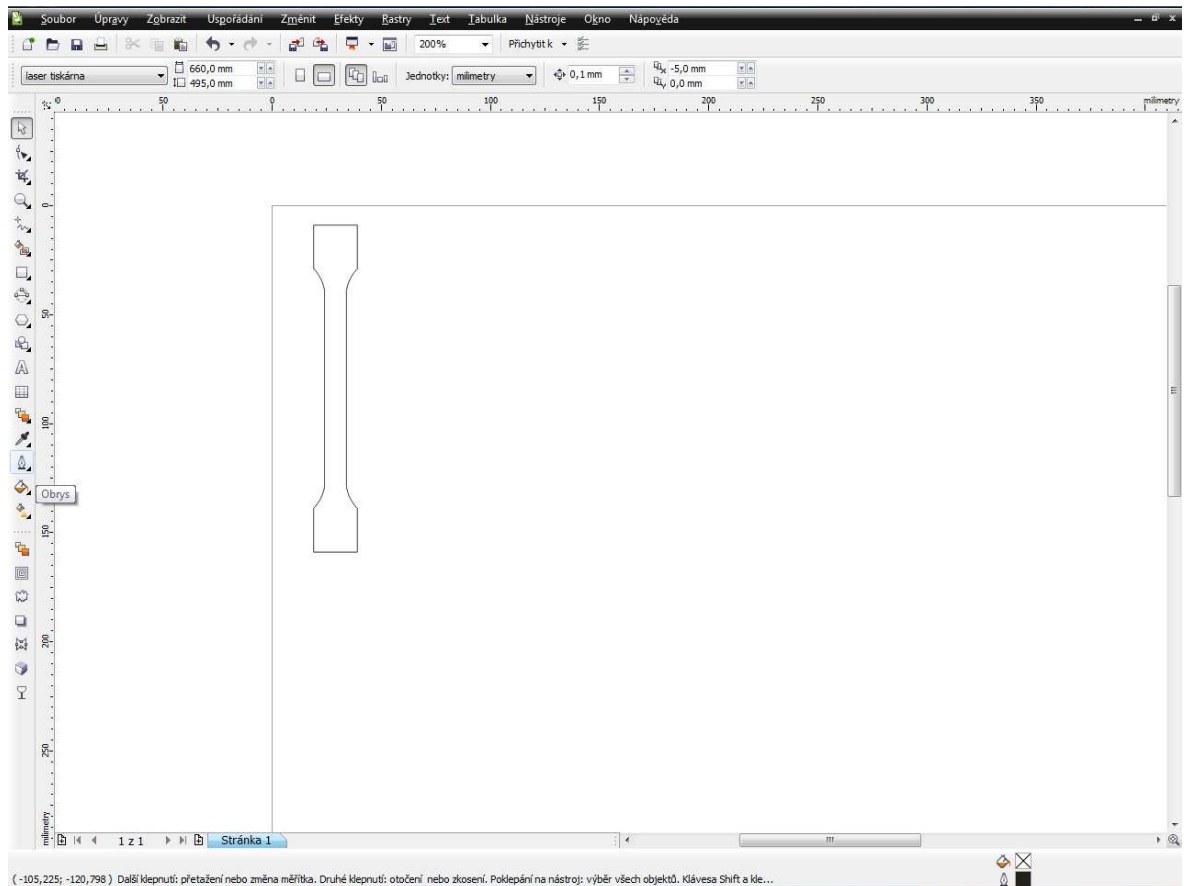
Tab. 3: Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku [11]

Zkušební těleso			
Rozměry [mm]			
	Druh rozměru	Typ 1A	Typ 1B
b ₁	Šířka pracovní části	10 ± 0,2	
b ₂	Šířka upínací části	20 ± 0,2	
l ₁	Délka měřené části	80 ± 2	60 ± 0,5
l ₂	Rozpětí mezi širokými částmi	104 až 113	106 až 120
l ₃	Celková vzdálenost	≥ 150	
L ₀	Počáteční měřená délka	50 ± 0,5	
L	Počáteční vzdálenost čelistí	115 ± 1	$l_{2_0}^{+5}$
h	Tloušťka	4 ± 0,2	
R	Poloměr	20 až 25	≥ 60



Obr. 16. Rozměry zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku [8]

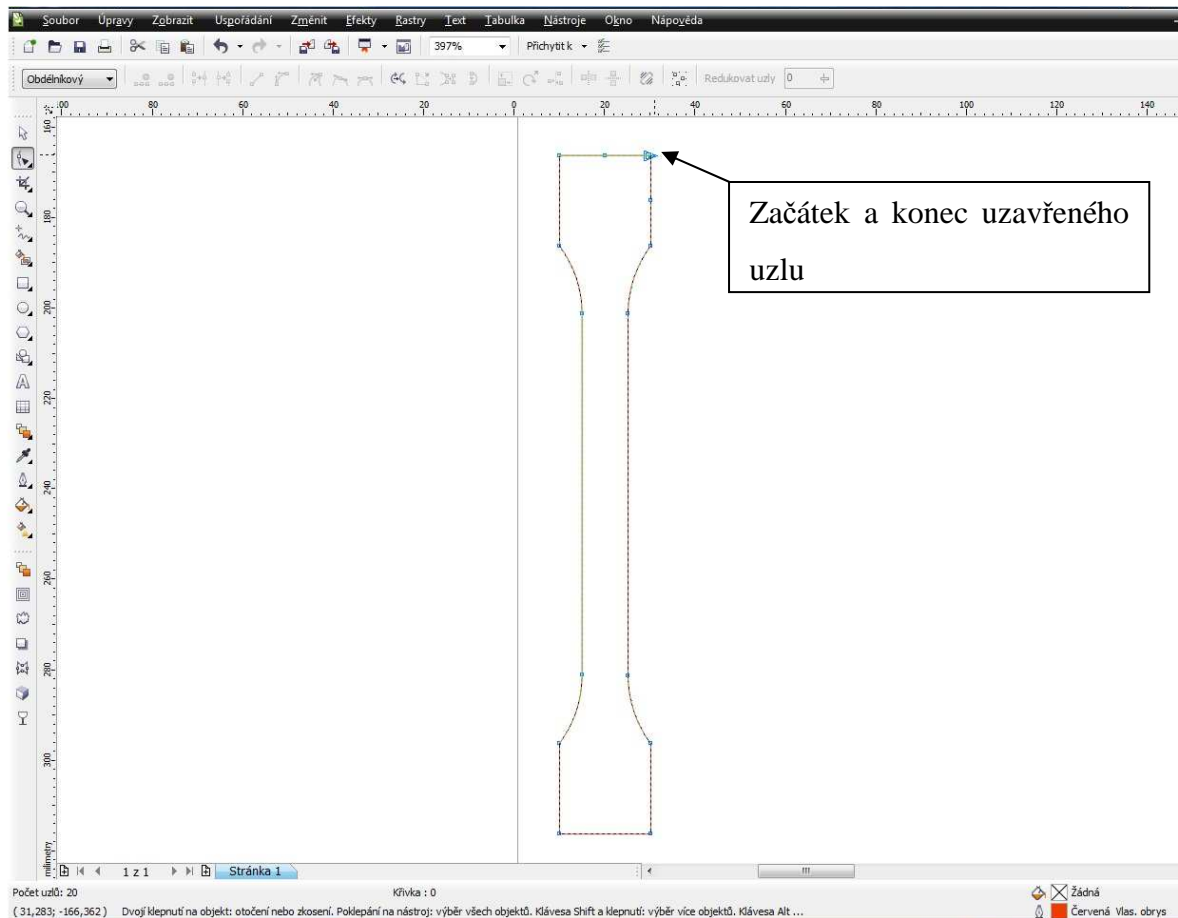
Laserové zařízení ILS 3NM je ovládáno přes počítač pomocí softwaru Corel Draw, ale nejdříve bylo potřeba v programu AutoCAD narýsovat a brát v úvahu opal laseru, který činil 0,09 mm na každé straně. Celkový opal tedy byl 0,18 mm. Soubor vytvořený v AutoCADu lze otevřít v Corel Draw při zachování všech rozměrů (Obr. 17).



Obr. 17. Importované zkušební těleso do Corel Draw

K provedení operace je třeba v Corel Draw definovat pracovní plochu laseru a po té do ní vložit tvar polotovaru, ze kterého budeme řezat zkušební tělesa. Je třeba mýt na mysli priority postupu laseru při vyřezávání a to je nejprve řezání rovných čar a po té oblouků. Před umístěním zkušebních vzorků do polotovaru musíme uzavřít celý objekt tak, aby paprsek laseru vyřezal celé zkušební těleso jako jednu souvislou čáru. Nemůže pálit obrys po jednotlivých úsecích rozdělených do čar (přímky, oblouky). Při vypalování tvaru po jednotlivých úsecích by docházelo ke zchladnutí materiálu. V důsledku toho by v těchto místech vznikaly vruby.

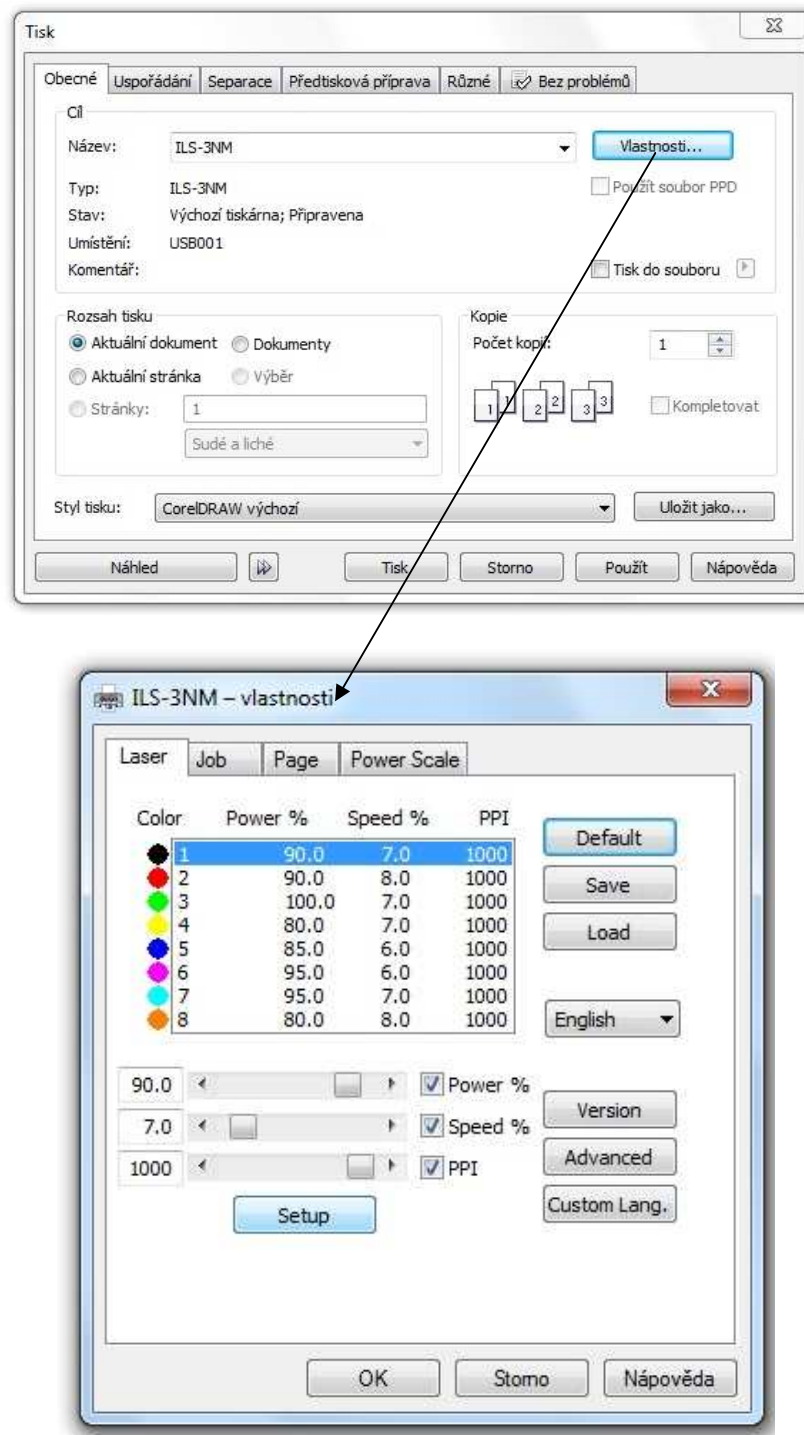
Je za potřebí nadefinovat tvar zkušebního tělíska, tak aby začátek a konec křivky, která určuje tvar vzorku, byl umístěn v části, která nemá vliv na tahovou zkoušku. Modrá šipka viz (Obr 18) značí směr řezu dráhy paprsku laseru.



Obr. 18. Vzorek jeden uzel

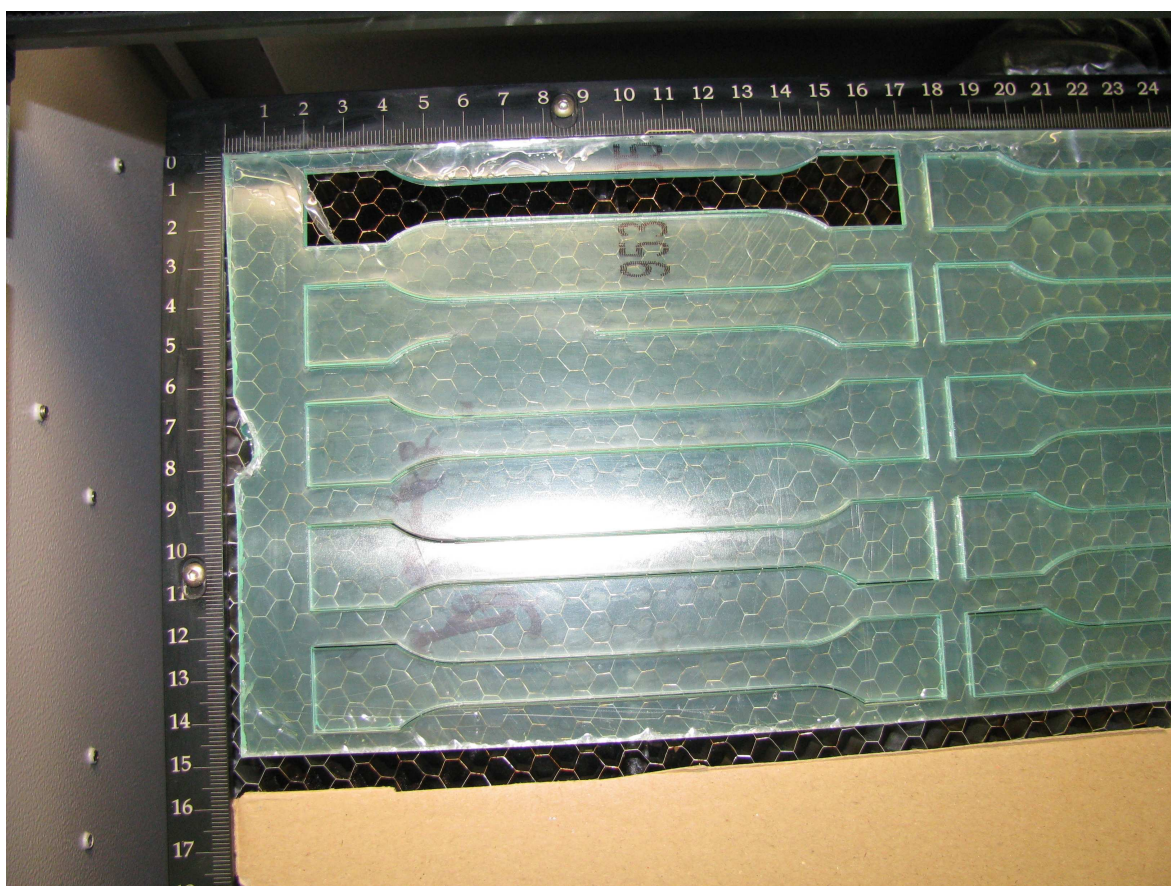
K propálení zvoleného materiálu PMMA zadávám řezné podmínky do tabulky. Kde se nachází nastavení výkonu v % a rychlosti posuvu laseru v %. V tabulce je také možné nastavit pro každou hladinu řezné podmínky (výkon a řezná rychlost). Podobně jako v AutoCADu je každá hladina určena barvou.

V pro PMMA o tloušťce 4mm jsem volil výkon laseru $P : 100\%$ a rychlost posuvu $v : 7\%$ z maximální strojem dosažitelné rychlosti posuvu. Pro porovnání chování vzorku pak ještě o 80% výkon laseru a 6% posuvu. Jiné řezné podmínky jsem volil s ohledem na porovnání mechanických vlastností. Zařízení ILS 3NM pracuje na stejném principu jako tiskárna, kde ve vlastnostech nastavujeme parametry laserového paprsku (Obr. 19).



Obr. 19. Nastavení řezných podmínek laseru

Po nastavení všech předešlých parametrů provádím kalibraci laserového zařízení fokusací čočky laseru podle návodu přiloženém ke stroji. A posílám tiskový soubor do zařízení a spouštím operaci nejdříve na nečisto bez zapnutého laseru k odhalení případných nedostatků. Může dojít ke špatnému vložení materiálu pro řezání nebo zajetí laseru mimo pracovní plochu. Nyní docházím k vypalování zkušebních těles zobrazených (Obr 20).



Obr. 20. Konečná práce po vyřezání laseru ILS 3NM

7 PROVEDENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY A VYHODNOCENÍ

Vyhodnocení výsledků měření bylo uskutečněno za pomoci programu MINITAB s použitím těchto vztahů statistického vyhodnocování:

- **Aritmetický průměr** \bar{x} - hodnota popisující soubor mnoha hodnot. Je to součet všech hodnot vydělený jejich počtem. V bodovém grafu znázorněna (+)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

- **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. V bodovém grafu znázorněna (×)
- **Směrodatná odchylka** s - průměrná hodnota, o kterou se průměrně liší naměřené hodnoty od aritmetického průměru.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

- **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.

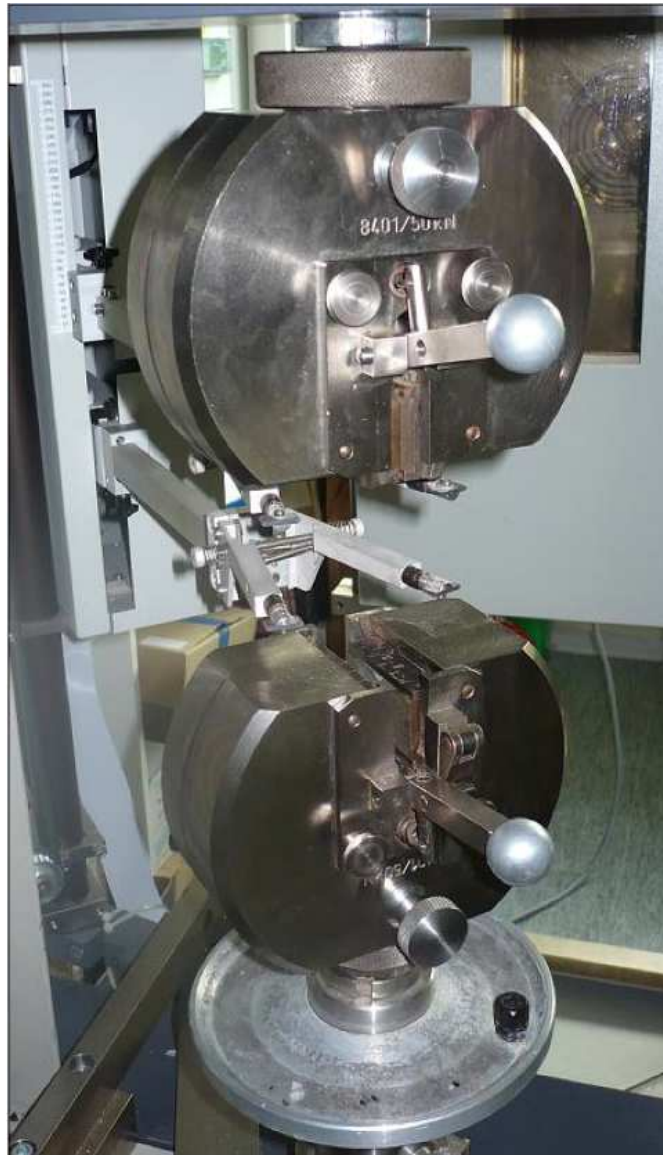
$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

- **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

7.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456. Měření probíhalo při pokojové teplotě 22°C. Zkušební tělesa byla namáhána jednoosým tahem, kde pro získání modulu pružnosti byla nastavena rychlost posuvu čelistí nastavena na $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Po získání modulu pružnosti se rychlost posuvu čelistí zvýšila na $10\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

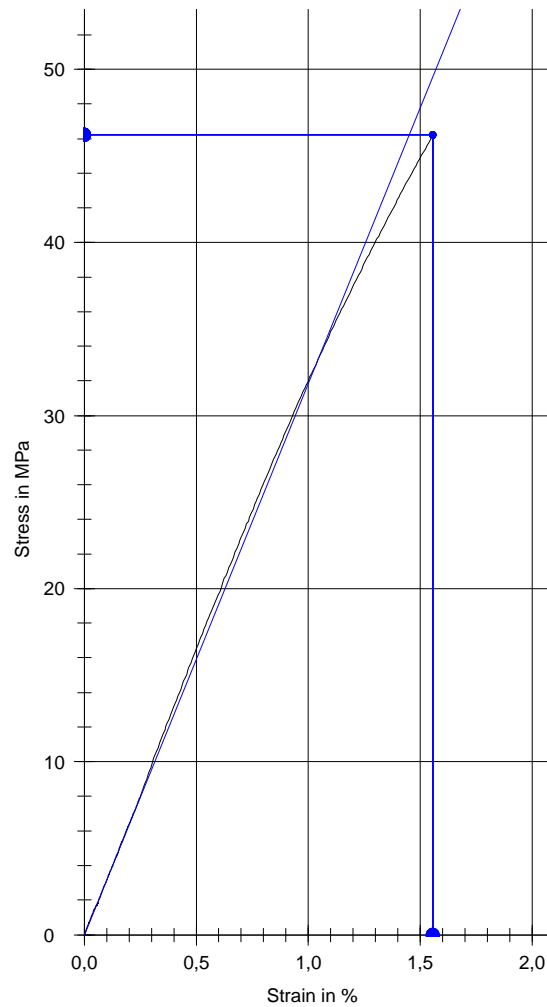
Součástí stroje je počítač, který naměřené data jednotlivých sérií vzorků okamžitě vyhodnotil a také graficky znázornil v grafu závislého zatěžujícího napětí na poměrném prodloužení.



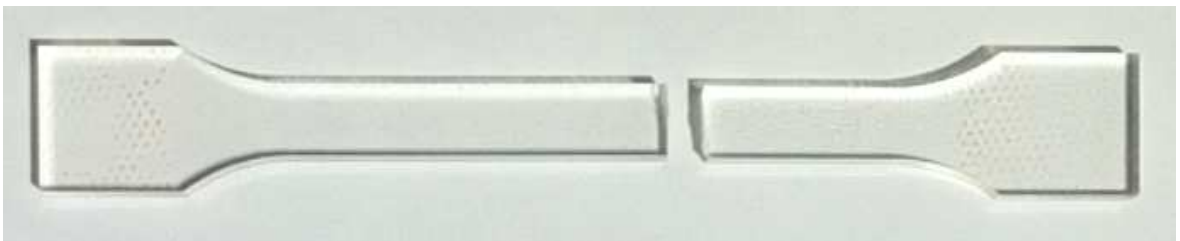
Obr. 21. Upínací čelisti ZWICK ROELL 1456

7.2 Vzorek dle normy typ 1A nezúžený

Měření 1: Zkušební těleso materiálu PMMA, typ 1A nezúžený, výkon laseru 100% rychlost posuvu 7%.



Obr. 22. Zkouška tahem nezúžený vzorek



Obr. 23. Přetržení vzorku typ 1A nezúžený

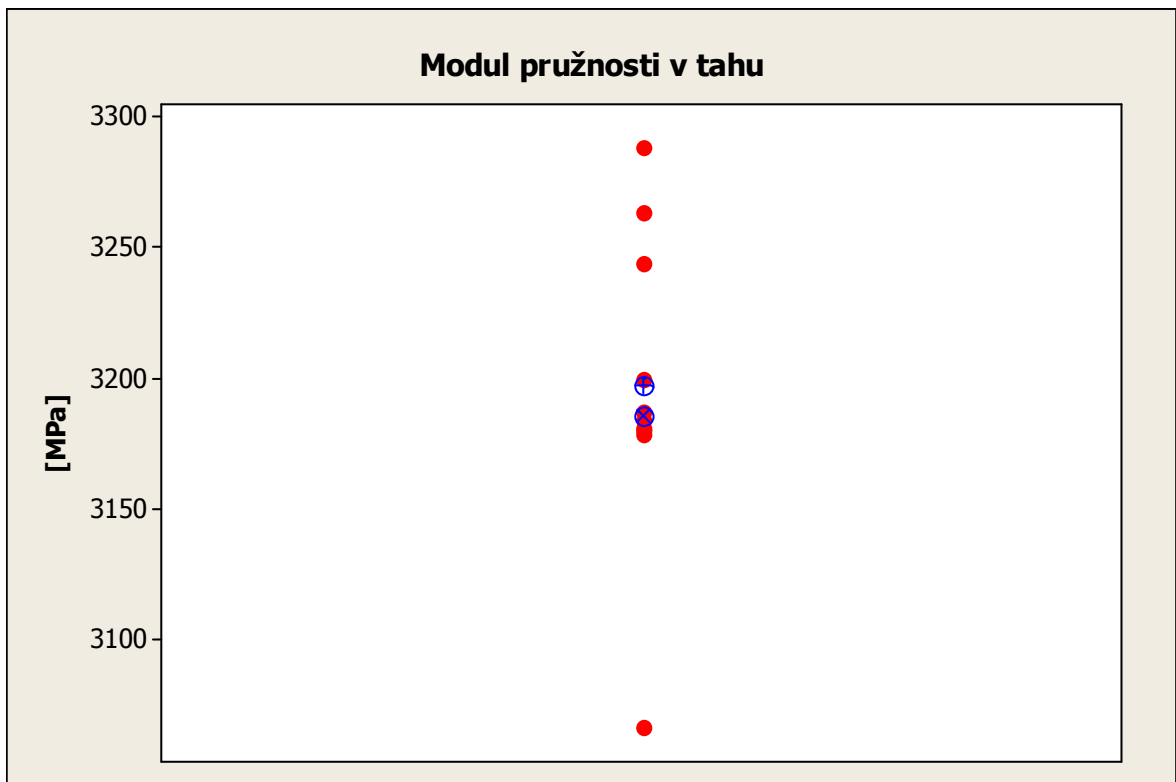
Tab. 4: Naměřené hodnoty vzorek nezúžený

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
1	3,85	9,97	27,95	1501,58	1,27	0,38	3181,29
2	3,86	9,96	28,52	1291,87	1,08	0,32	3187,14
3	3,86	9,96	46,22	1072,93	0,86	0,26	3200
4	3,87	9,95	41,96	1096,44	0,89	0,27	3244,01
5	3,82	10,01	43,98	1776,87	1,56	0,47	3184,06
6	3,85	9,97	39,51	1615,72	1,41	0,42	3263,24
7	3,83	9,94	43,32	1681,72	1,47	0,44	3288,38
8	3,82	9,95	30,77	1516,69	1,3	0,39	3067,24
9	3,85	10,08	38,69	1341,59	1,1	0,33	3180,54
10	3,88	9,98	33,36	1579,55	1,36	0,41	3178,79

Tab. 5: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek nezúžený

n=10	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	37,43	1447,5	1,2300	0,3690	3197,5
<i>M</i>	39,10	1509,1	1,2850	0,3850	3185,6
<i>u_A</i>	2,14	75,7	0,0756	0,0225	19,1
<i>s</i>	6,76	239,4	0,2390	0,0713	60,5
<i>R</i>	18,27	703,9	0,7000	0,2100	221,1
<i>x_{MIN}</i>	27,95	1072,9	0,8600	0,2600	3067,2
<i>x_{MAX}</i>	46,22	1776,9	1,5600	0,4700	3288,4

Z laboratorního měření číslo 1, na vzorku typu 1A nezúženém, materiálu PMMA a řezných parametrů laseru výkon 100% rychlost posuvu 7%, jsem vyhodnotil poměrnou deformaci při maximálním napětí aritmetický průměr 1,230% a medián 1,285%, což z výsledku mohu usoudit, že došlo k menšímu vychýlení hodnot. Jelikož aritmetický průmět je náchylný na vychýlené hodnoty. To nám dokazuje malý rozdíl aritmetického průměru vůči mediánu viz (Obr. 25).



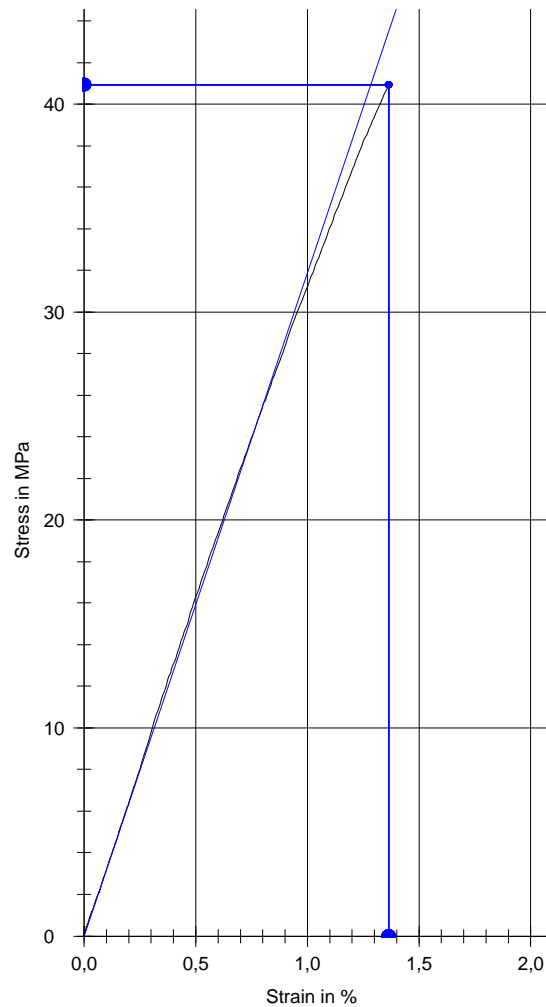
Obr. 24. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek nezúžený



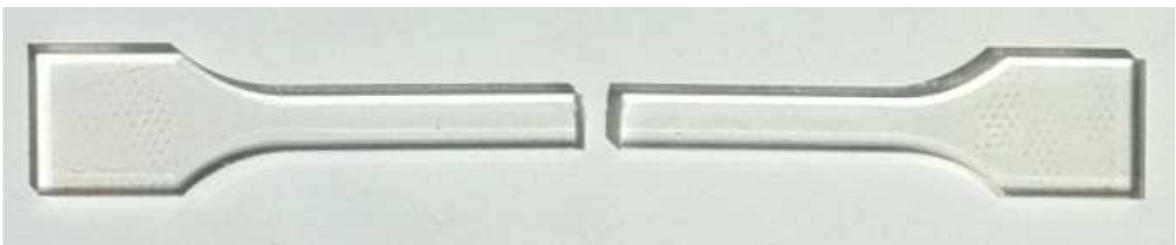
Obr. 25. Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí vzorek nezúžený

7.3 Vzorek dle normy typ 1A zúžený 8mm

Měření 2: Zkušební těleso typ 1A zúžený na šířku 8mm v pracovní části výkon laseru 100% rychlost posuvu 7%.



Obr. 26. Zkouška tahem zúžený vzorek 8mm



Obr. 27. Přetržení vzorku typ 1A zúžený na 8mm

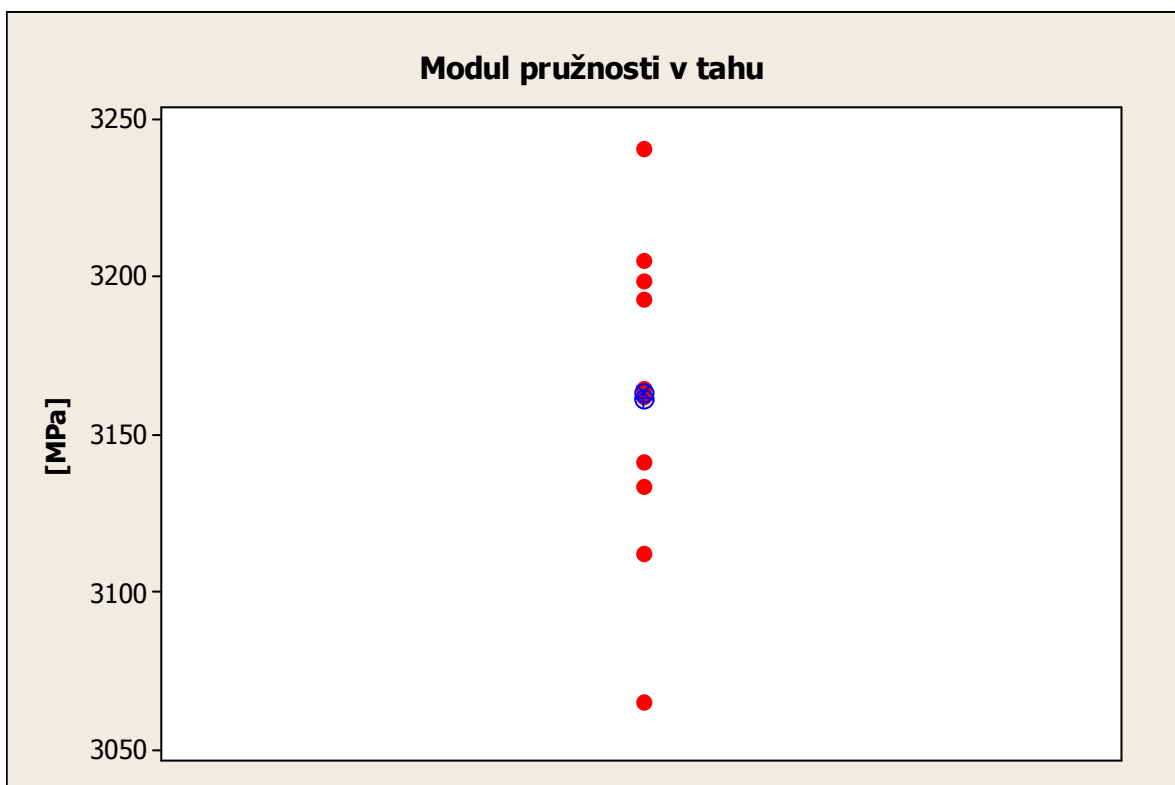
Tab. 6: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 8mm

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ_m [MPa]	F _m [N]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	ϵ_{Fm} [mm]	E [MPa]
1	3,97	7,94	42,05	1325,58	1,47	0,44	3161,65
2	3,95	7,94	40,59	1273,18	1,38	0,41	3205,2
3	3,97	7,95	39,74	1254,34	1,33	0,4	3198,81
4	3,97	7,93	40	1259,35	1,35	0,41	3112,23
5	3,96	7,96	40,93	1290,23	1,37	0,41	3192,88
6	3,96	7,96	40,15	1265,73	1,34	0,4	3164,4
7	3,94	7,95	42,01	1315,83	1,41	0,42	3141,37
8	3,95	7,97	40,24	1266,69	1,36	0,41	3133,55
9	3,96	7,97	41,97	1324,69	1,41	0,42	3240,89
10	3,98	8,04	39,04	1249,12	1,33	0,4	3064,98

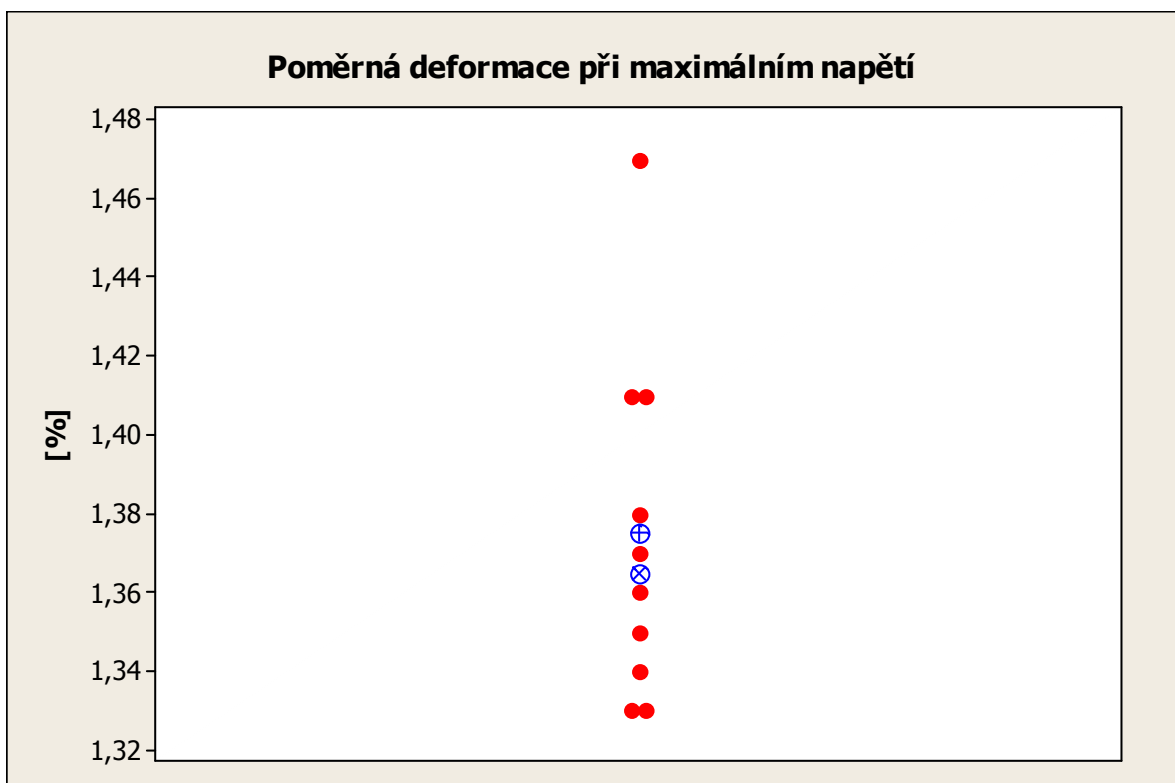
Tab. 7: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 8mm

n=10	σ_m [MPa]	F _m [N]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	ϵ_{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	40,672	1282,5	1,3750	0,41200	3161,6
M	40,415	1269,9	1,3650	0,3850	3163,0
u_A	0,331	9,35	0,00389	0,0225	16,2
s	1,048	29,6	0,0443	0,01229	51,1
R	3,010	76,5	0,1400	0,04000	175,9
x_{MIN}	39,040	1249,1	1,3300	0,40000	3065,0
x_{MAX}	42,050	1325,6	1,4700	0,44000	3240,9

Při vyhodnocení měření číslo 2, kde došlo ke zúžení pracovní části na 8mm, si můžeme všimnout malé chyby při měření meze pevnosti σ_m , kde aritmetický průměr vyšel 40,672MPa s nejistotou typu A, která je rovna 0,331 (Tab. 7).



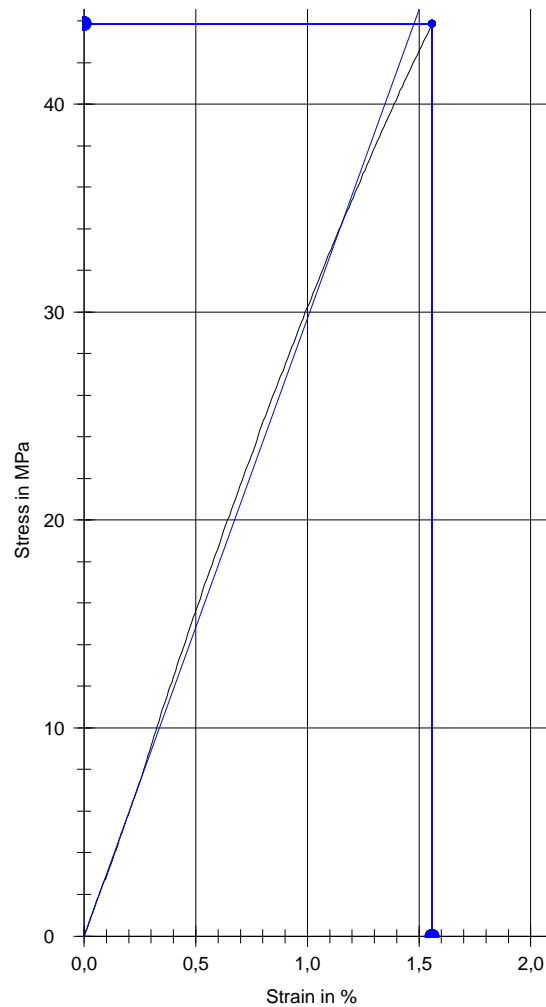
Obr. 28. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 8mm



Obr. 29. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 8mm

7.4 Vzorek dle normy typ 1A zúžený 6mm

Měření 3: Zkušební těleso typ 1A zúžený na šířku 6mm v pracovní části výkon laseru 100% rychlost posuvu 7%.



Obr. 30. Zkouška tahem zúžený vzorek 6mm



Obr. 31. Přetržení vzorku typ 1A zúžený na 6mm

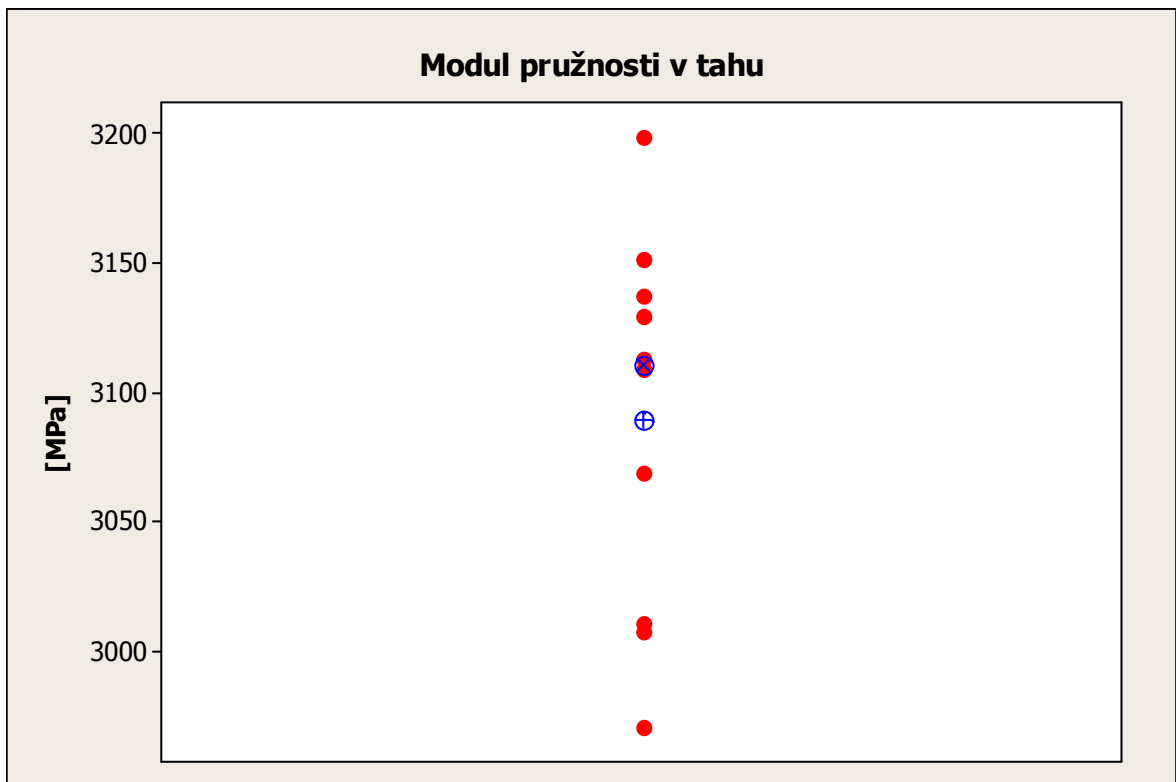
Tab. 8: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 6mm

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
1	3,96	5,98	43,34	1026,27	1,59	0,48	3007,91
2	3,96	5,92	43,5	1019,82	1,49	0,45	3137,69
3	3,96	5,92	50,99	1195,38	1,94	0,58	3069,14
4	3,97	5,92	43,86	1030,8	1,56	0,47	2971,37
5	3,95	5,93	41,86	980,6	1,44	0,43	3129,83
6	3,96	5,93	45,35	1064,98	1,67	0,5	3109,26
7	3,95	5,94	48,02	1126,75	1,74	0,52	3151,62
8	3,96	5,99	40,79	967,56	1,42	0,43	3113,08
9	3,95	5,95	40,51	952,15	1,38	0,42	3198,4
10	3,97	5,95	46,09	1088,8	1,75	0,52	3011,1

Tab. 9: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 6mm

n=10	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	44,43	1045,3	1,5980	0,4800	3089,9
<i>M</i>	43,68	1028,5	1,5750	0,4750	3111,2
<i>u_A</i>	1,04	23,9	0,0561	0,0161	23,0
<i>s</i>	3,29	75,7	0,1773	0,0508	72,9
<i>R</i>	10,48	243,2	0,5600	0,1600	227,0
<i>x_{MIN}</i>	40,51	952,1	1,3800	0,4200	2971,4
<i>x_{MAX}</i>	50,99	1195,4	1,9400	0,5800	3198,4

U měření číslo 3 se zmenšuje maximální síla k přetržení Tab. 9 a to je způsobeno zúžením šířky pracovní části na 6mm. Můžeme předpokládat, že s ubývající šířkou pracovní části se maximální síla k přetržení bude lineárně zmenšovat.



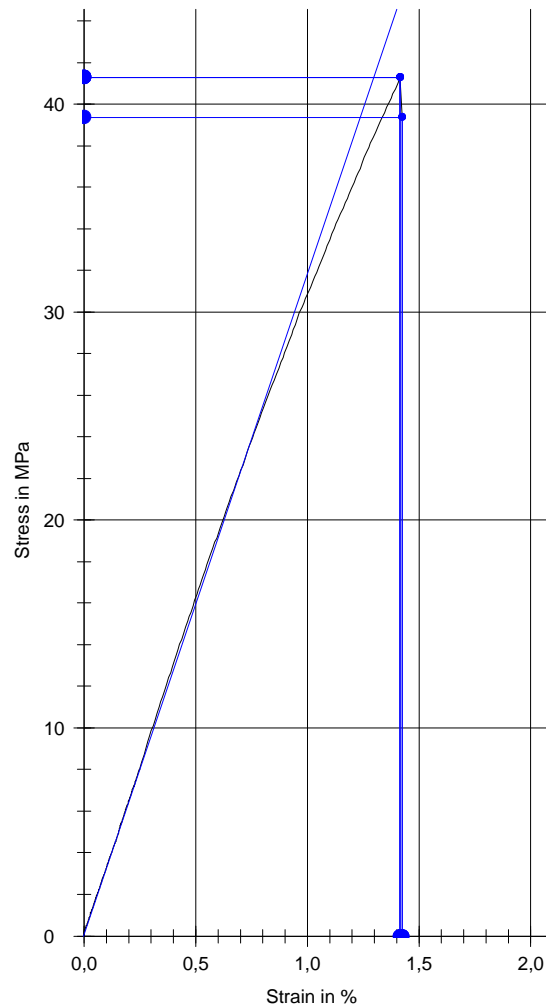
Obr. 32. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 6mm



Obr. 33. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 6mm

7.5 Vzorek dle normy typ 1A zúžený 4mm

Měření 4: Zkušební těleso typ 1A zúžený na šířku 4mm v pracovní části výkon laseru 100% rychlost posuvu 7%.



Obr. 34. Zkouška tahem zúžený vzorek 4mm



Obr. 35. Přetržení vzorku typ 1A zúžený na 4mm

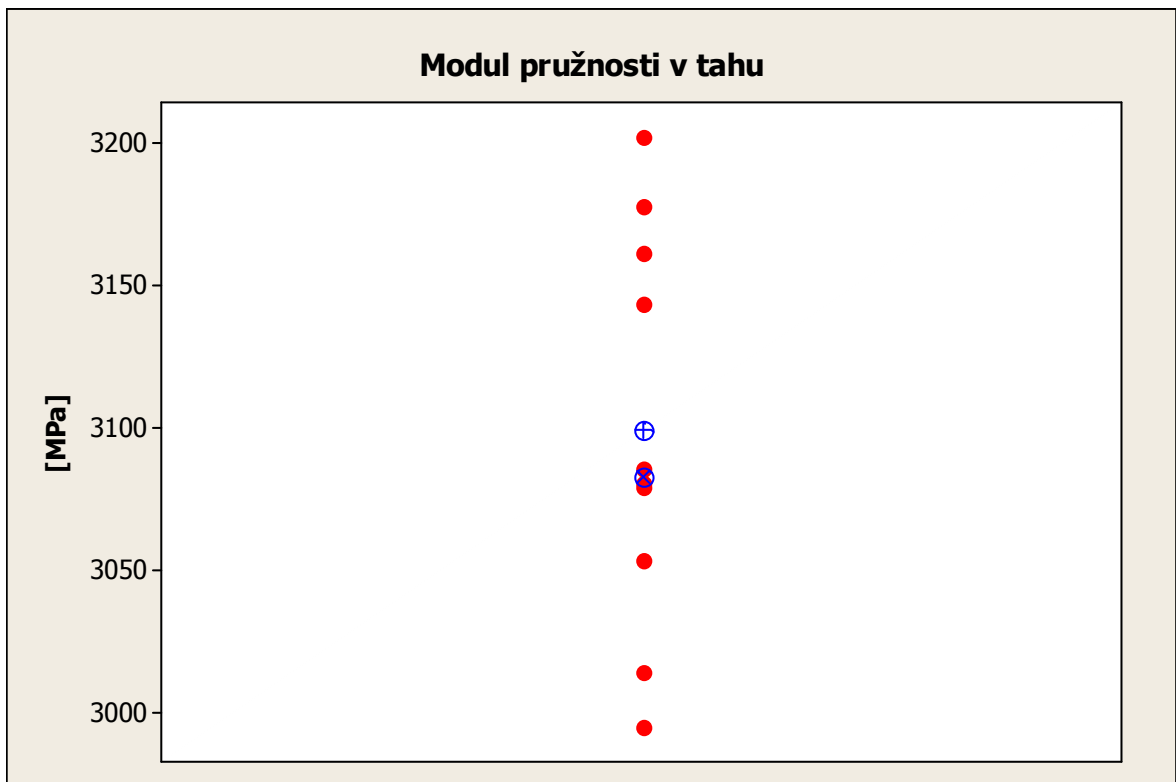
Tab. 10: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 4mm

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ_m [MPa]	F _m [N]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	ϵ_{Fm} [mm]	E [MPa]
1	3,94	3,95	51,76	805,48	1,98	0,6	3143,98
2	3,96	3,95	54,15	846,97	2,16	0,65	3085,68
3	3,96	4,01	37,75	599,51	1,27	0,38	3201,95
4	3,96	4,01	53,23	845,22	2,17	0,65	2995,57
5	3,94	3,96	40,67	634,62	1,43	0,43	3014,34
6	3,95	3,95	39,51	616,39	1,36	0,41	3079,57
7	3,93	3,99	41,27	647,11	1,42	0,43	3177,64
8	3,94	3,97	42,27	661,21	1,45	0,44	3080,97
9	3,96	3,94	39,57	617,39	1,41	0,42	3053,93
10	3,96	3,94	50,35	785,57	1,9	0,57	3161,33

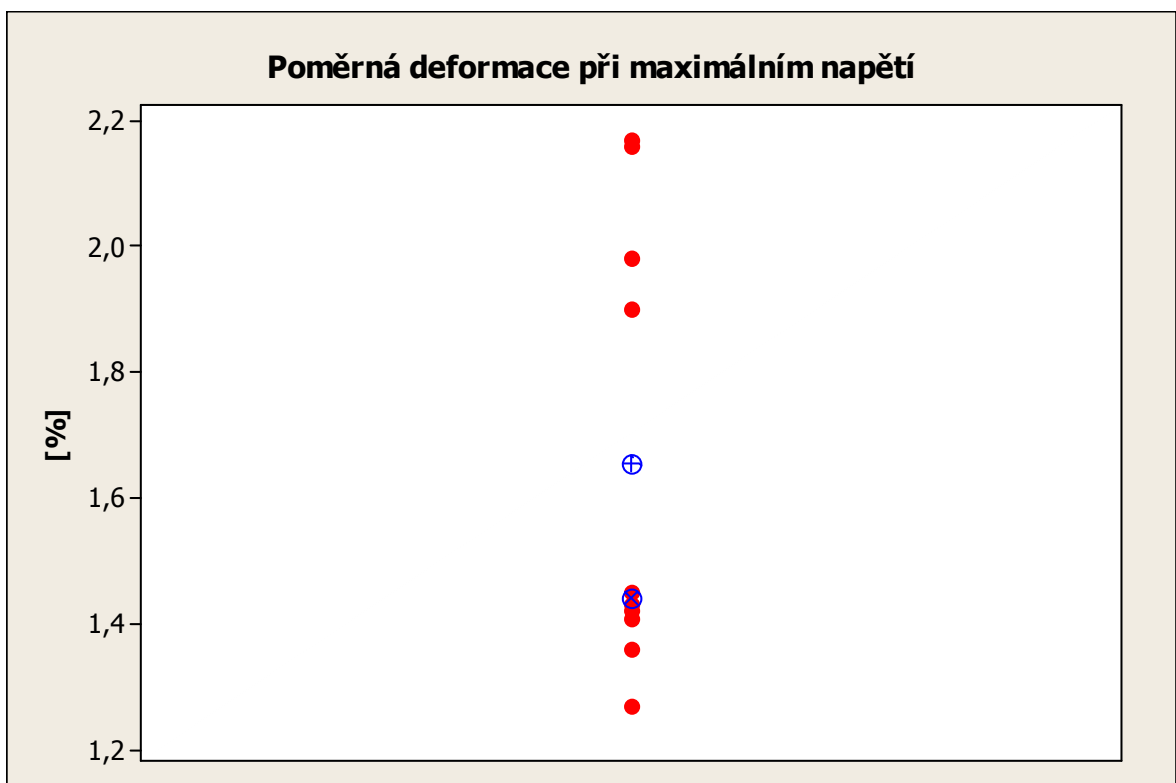
Tab. 11: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 4mm

n=10	σ_m [MPa]	F _m [N]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	ϵ_{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	45,05	705,9	1,655	0,4980	3099,5
M	41,77	654,2	1,440	0,4350	3083,3
u _A	2,05	32,2	0,112	0,0337	22,0
s	6,48	101,8	0,354	0,1065	69,5
R	16,40	247,5	0,900	0,2700	206,4
x _{MIN}	37,75	599,5	1,270	0,3800	2995,6
x _{MAX}	54,15	847,0	2,170	0,6500	3201,9

Se zužující šířkou pracovní části jsem očekával u měření číslo 4, změny meze pevnosti, modulu pružnosti a prodloužení. I když šířka pracovní části byla 4mm nemůžeme přesně konstatovat zda došlo ke změnám mechanických vlastností.



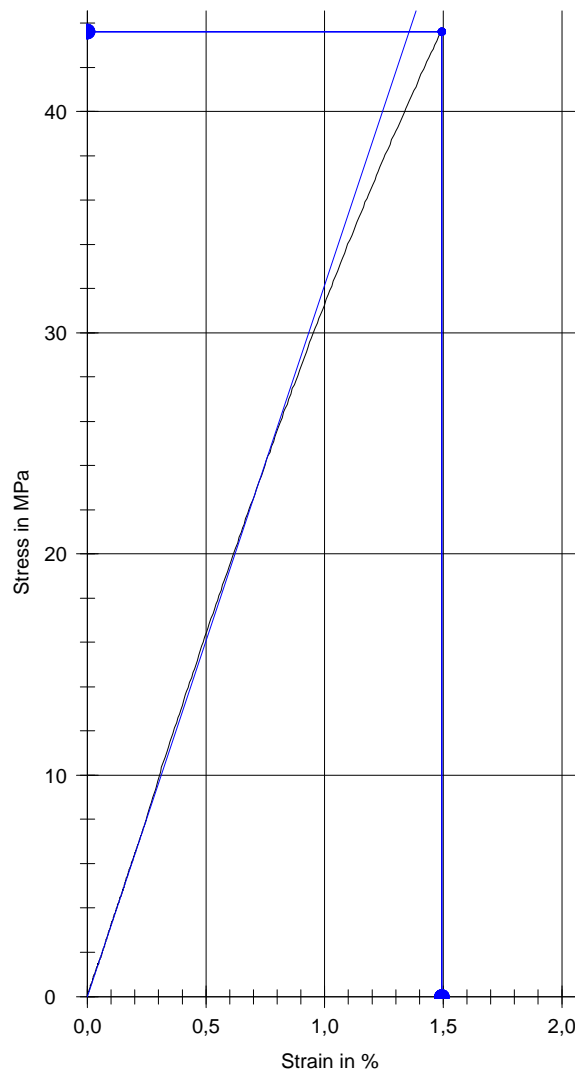
Obr. 36. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 4mm



Obr. 37. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 4mm

7.6 Vzorek typ 1A nezúžený optimální podmínky laseru

Měření 5: Zkušební těleso typ 1A nezúžený, výkon laseru 80% rychlost posuvu 6%. Došlo k optimálnímu stanovení poměru výkonu laseru a rychlosti posuvu pro řezání PMMA. Tato změna by se mohla projevit také na mechanických vlastnostech.



Obr. 38. Zkouška tahem nezúžený vzorek optimalizovaný

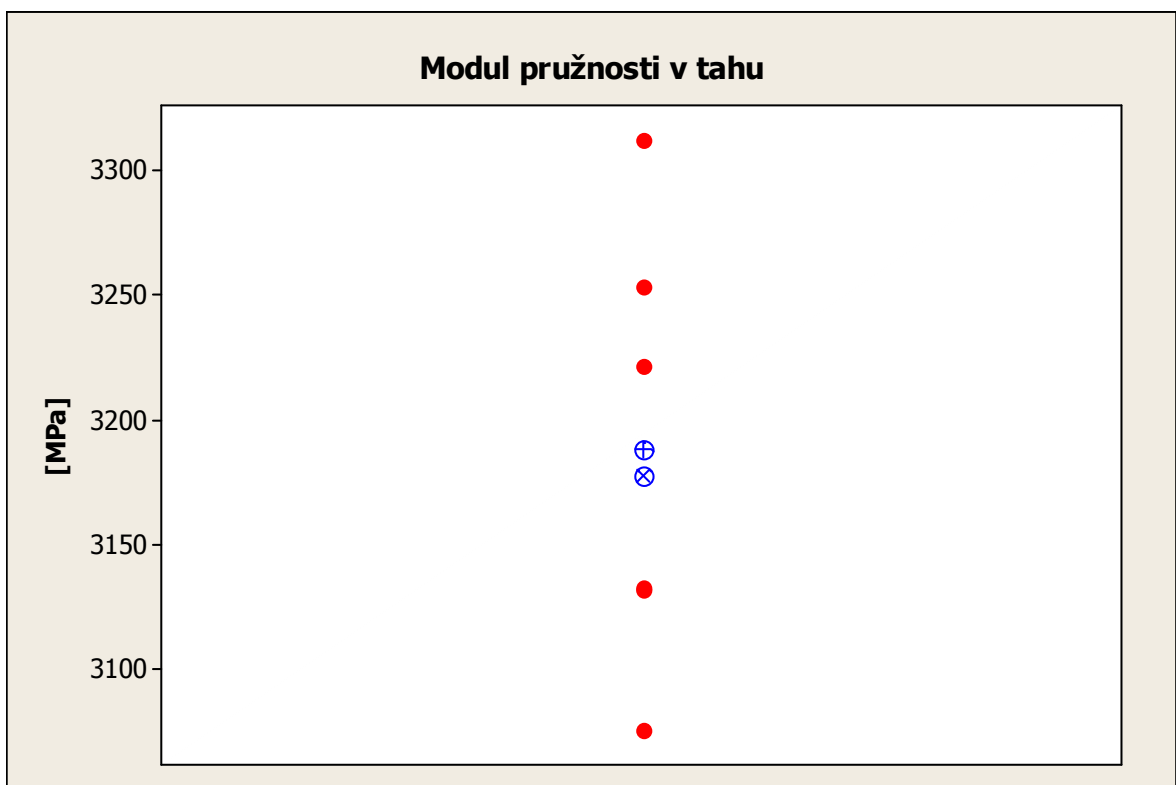
Tab. 12: Naměřené hodnoty vzorek nezúžený optimalizovaný

n	h[mm]	b₁ [mm]	σ_m [MPa]	F_m [N]	ε_{σm} [%]	ε_{Fm} [mm]	E [MPa]
1	3,82	10,05	41,92	1609,21	1,41	0,42	3311,79
2	4,07	10,08	46,83	1921,38	1,65	0,5	3133,13
3	4,06	9,99	40,9	1658,97	1,38	0,41	3253,61
4	4,07	9,98	42,58	1729,73	1,44	0,43	3076,24
5	4,06	9,98	43,63	1767,99	1,49	0,45	3221,58
6	4,07	10,01	49,66	2023,03	1,75	0,52	3131,73

Tab. 13: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek nezúžený optimalizovaný

n=6	σ_m [MPa]	F_m [N]	ε_{σm} [%]	ε_{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	44,25	1785,1	1,5200	0,4550	3188,0
M	43,11	1748,9	1,4650	0,4400	3177,4
u_A	1,36	64,6	0,0602	0,0184	36,3
s	3,34	158,4	0,1475	0,0451	88,8
R	8,76	413,8	0,3700	0,1100	235,6
x_{MIN}	40,90	1609,2	1,3800	0,4100	3076,2
x_{MAX}	49,66	2023,0	1,7500	0,5200	3311,8

Díky nehomogenosti materiálu vyšlo značné variační rozpětí u modulu pružnosti, kde přispělo k tomu i malý počet měření. Můžeme sledovat rozdíl mezi minimální 3076,2MPa a maximální hodnotou 3311,8MPa naměřených dat. Nejen u modulu lze si všimnout velkého variačního rozpětí, ale i u maximální síly, kde nám rozpětí činí 413,8N.



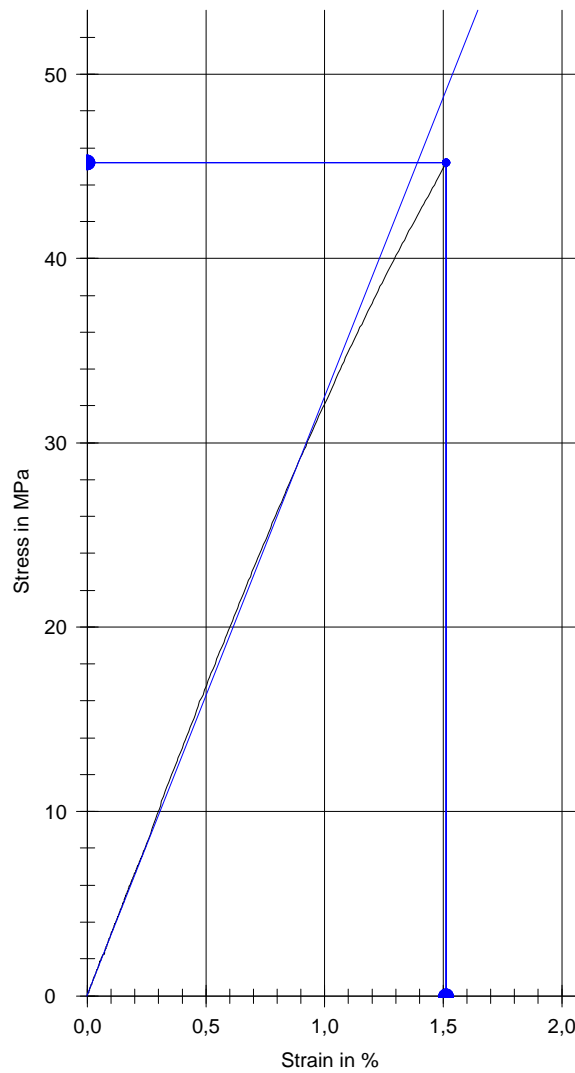
Obr. 39. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek nezúženy optimalizovaný



Obr. 40. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek nezúžený opt.

7.7 Vzorek typ 1A zúžený na 8mm optimální podmínky laseru

Měření 6: Zkušební těleso typ 1A zúžený na šířku 8mm v pracovní části výkon laseru 80% rychlost posuvu 6%.



Obr. 41. Zkouška tahem zúžený vzorek 8mm optimalizovaný

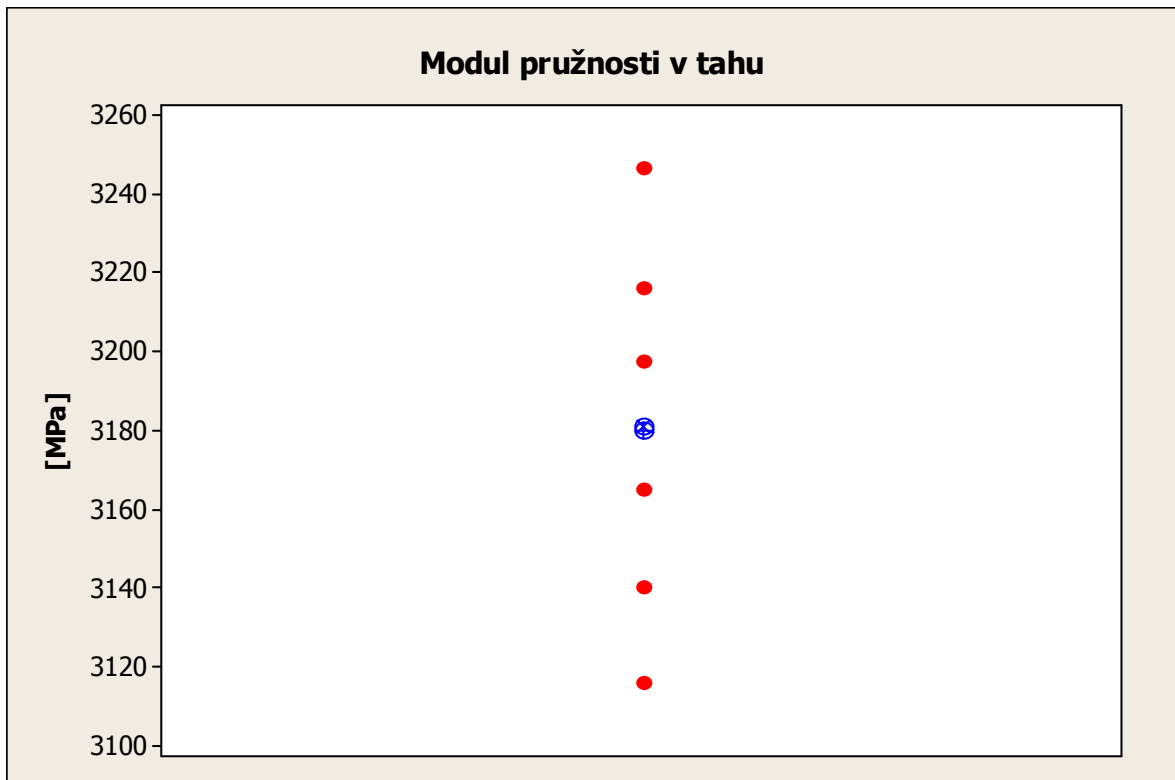
Tab. 14: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
1	4,05	8,01	38,86	1260,76	1,27	0,38	3164,94
2	4,03	7,98	48,42	1557,22	1,68	0,51	3216,17
3	4,05	8,01	46,99	1524,38	1,65	0,5	3197,3
4	4,05	7,99	36,34	1175,96	1,18	0,35	3140,26
5	4,01	7,99	45,19	1447,85	1,51	0,45	3246,73
6	4,06	7,99	45,37	1471,91	1,55	0,47	3115,77

Tab. 15: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný

n=6	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	43,53	1406,3	1,4733	0,4433	3180,2
<i>M</i>	45,28	1459,9	1,5300	0,4600	3181,1
<i>u_A</i>	1,96	62,4	0,0834	0,0265	20,0
<i>s</i>	4,81	153,0	0,2042	0,0650	49,0
<i>R</i>	12,08	381,3	0,5000	0,1600	131,0
<i>x_{MIN}</i>	36,34	1176,0	1,1800	0,3500	3115,8
<i>x_{MAX}</i>	48,42	1557,2	1,6800	0,5100	3246,7

Z výsledků u meze pevnosti lze konstatovat vysoký rozptyl hodnot při variačním rozpětí rovenu 12,08MPa, což je zapříčiněno rozdílem mezi minimální 36,34MPa a maximální hodnotou 48,42MPa naměřených dat. Pro malý počet měření by bylo nevhodné tyto vychýlené hodnoty zanedbat.



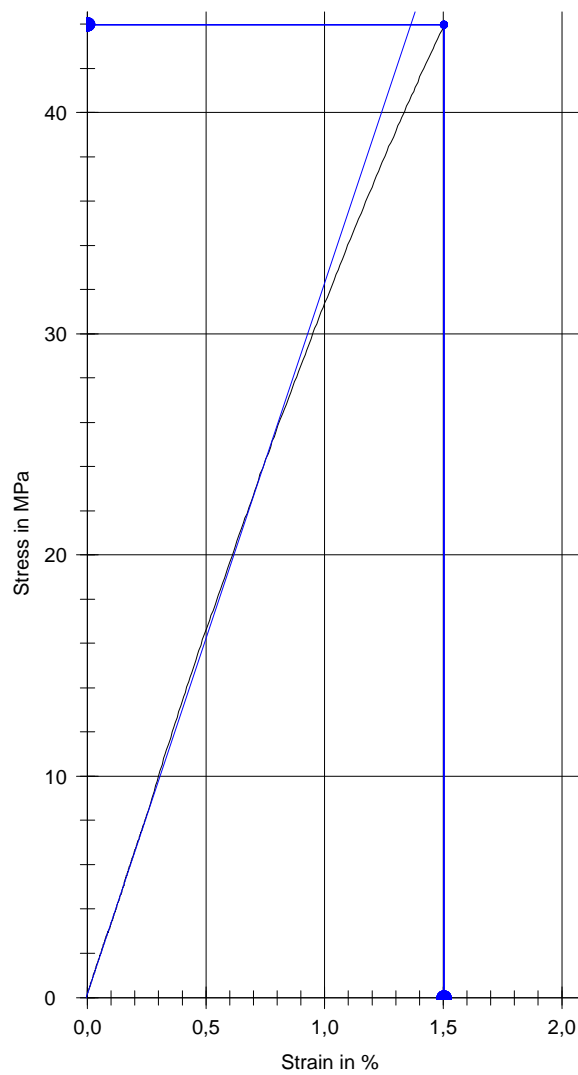
Obr. 42. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný



Obr. 43. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný

7.8 Vzorek typ 1A zúžený na 6mm optimální podmínky laseru

Měření 7: Zkušební těleso typ 1A zúžený na šířku 6mm v pracovní části výkon laseru 80% rychlost posuvu 6%.



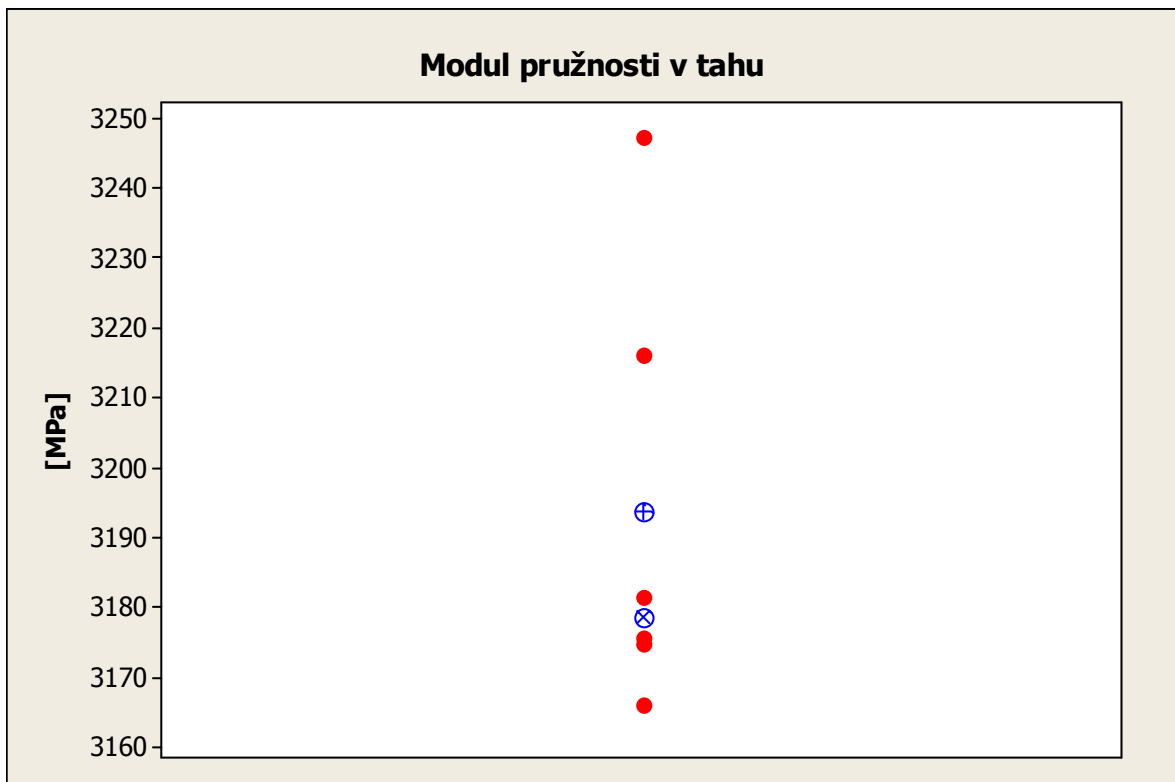
Obr. 44. Zkouška tahem zúžený vzorek 6mm optimalizovaný

Tab. 16: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
1	4,05	5,99	41,24	1000,57	1,39	0,42	3175,69
2	4,06	5,98	43,97	1067,66	1,5	0,45	3216,04
3	4,05	5,99	39,4	955,79	1,33	0,4	3165,95
4	4,05	5,99	51,89	1258,94	1,9	0,57	3174,75
5	4,04	5,98	35,91	867,45	1,17	0,35	3247,35
6	4,04	5,98	47,46	1146,65	1,69	0,51	3181,54

Tab. 17: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný

n=6	σ _m [MPa]	F _m [N]	ε _{σm} [%]	ε _{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	43,31	1049,5	1,497	0,4500	3193,6
<i>M</i>	42,61	1034,1	1,445	0,4350	3178,6
<i>u_A</i>	2,35	57,1	0,107	0,0324	12,9
<i>s</i>	5,76	140,0	0,263	0,0792	31,6
<i>R</i>	15,98	391,5	0,730	0,2200	81,4
<i>x_{MIN}</i>	35,91	867,5	1,170	0,3500	3165,9
<i>x_{MAX}</i>	51,89	1258,9	1,900	0,5700	3247,3



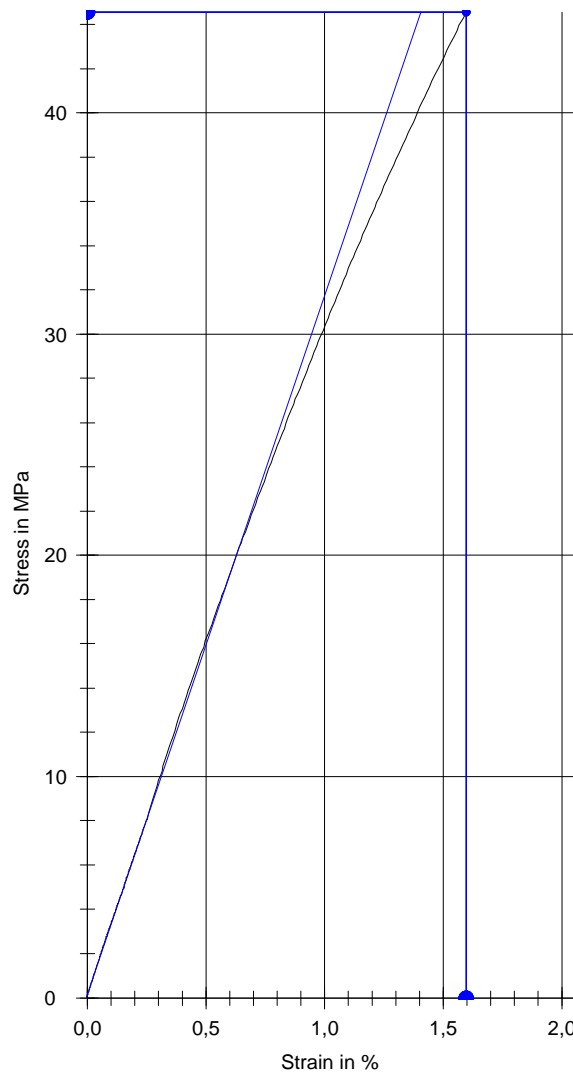
Obr. 45. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný



Obr. 46. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný

7.9 Vzorek typ 1A zúžený na 4mm optimální podmínky laseru

Měření 7: Zkušební těleso typ 1A zúžený na šířku 4mm v pracovní části výkon laseru 80% rychlost posuvu 6%.



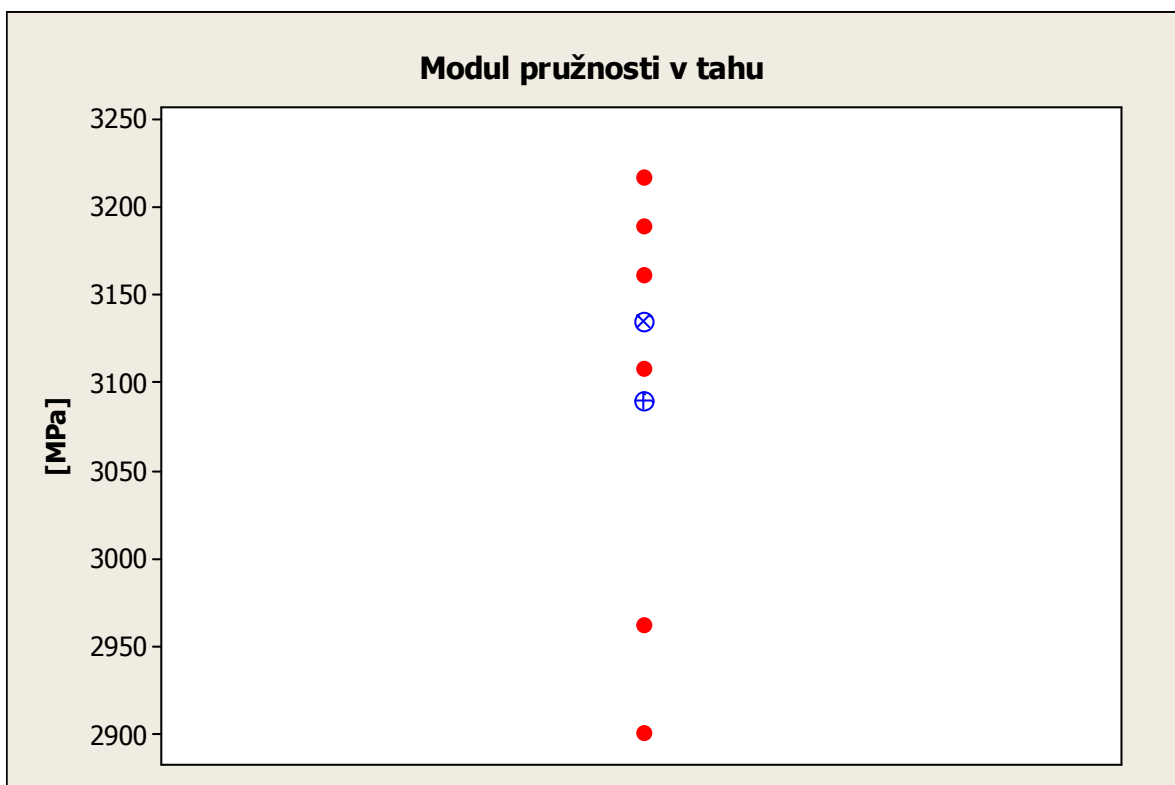
Obr. 47. Zkouška tahem zúžený vzorek 4mm optimalizovaný

Tab. 18: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný

n	h[mm]	b ₁ [mm]	σ_m [MPa]	F _m [N]	$\varepsilon_{\sigma m}$ [%]	ε_{Fm} [mm]	E [MPa]
1	4,01	4,05	48,27	784	1,78	0,53	3190,31
2	3,86	3,99	44,58	686,54	1,6	0,48	3162,48
3	3,83	3,99	35,42	541,31	1,24	0,37	2902,44
4	3,85	3,99	42,59	654,28	1,45	0,44	3217,98
5	4,02	4,06	47,06	768,07	1,72	0,52	3109,19
6	4,01	3,99	48,08	769,24	1,81	0,55	2963,04

Tab. 19: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný

n=6	σ_m [MPa]	F _m [N]	$\varepsilon_{\sigma m}$ [%]	ε_{Fm} [mm]	E [MPa]
\bar{x}	44,33	700,6	1,6000	0,4817	3090,9
M	45,82	727,3	1,6600	0,5000	3135,8
u_A	2,00	38,3	0,0900	0,0275	52,7
s	4,89	93,7	0,263	0,0674	31,6
R	12,85	242,7	0,5700	0,1800	315,5
x_{MIN}	35,42	541,3	1,2400	0,3700	2902,4
x_{MAX}	48,27	784,0	1,8100	0,5500	3218,0



Obr. 48. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný



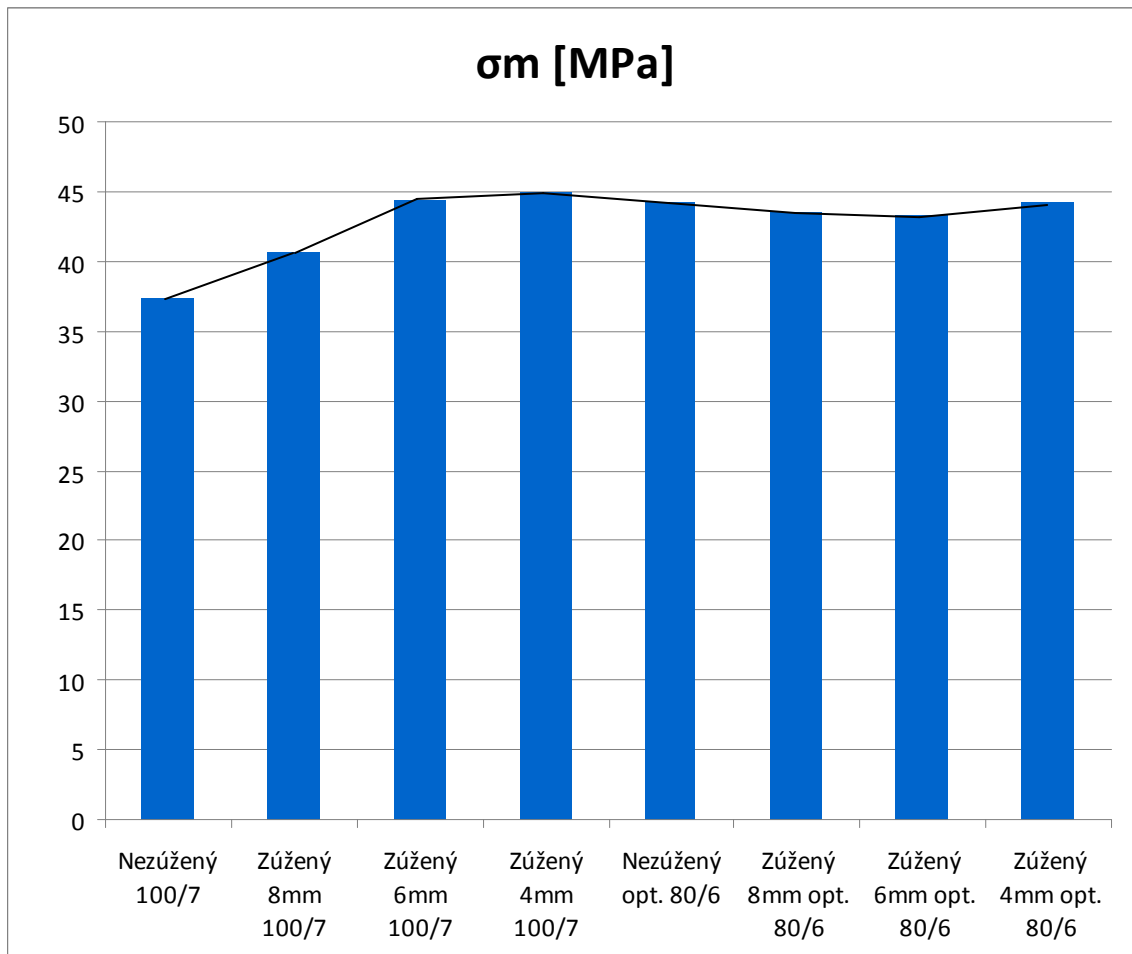
Obr. 49. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný

7.10 Závěrečné vyhodnocení 8 měření

V této kapitole se zaměřím na celkové vyhodnocení pro všech 8 měření. V Tab. 20 jsou všechny průměrné hodnoty jednotlivých měření. K vyhodnocení hodnot jsem použil odhad aritmetického průměru \pm odhad směrodatné odchylky $\Rightarrow \bar{x} \pm s$. Pro znázornění výkyvu a trendů hodnot jednotlivých měření znázorňuje sloupcový graf, kde se zaměřím na sledování klesání a stoupání trendů u jednotlivých měření.

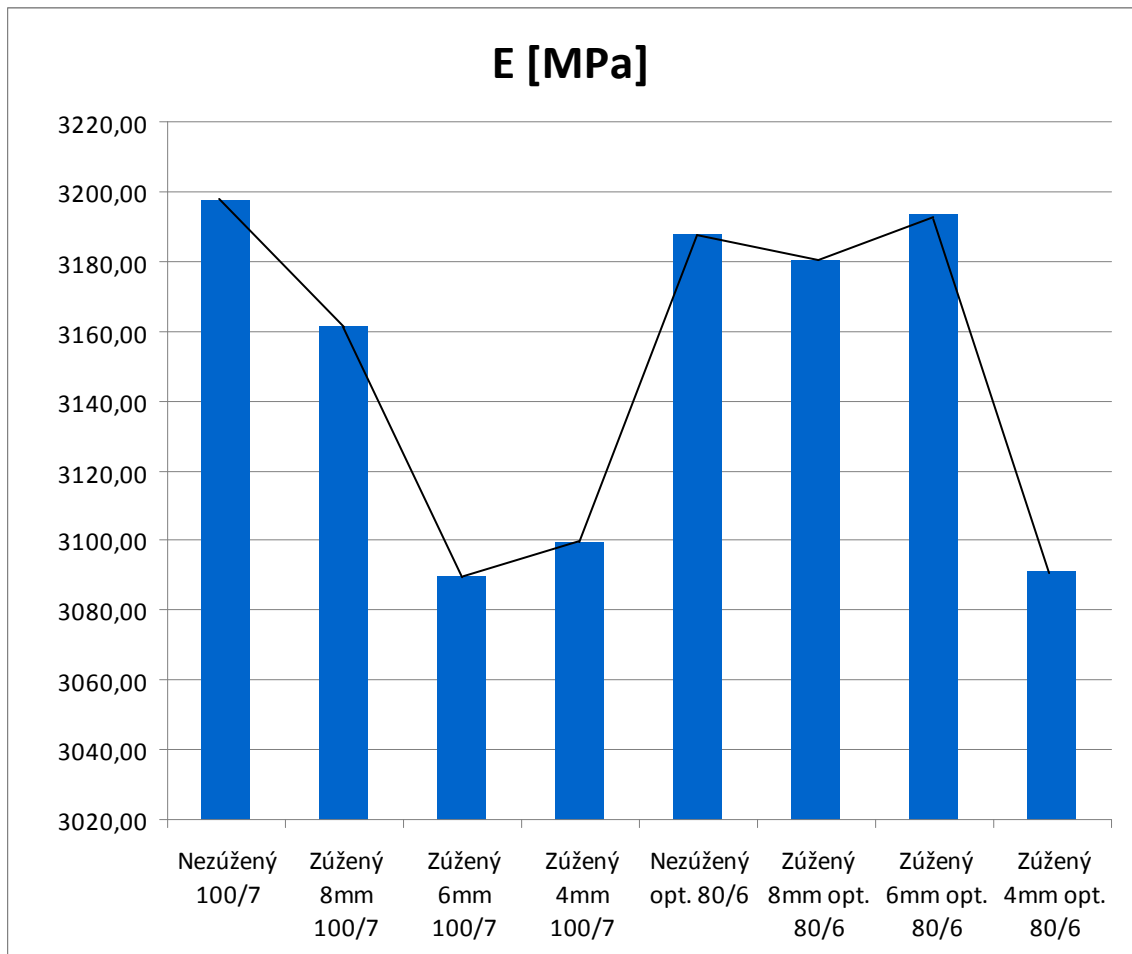
Tab. 20: Výsledné hodnoty 8 měření

Druh vzorku	σ_m [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_{\sigma m}$ [%]	ϵ_{Fm} [mm]
Nezúžený 100/7	37,43±6,76	3197,5±60,5	1,230±0,2390	0,369±0,0713
Zúžený 8mm 100/7	40,67±1,048	3161,6±51,1	1,375±0,0443	0,412±0,0129
Zúžený 6mm 100/7	44,43±3,29	3089,9±72,9	1,598±0,1773	0,480±0,0508
Zúžený 4mm 100/7	45,05±6,48	3099,5±69,5	1,655±0,354	0,498±0,1065
Nezúžený opt. 80/6	44,25±3,34	3188,0±88,8	1,520±0,1475	0,455±0,0451
Zúžený 8mm opt. 80/6	43,53±4,81	3180,2±49,0	1,473±0,2042	0,443±0,0650
Zúžený 6mm opt. 80/6	43,31±5,76	3193,6±31,6	1,497±0,263	0,450±0,0792
Zúžený 4mm opt. 80/6	44,33±4,89	3090,9±129,1	1,600±0,2205	0,482±0,0674
<i>R</i>	7,62	107,1	0,425	0,129
x_{MIN}	37,43	3089,9	1,230	0,369
x_{MAX}	45,05	3197,5	1,655	0,498



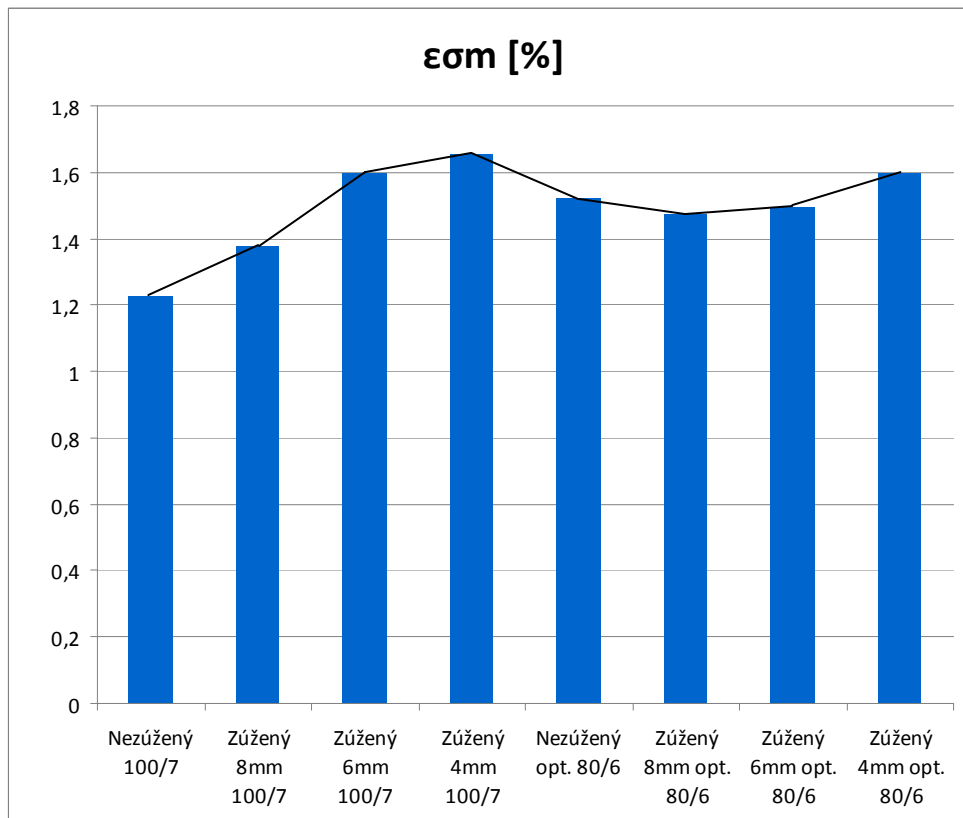
Obr. 50. Porovnání pevnosti v tahu

V grafu (Obr. 50) vidíme trendové výkyvy. Od měření číslo 1 vzorku typu 1A nezúženém v pracovní části o výkonu laseru 100% a rychlosti posuvu 7% stoupající trend až k měření číslo 3 vzorku zúženém na šířku 6mm v pracovní části o výkonu laseru 100% a rychlosti posuvu 7%. Dále nám trend pozvolně klesá k měření číslo 7 vzorku zúženém na šířku 6mm v pracovní části o optimálním výkonu laseru 80% a rychlost posuvu 6%. Naposledy stoupání v měření číslo 8 vzorku zúženém na šířku 4mm v pracovní části o výkonu laseru 80% a rychlost posuvu 6%.

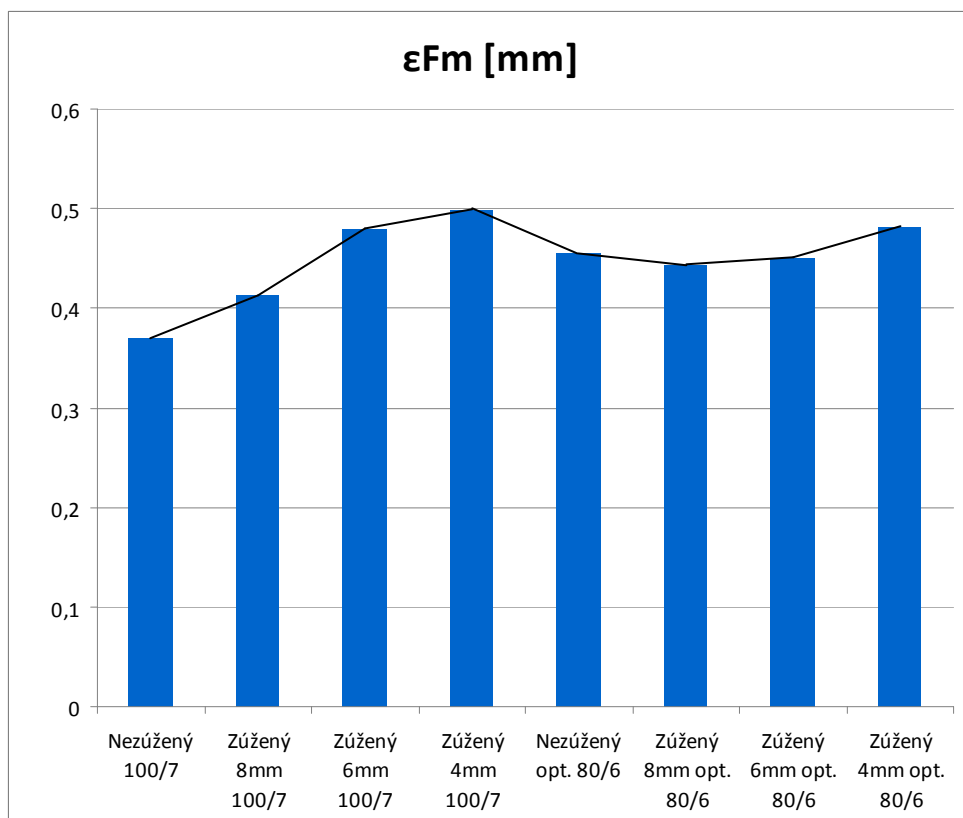


Obr. 51. Porovnání modulu pružnosti

Modul pružnosti (Obr 51) má značné variační rozpětí, což plyne z trendů, které v našem případě od měření číslo 1 vzorku typu 1A nezúženém v pracovní části o výkonu laseru 100% a rychlosti posuvu 7% klesá až po měření číslo 3 vzorku zúženém na šířku 6mm v pracovní části o výkonu laseru 100% a rychlosti posuvu 7%. Odtud znovu narůstá k měření číslo 5 vzorku typu 1A nezúženém v pracovní části o optimálním výkonu laseru 80% a rychlosti posuvu 6%.



Obr. 52. Porovnání poměrné deformace



Obr. 53. Porovnání deformace při maximální síle

Z grafů (Obr. 52), (Obr. 53) opět ukazují značné variační, to nám dokazují trendy, které nejsou ve stejné rovině. U průběhu porovnání poměrné deformace a deformace při maximální síle si můžeme všimnout shodných trendových výchylek.

ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval výrobou a provedení mechanických zkoušek na připravených vzorcích různých materiálů. Výrobce uvádí u zařízení laseru ILS 3NM nejhodnější pro řezání plastů zástupce PMMA. Při použití materiálu PVC začal materiál hořet, kde mohou rovněž vznikat škodlivé látky a jeho zápach dráždit dýchací cesty přítomných osob. Výsledný vzorek byl značně opálený a pro další využití byl zavrhnut. U materiálu PC při nižších rychlostech a vysokých výkonů laseru docházelo k rozteklým obrysům a mírnému ohoření. Se zvýšením rychlostí a zmenšením výkonu laseru došlo k neprořezání. V poslední řadě byl vyzkoušen materiál PA 11, kde je vypálený obrys opět zatekl.

K výrobě zkušebního vzorku volím podle normy ČSN EN ISO 527 typ 1A. Pro návrh vzorku mě sloužil program AutoCAD, kde po narysování lze objekt převést do Corel Draw, který je nastavený pro komunikaci s laserovým zařízením ILS 3NM. Při výrobě zkušebního tělesa je třeba brát na vědomí opal paprsku, z důvodu dodržení normalizovaných rozměrů.

Pro náš účel jsem vypálil laserem v první várce 4 druhy vzorků po 10 kusech normalizovaný typ 1A, a pak zúžil na 8mm, 6mm a 4mm. Pro řezné podmínky jsem použil 100% výkonu laseru a 7% rychlosti posuvu. Ve druhé variantě byly vyřezány 4 druhy vzorků po 6 kusech o 80% výkonu laseru a 6% rychlosti, které byly stanoveny z optimálních podmínek pro pálení PMMA.

Z laboratorních měření mechanických vlastností jsem vyhodnotil data, která díky velkým variačním rozpětím, kolísavému trendu a nehomogenitě materiálu nám neřeknou přesně, jak jsou ovlivněny mechanické vlastnosti materiálu PMMA při řezání laserem.

Doporučil bych pro další měření zvýšit výběrový soubor, což v našem případě jsou vzorky pro tahovou zkoušku z 10 kusů na 30 kusů u každé série měření. abychom mohli některé data k vyhodnocení případně vynechat, protože tvořili vychýlené hodnoty. Vhodně by bylo také zajištění homogenního materiálu i s materiálovým listem pro ověření vyhodnocených mechanických vlastností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUKOVICS, I. Konstrukční materiály a technologie. VUT Brno, 1992
- [2] Fyzikální základy vědy o materiálu: [cit. 2010-01-11]. Dostupný z WWW:
<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm>
- [3] Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie: [cit. 2010-01-11]. Dostupný z WWW:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tkp/prehled_plasty.pdf
- [4] Plasty: [cit. 2010-01-11]. Dostupný z WWW:
<http://www.ateam.zcu.cz/plasty.pdf>
- [5] KORBAŘ, T. STRÁNSKÝ, A. Technický slovník naučný. 1. vyd. Praha: SNTL, 1963. 676 s. ISBN 04-029-63
- [6] HLUCHÝ, M., *akol.* Strojírenská technologie I: Nauka o materiálu. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978. 360 s. ISBN 04-212-78
- [7] JARUŠEK, J. Metody zkoumání polymerů. VŠCHT Pardubice, 1984
- [8] RYBNÍKÁŘ, F., *et al.* Analýza a zkoušení plastických hmot. Praha, SNTL, MÍR, 1965. 420 s. ISBN 04-628-65
- [9] ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o polymerech II, VUT Brno 1980
- [10] Koplast: [cit. 2010-08-11]. Dostupný z WWW:
<http://www.koplast.cz/plexisklo.html>
- [11] Technická norma: ČSN EN ISO 527 (640604)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

l_1	měřená částí zkoušeného vzorku [mm]
l_2	vzdálenost mezi širokými částmi [mm]
l_3	celková vzdálenost [mm]
l	délka při přetržení [mm]
Δl	změna délky [mm]
L_0	Počáteční měřená délka [mm]
L	Počáteční vzdálenost čelistí [mm]
h	tloušťka ploché zkušební tyče [mm]
b_1	šířka pracovní části [mm]
b_2	šířka upínací části [mm]
A	tažnost [%]
Z	kontrakce [%]
ε	poměrné prodloužení [-], [%]
$\varepsilon_{\sigma m}$	poměrná deformace při maximálním napětí [%]
ε_{Fm}	deformace při maximální síle [mm]
F_{max}	maximální zatěžující síla [N]
σ	napětí [MPa]
σ_u	mez úměrnosti [MPa]
σ_e	mez pružnosti [MPa]
σ_m	smluvní napětí [MPa]
σ_p	smluvní mez kluzu [MPa]
σ_{eH}	horní mez kluzu [MPa]

σ_L	dolní mez kluzu [MPa]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
\bar{x}	aritmetický průměr
s	směrodatná odchylka
R	variační rozpětí
u_A	nejistota typu A
PE	Polyetylén
PP	Polypropylen
PS	Polystyrén
PMMA	Polymethylmetakrylát
PC	Polykarbonát
PA	Polyamid
PTFE	polytetrafluoretylén

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Struktura polymerů [2]	13
Obr. 2. Struktura kopolymerů [2]	13
Obr. 3. Semikrystalický polymer a Sférolit [2].....	14
Obr. 4. Základní rozdělení polymerů	15
Obr. 5. Schéma trhačího stroje pohled z boku [6]	23
Obr. 6. Schéma trhačího stroje přední pohled.....	24
Obr. 7. Základní typy pracovních tahových diagramů [9]	25
Obr. 8. Pracovní diagram pro zkoušku tahem.....	27
Obr. 9. Chování zkušební tělesa při tahové zkoušce [8].....	28
Obr. 10. Graf mezí kluzu	29
Obr. 11. Graf Smluvní mez kluzu.....	30
Obr. 12. Graf pevnosti v tahu.....	30
Obr. 13. Graf prodloužení.....	31
Obr. 14. Laser ILS 3NM	36
Obr. 15 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456.....	38
Obr. 16. Rozměry zkušební tělesa pro tahovou zkoušku [8]	41
Obr. 17. Importované zkušební těleso do Corel Draw.....	42
Obr. 18. Vzorek jeden uzel	43
Obr. 19. Nastavení řezných podmínek laseru	44
Obr. 20. Konečná práce po vyřezání laseru ILS 3NM	45
Obr. 21. Upínací čelisti ZWICK ROELL 1456	47
Obr. 22. Zkouška tahem nezúžený vzorek.....	48
Obr. 23. Přetržení vzorku typ 1A nezúžený.....	48
Obr. 24. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek nezúžený.....	50
Obr. 25. Vyhodnocení poměrné deformace při maximálním napětí vzorek nezúžený.....	50
Obr. 26. Zkouška tahem zúžený vzorek 8mm	51
Obr. 27. Přetržení vzorku typ 1A zúžený na 8mm.....	51
Obr. 28. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 8mm.....	53
Obr. 29. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 8mm	53
Obr. 30. Zkouška tahem zúžený vzorek 6mm	54
Obr. 31. Přetržení vzorku typ 1A zúžený na 6mm.....	54

Obr. 32. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 6mm.....	56
Obr. 33. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 6mm	56
Obr. 34. Zkouška tahem zúžený vzorek 4mm	57
Obr. 35. Přetržení vzorku typ 1A zúžený na 4mm.....	57
Obr. 36. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 4mm.....	59
Obr. 37. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 4mm	59
Obr. 38. Zkouška tahem nezúžený vzorek optimalizovaný	60
Obr. 39. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek nezúžený optimalizovaný.....	62
Obr. 40. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek nezúžený opt.	62
Obr. 41. Zkouška tahem zúžený vzorek 8mm optimalizovaný.....	63
Obr. 42. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný.....	65
Obr. 43. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný	65
Obr. 44. Zkouška tahem zúžený vzorek 6mm optimalizovaný.....	66
Obr. 45. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný.....	68
Obr. 46. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný	68
Obr. 47. Zkouška tahem zúžený vzorek 4mm optimalizovaný.....	69
Obr. 48. Vyhodnocení modulu pružnosti vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný.....	71
Obr. 49. Vyhodnocení poměrné deformace vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný	71
Obr. 50. Porovnání pevnosti v tahu	73
Obr. 51. Porovnání modulu pružnosti.....	74
Obr. 52. Porovnání poměrné deformace	75
Obr. 53. Porovnání deformace při maximální síle.....	75

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Technické parametry plotrového laseru ILS 3NM	37
Tab. 2: Technické parametry zkušebního stroje	39
Tab. 3: Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku [11]	40
Tab. 4: Naměřené hodnoty vzorek nezúžený	49
Tab. 5: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek nezúžený	49
Tab. 6: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 8mm	52
Tab. 7: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 8mm	52
Tab. 8: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 6mm	55
Tab. 9: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 6mm	55
Tab. 10: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 4mm	58
Tab. 11: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 4mm	58
Tab. 12: Naměřené hodnoty vzorek nezúžený optimalizovaný	61
Tab. 13: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek nezúžený optimalizovaný	61
Tab. 14: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný	64
Tab. 15: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 8mm optimalizovaný	64
Tab. 16: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný	67
Tab. 17: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 6mm optimalizovaný	67
Tab. 18: Naměřené hodnoty vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný	70
Tab. 19: Vyhodnocení naměřených hodnot vzorek zúžený na 4mm optimalizovaný	70
Tab. 20: Výsledné hodnoty 8 měření	72

