

Vliv laserového paprsku na mechanické vlastnosti vzorků PMMA

Bc. David Novosad

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David Novosad**
Osobní číslo: **T19511**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Vliv laserového paprsku na mechanické vlastnosti vzorků PMMA**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Vyroberte zkušební tělíska z materiálu PMMA pomocí laserového zařízení
3. Provedte experimentální zkoušky
4. Provedte vyhodnocení experimentu

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

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.

DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.

A Deep Dive Into Laser Cutter Speed And Power 2019 <https://makenzine.com/2019/03/04/a-deep-dive-into-laser-cutter-speed-and-power/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Knedlová, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 1.5.2021

Jméno a příjmení studenta: David Novosad

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem řezných parametrů CO₂ laserového zařízení ILS 3NM na mechanické vlastnosti polymethylmethakrylátu (PMMA). K výrobě zkušebních vzorků byly použity čočky o rozdílných ohniskových vzdálenostech a různé řezné rychlosti. Následně byly vzorky podrobeny zkoušce tahem, ohybem a zkoušce mikrotvrdomosti.

Klíčová slova: laser, PMMA, ohnisková vzdálenost, výkon, řezná rychlost, zkouška tahem, zkouška ohybem, mikrotvrdomost

ABSTRACT

This diploma thesis is focusing on the influence of cutting parameters of the CO₂ laser device ILS 3NM on mechanical properties of polymethyl methacrylate (PMMA). Lenses with different focal lengths and different cutting speeds were used to produce the test specimens. Subsequently, the samples were subjected to tensile, bending and microhardness tests.

Keywords: laser, PMMA, focal length, power, cutting speed, tensile test, bending test, microhardness

Děkuji paní Ing. Janě Knedlové, Ph.D. za rady, připomínky, vstřícnost a ochotu během vypracovávání mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za pomoc s měřením v praktické části práce.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE	11
1.1 MECHANICKÝ ÚBĚR MATERIÁLU	11
1.2 CHEMICKÝ A ELEKTROCHEMICKÝ ÚBĚR MATERIÁLU.....	12
1.3 ELEKTROTEPELNÝ ÚBĚR MATERIÁLU	13
2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE	16
2.1 AKTIVNÍ PROSTŘEDÍ	16
2.5 KONSTRUKCE	19
2.6 VYUŽITÍ PRŮMYSLOVÝCH LASERŮ	19
3 LM – LASER MACHINING	21
3.1.1 LAM – Laser Assisted Machining	27
4 KONSTRUKCE A PRINCIP CO₂ LASERU	28
5 POLYMERY	30
5.1 ELASTOMERY	30
5.1.1 Kaučuky	30
5.2 PLASTY	31
5.2.1 Reaktoplasty	31
5.2.2 Termoplasty.....	31
6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ	33
6.1 ZKOUŠKA RÁZEM	33
6.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	34
6.3 STATICKÁ ZKOUŠKA DLOUHODOBÁ.....	35
6.4 STATICKÁ ZKOUŠKA KRÁTKODOBÁ	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
7 CÍLE PRÁCE	39
8 LASEROVÉ ZAŘÍZENÍ ILS-3NM	40
9 PŘÍPRAVA VZORKŮ	42
9.1 ZVOLENÉ ROZMĚRY	42
9.2 VYTVOŘENÍ SOUBORU	43
10 VYHODNOCOVACÍ METODY	46

11	ZKOUŠKA TAHEM.....	48
11.1	VLASTNÍ MĚŘENÍ ZKOUŠKY TAHEM.....	49
11.2	VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY ZKOUŠKY TAHEM.....	50
12	ZKOUŠKA OHYBEM.....	52
12.1	VLASTNÍ MĚŘENÍ ZKOUŠKY OHYBEM	52
12.2	VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY ZKOUŠKY OHYBEM	54
13	KOMBINOVANÁ ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....	56
13.1	VLASTNÍ MĚŘENÍ KOMBINOVANÉ ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI	57
13.2	VYHODNOCOVANÉ PARAMETRY KOMBINOVANÉ ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI	57
14	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	60
14.1	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY PRO ROZDÍLNOU OHNISKOVOU VZDÁLENOST.....	60
14.2	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY PRO NOVÉ VZORKY	62
14.3	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY PRO STARÉ VZORKY	69
14.4	VÝSLEDKY ZKOUŠKY OHYBEM.....	76
14.5	VÝSLEDKY VTISKOVÉHO MODULU PRUŽNOSTI	78
14.6	VÝSLEDKY VTISKOVÉ TVRDOSTI	80
14.7	VÝSLEDKY TVRDOSTI DLE VICKERSE	82
14.8	VÝSLEDKY HLOUBKY VTISKU.....	84
	ZÁVĚR	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ	96
	SEZNAM TABULEK.....	98
	SEZNAM PŘÍLOH.....	99

ÚVOD

Historie laserového paprsku začíná popisem základů vynucené emise záření, které podal již v roce 1917 Albert Einstein. Základy nového oboru kvantová elektronika, zabývající se touto myšlenkou, však byly položeny až v 50. letech 20. století. Byla sestavena první zařízení, která generovala zesílené elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření. První funkční laser sestavili roku 1958 C. H. Towns a A. L. Shawlow. Podstatný průlom přišel roku 1960, kdy T. H. Maiman sestavil první rubínový laser. V následujících letech došlo k velkému rozmachu odvětví a k objevení laserů s pevným, kapalným i plynným aktivním médiem. Roku 1961 byl sestaven He-Ne laser, Nd-YAG laser roku 1964 a CO₂ laser, který je v průmyslu nejpoužívanější do dnešní doby, byl sestaven roku 1966. V tom samém roce byl poprvé zařazen laser jako nástroj v průmyslové výrobě, kde sloužil k vrtání otvorů do diamantu.

V 70. letech 20. století došlo k enormnímu rozvoji laserových technologií díky velké poptávce v mnoha odvětvích. V průmyslu se začal používat k vrtání, řezání, svařování nebo k tepelné úpravě kovů. V oboru kvality našel laser využití pro nedestruktivní zkoušky materiálů a měření v oblasti metrologie. V informačních technologiích se začal využívat jako čtečka CD, k přenosu a ukládání informací informačních a telekomunikačních technologií. V neposlední řadě je důležité zmínit široké využití v medicíně.

V případě průmyslového opracování materiálu laserem získá obrobek určité parametry. Patří mezi ně šířka řezu, zaoblení a nepravidelnost vzniklé hrany, šířka tepelně ovlivněné zóny, možná kuželovitost řezaného otvoru, tvorba trhlin, úbytek materiálu, změna struktury materiálu nebo změna jeho napětí. Tyto parametry ovlivňují z pohledu laseru jeho výkon, rychlost posuvu, druh paprsku, jeho šířka a pulsní režim, ohnisková vzdálenost a úhel vychýlení vzniklý průchodem paprsku přes materiál. Z pohledu materiálu jsou to jeho fyzikálně-chemické vlastnosti, termo-fyzikální vlastnosti a geometrie obrobku.

S parametry řezu, které ovlivňuje typ laserového zařízení, jeho nastavení a materiál, který je obráběn, souvisí jeho výsledné vlastnosti. Tím dochází k ovlivnění mechanických vlastností samotného výrobku. [2]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE

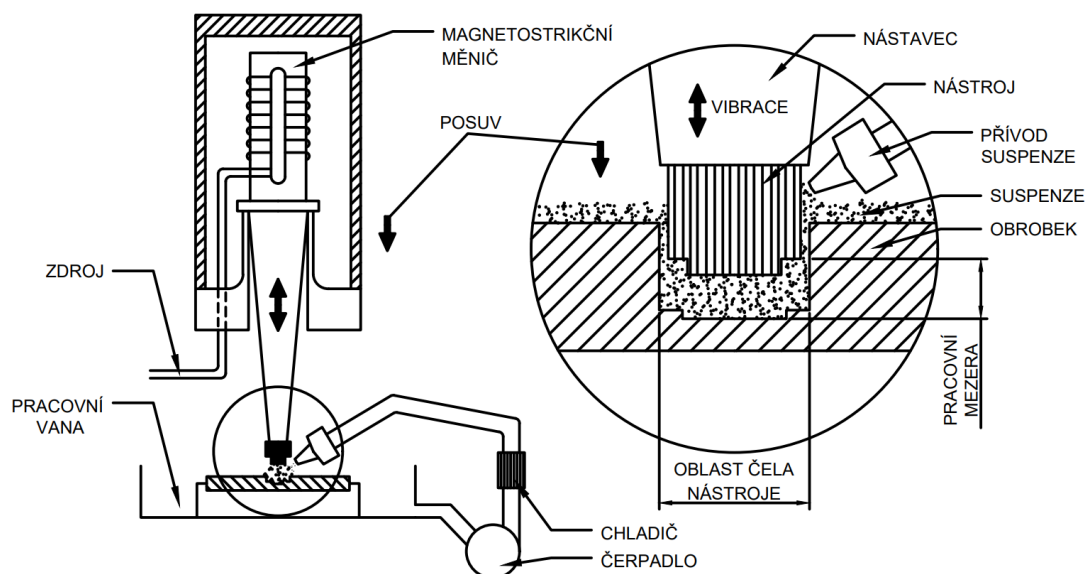
Výběr a použití určité výrobní technologie je limitující faktor. Určuje energetickou náročnost výroby, spotřebu materiálu a využitelnost jeho potenciálu nebo funkčních vlastností.

Nekonvenční technologie využívají k úběru materiálu chemické a fyzikální principy. Jedná se o způsob obrábění, při kterém nevzniká tříska jako vedlejší produkt při opracování reznými nástroji. Každý princip je založen na vlastnostech opracovávaného materiálu, jako je pevnost, tvrdost, tepelná vodivost, teplota tání nebo chemická odolnost. V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé principy nekonvenčních způsobů obrábění. [2,8]

1.1 Mechanický úběr materiálu

Nekonvenční technologie obrábění založené na mechanickém úběru materiálu využívají volné brusné částice v prostoru, které dopadají na povrch obráběného materiálu s určitou kinetickou energií. Náraz částic do povrchu materiálu má za následek odlamování velmi malých částic obráběného materiálu, a tedy jeho opracování. [2]

Obrábění ultrazvukem je princip založený na brusném účinku suspenzní kapaliny s jemným brusivem cirkulujícím mezi obrobkem a nástrojem. Nástroj kmitá frekvencí $f = 20$ (kHz) v oblasti ultrazvukových vln. Malý tlak p (MPa) skrze nástroj ve směru kolmém k obrobku stlačuje suspenzní kapalinu. Ta přeneše svůj tvar do obrobku postupným obrušováním povrchu. Odvod odebraného materiálu je zabezpečen suspenzní kapalinou. [2]



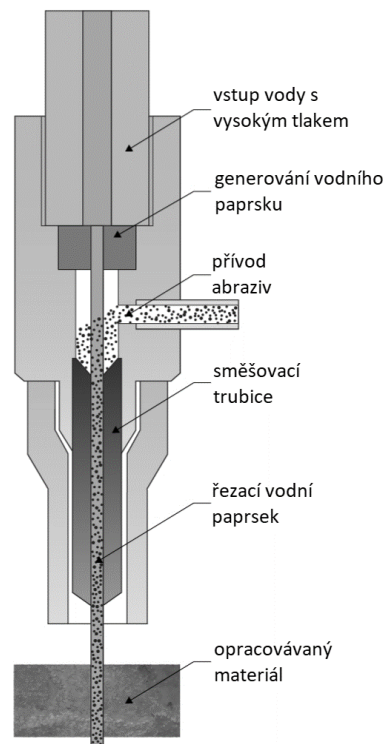
Obr. 1 Schéma obrábění ultrazvukem. [14]

Obrábění vodním paprskem může probíhat dvěma způsoby. Jedním z nich je čistý vodní paprsek bez přidaných abraziv. Tento paprsek se využívá především k řezání měkkých materiálů, jako jsou pěny, plasty, papír, cementotřískové desky nebo izolace. [9]

Vodní paprsek je vysokorychlostní koherentní maloprůměrový vodní proud, který dosahuje tlaku p nad 100 (MPa). [5]

V případě přidání abraziva - brusiva - se výkon paprsku zvýší asi tisícinásobně. Díky abrazivu a tlaku p až 650 (MPa) lze řezat oceli o šířce h přesahující 30 (cm), ale také keramiku, kámen, sklo nebo pevné kompozitní materiály. [9]

Průměr d čistého vodního paprsku je 0,08-3 (mm), průměr d vodního paprsku s přidanými abrazivy je 0,8-1,6 (mm). Nevýhodou je s rostoucí hloubkou řezu slábnoucí síla paprsku, která zapříčiní zúžení řezu na jeho spodní straně. [2, 25]



Obr. 2 Schéma zařízení pro generování vodního paprsku. [22]

1.2 Chemický a elektrochemický úběr materiálu

V kapalném nebo plynném prostředí dochází k chemické nebo elektrochemické reakci. Následkem této reakce je úběr materiálu, čímž se dosahuje požadovaného tvaru obráběného dílu. Odvod molekul, částic obrobeneho materiálu a reagující látky je zabezpečen proudící kapalinou nebo plynem, v závislosti na pracovním prostředí. [2]

Chemické obrábění (*CH – Chemical Machining*) je proces založený na povrchovém leptání kovových materiálů. Chemikálie povrch postupně rozpouštějí po malých vrstvách. Rozlišuje se do tří základních skupin:

- *chemický úběr materiálu* se využívá při leštění, čištění nebo frézování, kdy operace je založena na leptání materiálu kyselinami nebo zásadami
- *fotochemické obrábění* (*PM – Photochemical Machining*) je technologický proces leptání tvarových otvorů do fólií nebo tenkých materiálů
- *termické odstranění materiálu* (*TEM – Thermal Energy Method*) se využívá především k odstraňování otřepů, proces je založen na tepelném účinku chemické reakce

Využití tohoto typu obrábění je rozsáhlé. V malosériové výrobě umožňuje odstranit velmi tenké vrstvy. V oblastech, kde je důležitá nízká váha produktu (typicky letecký průmysl), je možné odleptat nadbytečný materiál ve vyhraničené oblasti. Je možné dosáhnout velmi přesných rozměrů velkých rovinných ploch. Leptáním se upravují povrchy elektronických součástek nebo se opracovávají dílce velkých rozměrů vyrobené z těžce obrobitelných materiálů.

Stejně jako každý jiný proces nebo technologie, i chemické obrábění má své nevýhody. Mezi hlavní se řadí nelehké nastavení procesu. Nelze jej použít podle přesných instrukcí. Dobrý výsledek je založen na experimentálních zkušenostech, vyžaduje odbornost a zručnost personálu. [2]

Elektrochemické obrábění (*EMC – Electrochemical Machining*) pracuje na principu rozpouštění anodicky polarizovaného obrobku. [2]

1.3 Elektrotepelný úběr materiálu

Energetický paprsek je přesně směřovaný tok velmi malých energetických částic. Tento tepelný/elektrotepelný tok využívá svou tepelnou energii k úběru materiálu. Vysokoenergetické paprsky, které tuto energii poskytují, jsou plazmové, fotonové nebo iontové. Elektrotepelný úběr materiálu má několik principů, které jsou popsány níže. [2]

Elektroerozivní obrábění (*EDM – Electrical Discharge Machining*) je proces, při kterém se ve velmi rychlé periodě T (s) opakují impulsy jiskrového výboje. Důležitou součástí procesu je kapalné dielektrikum, které odebírá tavený nebo odpařený materiál v podobě okem neviditelných mikročástic. Dielektrikum proudí mezi opracovávaným materiálem a nástrojem. Aby došlo k požadovanému elektrickému výboji, jsou za potřebí dvě elektrody.

Jednu z nich tvoří opracovávaný materiál, druhou elektrodu tvoří nástroj. Mezi elektrodami, které jsou tvořeny elektricky vodivým materiálem, je mezera, ve které dochází k výboji. Šířka mezery a se pohybuje od 0,01 do 0,40 (mm). Jiskrový výboj, ke kterému by mělo dojít v ideálním případě při každém impulzu, zajišťuje přívod jednosměrného napětí U (V) s kapacitou kondenzátoru C (F) a odporem R (Ω).

Výboj zaručí dostatečné množství elektrické i mechanické energie elektronů na anodě (obráběný materiál). Dojde k natavení a odpaření materiálu z anody a v podstatně menším množství i z katody (nástroj). Nástroj může být tvarový, do obrobku se pak přenese jeho profil. Dielektrikum následně odnese odebraný materiál, který je do něj vnesen vlivem elektrodynamických sil.

Z ekonomického pohledu má EDM proces několik ukazatelů - čas obrábění, opotřebení nástrojové elektrody, intenzita úběru materiálu a geometrické vlastnosti opracovaného povrchu. [2]

Úběr materiálu iontovým paprskem (IBM – Ion Beam Machining) je obrábění svazkem iontů. Iontový paprsek je svazek vysoce energetických iontů interního plynu. Plyny se používají takové, které lze snadno urychlit a lze je řídit elektrickým proudem. Běžně se jedná o argon, krypton nebo xenon. Tato technologie nachází uplatnění při úběru materiálu (frézování, leštění a leptání) nebo při nanášení tenkých vrstev PVD povlaků. [10]

Úběr materiálu svazkem elektronů (EBM – Electron Beam Machining) je proces, který probíhá ve vakuu. Tepelná energie vzniká na povrchu obráběného materiálu díky nárazu paprsku urychlených elektronů s kinetickou energií. Tato metoda nachází největší uplatnění v oblasti mikroobrábění - gravírování a vrtání tenkých materiálů.

Princip procesu je založen na vyzařování elektronového svazku rozžhavenou elektrodou, čímž je docíleno natavení a následně odpaření materiálu. Elektroda, která je obvykle v podobě wolframového drátu, vyzařuje elektrony, které jsou následně vysokým napětím U 30 – 180 (kV) urychlovány. Následně se za pomoci vysokofrekvenčního elektrického nebo magnetického pole svazek elektronů zkoncentruje a nasměruje se na přesnou pozici. Paprsek má průměr $d = 0,025 - 1$ (mm).

Výhodou je velmi jemné zaostření paprsku na přesný bod s možností jej přesně vychylovat, schopnost generovat s výbornou rozměrovou přesností vysokoenergetický paprsek a změna jeho intenzity v závislosti na změně urychlování napětí U . Mezi hlavní nevýhody pak patří především nutnost vakua a vznik škodlivého RTG záření.

Elektronový laserový svazek lze mimo kovové materiály použít také pro téměř všechny druhy nekovových materiálů. Jedinými problémovými materiály je diamant a elektricky nevodivé materiály – nejsou však tímto paprskem neobrobitelné. [2]

Plazmový úběr materiálu (*PBM – Plasma Beam Machining* nebo *PAM – Plasma Arc Machining*) je proces, kdy materiál ubíráme plynem, který se stane díky ionizaci atomů vodivým. Toho lze docílit ohřevem na vysokou teplotu nebo výbojem elektrického oblouku mezi dvěma uhlíkovými elektrodami. Plazma musí dle požadovaného využití splňovat několik zásadních parametrů, mezi kterými je hustota proudu plazmy ρ (cm^{-3}), průměr paprsku d (mm), teplota T ($^{\circ}\text{C}$) a její elektrická vodivost G (F). Využití je pro nanášení vysoce kvalitních a keramických povlaků, svařování, dělení plechů o síle h do 25 (mm), odtavování materiálu a jako lokální ohřev materiálu jako podpora při klasickém obrábění. [2]

Opracování laserem je založeno na fyzikálním principu zesílení světelného paprsku pomocí vybuzečné emise záření. Využití nachází v mnoha odvětvích, jako je úběr i přídavek materiálu v průmyslu, nedestruktivní zkoušky materiálu, měřicí systémy v metrologii nebo odvětví medicíny. Laserem, jeho rozdělením dle parametrů a využití se detailně zabývá 2. kapitola. [2]

2 LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Laserové technologie se v dnešní době využívají v mnoha oborech. Zde patří také průmyslové obrábění, kde nachází stále větší uplatnění již od 70. let 20. století. Jednotlivé druhy laserů mají rozdílné výkony a jiné vlastnosti nebo oblasti použití. Můžeme je rozdělit dle několika různých parametrů.

2.1 Aktivní prostředí

Aktivní skupenství, ve kterém vzniká laserový paprsek, je nejdůležitějším parametrem. Odvíjí se od něj další vlastnosti laseru. [2]

Pevnolátkové - První laser byl sestaven s pevnolátkovým aktivním médiem. Jednalo se o rubín, který se používá v modernizovaných modifikacích dodnes. Z důvodu intenzivního zahřívání aktivního média je zapotřebí kvalitní chlazení, které je nejčastěji zajištěno vodou. Nevýhodou pevnolátkových laserů je velmi malá účinnost, která se pohybuje maximálně v jednotkách procent. [6]

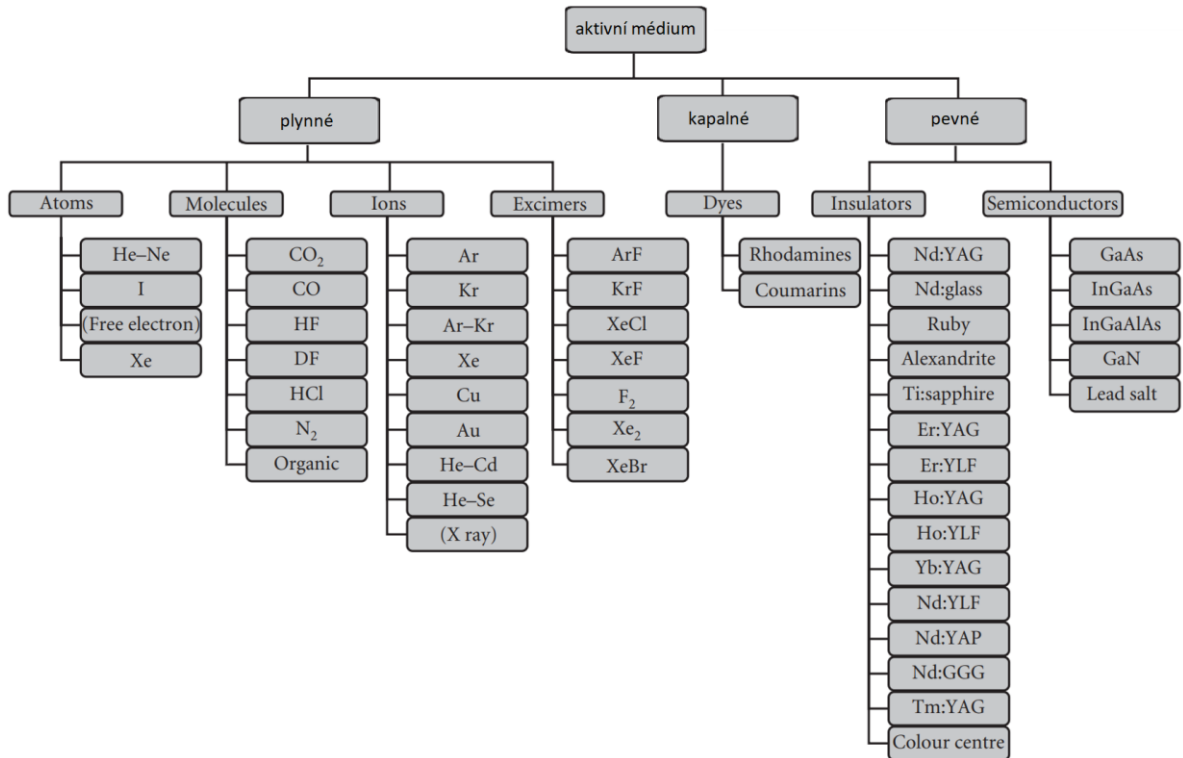
Plynové - Plyny jsou jako aktivní médium laserů velmi populární. Jejich největší předností je homogenita. Díky své tvárnosti není nutné jim tvarově přizpůsobovat laserové zařízení, snadná regulace zajišťuje stabilní paprsek a jsou relativně levné. Jako médium se pak používají neon (Ne), argon (Ar), krypton (Kr), xenon (Xe) a směsi helia (He) s neony. [4]

K buzení paprsku se nejčastěji používají vysokonapěťové elektrické doutnavé výboje, u některých výjimek pak elektrický proud o malém napětí. V trubici s plynou směsí dochází k intenzivnímu proudění, elektrody jsou opotřebovávány a musí být odolné. Trubice CO₂ laseru musí být z důvodu intenzivního zahřívání aktivního média z křemenného skla. [6]

Kapalinové - Aktivním médiem většiny kapalných laserů jsou fluorescenční organická barviva rozpuštěná v rozpouštědlech. Jejich výhodou je možnost snadno měnit vlnovou délku dle barviva, jichž je asi padesát druhů. Barviva lze míchat a získat tím ještě širší výběr vlnových délek. Životnost takového média se pohybuje v rádech od provozních hodin až po měsíce, především v závislosti na typu použitého barviva a režimu buzení paprsku. Jejich předností je snazší příprava oproti pevným aktivním médiím, u kterých je potřeba vysoká optická homogenita a mají vyšší atomovou hustotu než plyny. [4]

Polovodičové - Aktivním médiem polovodičových laserů jsou polovodiče a příměsové polovodiče. Buzení paprsku je elektrickým proudem nebo svazkem elektronů.

Účinnost laseru je vysoká. Generovaný paprsek je rozbíhavý a jeho plocha má tvar obdélníku. Mezi nejznámější zástupce polovodičových laserů patří GaAs (arsenid gallitý) laser. [6]



Obr. 3 Rozdělení laserů dle aktivního média. [4]

2.2 Vlnová délka

Látka, která tvoří aktivní médium laseru, ovlivní také jeho vlnovou délku λ (nm) a následně jeho využití.

- *infračervené záření (IR)*
- *viditelné světlo*
- *ultrafialové záření (UV)*
- *rentgenové a gama záření (RTG)*

Lasery na bázi CO₂ mají vlnovou délku λ pohybující se okolo hodnoty 10 600 (nm), Nd:YAG lasery hodnoty okolo 1 064 (nm) a dusíkové (N) 337 (nm). [20,24]

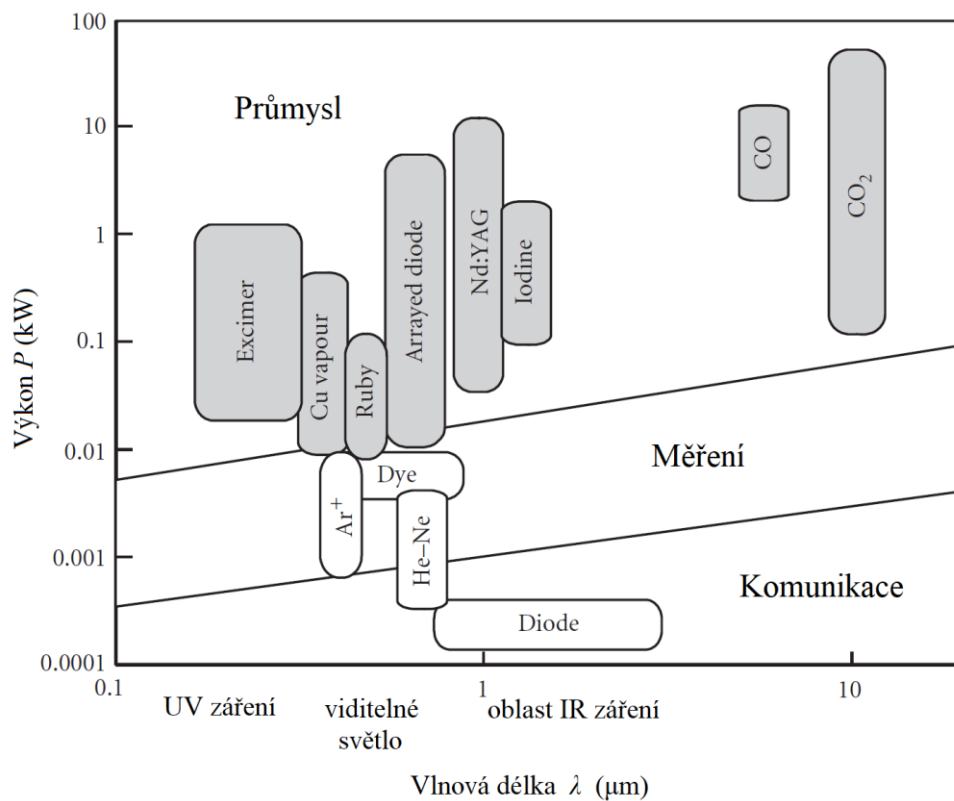
2.3 Výkon

Lasery mají rozdílné výkony, které ovlivňuje především aktivní médium. Nejvýkonnějšími jsou CO₂ lasery.

- *nízko-výkonné* – jedná se o lasery s výkonem P jednotky až stovky (W). Využití je především pro vrtání nebo řezání plastů nebo keramiky
- *vysoko-výkonné* – lasery od $P = 1$ (kW) až po hodnoty okolo $P = 100$ (kW). Vysoko-výkonné lasery nacházejí uplatnění především při svařování nebo teplem zpracování materiálů [2]

Nevýhodou laserů je jejich malá energetická účinnost n . U většiny laserů se pohybuje pod hranicí 30 (%). Výjimka jsou polovodičové QW lasery, DFB lasery a VCSEL, s laserovou diodou. U těch se n účinnost pohybuje okolo 80 (%). [5]

Typ laseru podle aktivního média úzce souvisí s vlnovou délkou λ výstupního paprsku a také s jeho výkonem P . Souvislost mezi těmito parametry uvádí následující obrázek níže, který zobrazuje vlnovou délku laseru λ (μm) na ose x, výkon laseru P (kW) na ose y, rozdělení do tří pásem dle oblasti využití a rozdělení dle aktivního média laseru.



Obr. 4 Schéma znázorňující parametry laserů. [4]

2.4 Režim paprsku

Paprsek laseru může při opracování materiálu pracovat ve rozdílných režimech, které se využívají pro různé operace. Volbu režimu také ovlivňuje obráběný materiál.

- *kontinuální režim*
- *pulsní režim* [2]

Mezi nejpoužívanější lasery s kontinuálním režimem jsou CO₂ lasery. Nevýhodou pulsního režimu je nerovnoměrné vyzařování energie v bodech, nikoli kontinuální linka. [6]

Elektrický výboj, který v dutině laseru tvoří paprsek, se přerušuje v krátkých intervalech a tím vzniká pulsní režim paprsku. [2]

2.5 Konstrukce

Volba konstrukce závisí na požadované přesnosti, rychlosti pohybu paprsku po obrobku, kvalitě paprsku a na celkové velikosti pracovního prostoru. Důležitou funkcí konstrukce je přenos laserového paprsku od laserového zařízení k obrobku. K tomu se využívají tři typy:

Pevná laserová hlava a pevný stůl s obrobkem je systém, při kterém pohyb laserového paprsku zabezpečují natáčecí zrcadla a využívá se především v prostorech s nedostatkem místa. Zrcadla jsou velmi citlivá na otřesy, může tak dojít k rozptylu laserového paprsku.

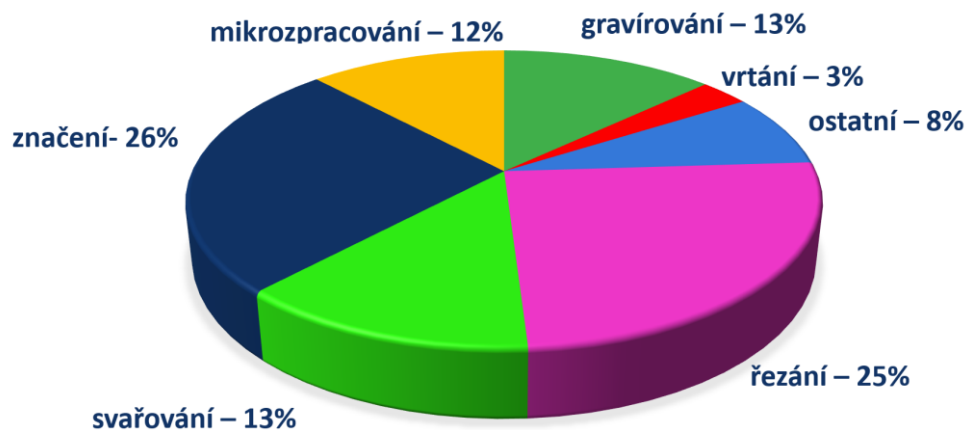
Pohyblivá laserová hlava a pevný stůl s obrobkem zabezpečuje pohyb paprsku pohybem laserové hlavy. Stůl s obrobkem je nepohyblivý. Kvůli nutnosti rychlých a přesných přejezdů laserové hlavy se využívají zařízení s nižším výkonem, jejichž hlavní součásti nemají příliš vysokou hmotnost.

Pohyblivá laserová hlava a pohyblivý stůl s obrobkem umožňuje využít pohyb obou hlavních částí soustavy laseru. [2]

2.6 Využití průmyslových laserů

Mimo oblasti komunikací a měření se lasery využívají pro zpracování materiálů. Využitelnost laserů při zpracování materiálů se rozšiřuje především díky možnosti vedení paprsku optickými kabely do 5ti-osých CNC center, s možností obrábět i ty nejsložitější tvary. Mezi nejvýznamnější oblasti použití patří řezání, vrtání, svařování, kalení, legování, povlakování, tvarování, obrábění.

Samotné opracování materiálů laserem má mnoho předností a specifických možností. Můžou být opracovávány velmi křehké materiály nejmenších rozměrů, a to díky velké přesnosti koncentrace vysokého množství energie na velmi malou plochu bez mechanického namáhání. Mimo malé rozměry lze dobře opracovávat místa, kde není dostatečné množství pro klasické obráběcí nástroje – především zde je častá využitelnost 5ti-osých CNC s optickými kabely. Optiky o různých parametrech dokážou měnit průměr ohniska paprsku ve velkém rozptylu a tím i energetickou hustotu paprsku. S tím souvisí také možnost velmi tenkých řezů, které zajistí úsporu materiálu a minimalizují ovlivnění materiálu v bezprostřední blízkosti řezu. Výhodou je také aktivace a deaktivace laserového paprsku ve velmi malých časových intervalech a s vysokou přesností. Ve většině případů je možné paprsek čelně vnořit do materiálu a není tedy potřeba předvrtání otvoru. [2]



Obr. 5 využití laseru. [2]

Všeobecně lze použití laseru v oblasti opracování materiálu rozdělit do dvou hlavních skupin. Jde o přímé laserové obrábění materiálu (LM – Laser Machining) a o klasické obrábění s podporou laseru (LAM – Laser Assisted Machining). [2]

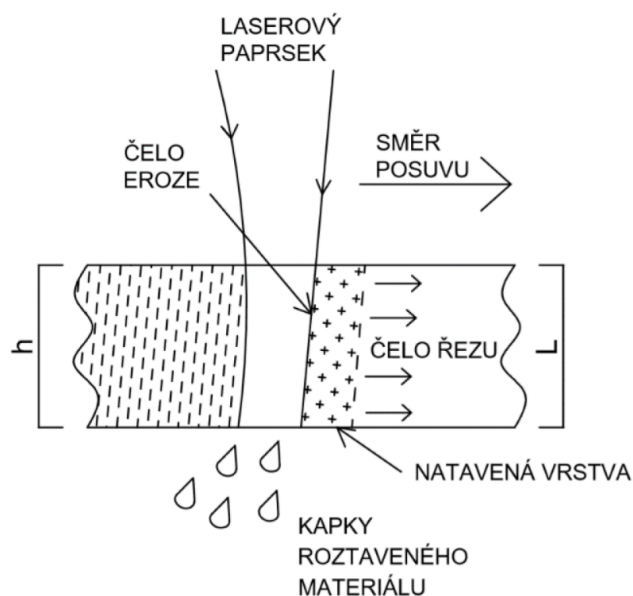
3 LM – LASER MACHINING

LM je alternativa klasických operací jako je řezání, vrtání nebo tvarové opracování. Z technologické hlediska je LM rozděleno na dvě metody. První metodou je prořezání materiálu v celé jeho síle. Druhou metodou je pak vytvoření drážky na povrchu děleného materiálu a následně kontrolovaný lom v místě drážky – tento způsob dělení se používá pro křehké materiály jako je keramika nebo sklo.

Lasery CO₂ s kontinuálním paprskem jsou pro metody LM nejpoužívanější. V důsledku dopadu vysokoenergetických částic fotonů na povrch materiálu dojde k erozi a lokálnímu natavení. Následně je materiál ze zóny řezu vypařen nebo odstraněn proudem plynu. [2]

Řezání materiálu laserem tvoří asi čtvrtinu využití laserů v průmyslu. Používají se převážně CO₂ lasery, pro docílení přesnějšího řezu, avšak s menší maximální hloubkou řezu, se používají Nd:YAG lasery. Samotný proces řezání má základní tři způsoby, které mohou být použity každý zvlášť nebo dohromady. [15]

- *tavné řezání* – vysoká intenzita paprsku zajistí roztavení opracovávaného materiálu, který je následně odfouknut asistenčním plynem
- *sublimační řezání* – materiál je vlivem vysoké intenzity paprsku z místa řezu odpařen
- *řezání pálením* – paprsek ohřeje materiál na jeho teplotu hoření a s přivedeným reaktivním plynem následně shořet v exotermické reakci. Struska vzniklá z hoření je odfouknuta asistenčním plynem [15]



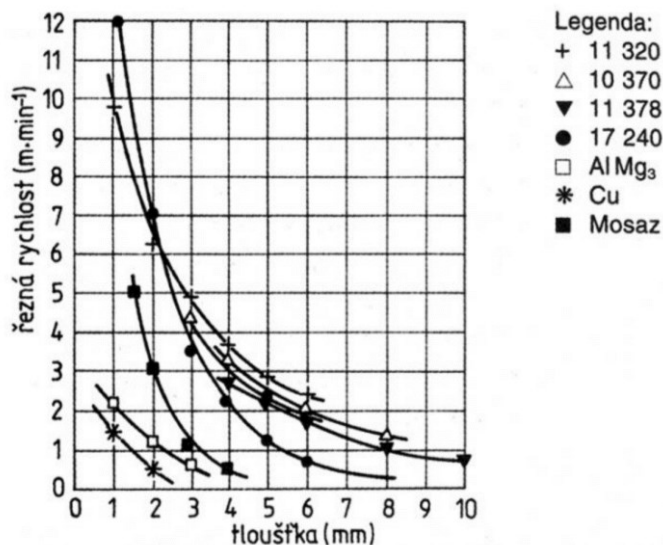
Obr. 6 Řezání laserem. [17]

Řezání materiálů laserem má určité parametry, dle kterých je hodnocena kvalita provedeného řezu. Rychlost řezání závisí především na výkonu paprsku P (W), na obráběném materiálu a jeho šířce h . Dále hodnotíme kvalitu řezané plochy. U strojírenských materiálů se dosahuje hodnot drsnosti $R_a = 3,6 - 12$ (μm), hloubka tepelně ovlivněné oblasti dosahuje hloubky $0,05 - 0,2$ (mm). Šířka řezné spáry a se pohybuje v rozmezí $0,02 - 0,2$ (mm). [15]

Řezání kovových materiálů je neekonomičtější do síly materiálu 7 (mm), maximální hloubka kvalitního řezu se pohybuje okolo 20 (mm). Zhoršenou kvalitu řezu v podobě ztuhlých kapek řezaného materiálu v místě výstupu paprsku mohou způsobit zbytky oleje nebo jiných maziv z předchozí operace, nebo řezání pozinkovaných dílců z důvodu velmi rozdílných teplot tavení T ($^{\circ}\text{C}$) jednotlivých materiálů (teplota tavení T zinku je 420 ($^{\circ}\text{C}$) a ocele 1430 ($^{\circ}\text{C}$)). Při řezání plechů potažených plastem nebo barvou může dojít ke zhoršení vrchní strany řezu z důvodu pomalého odvodu tepla a naruší se přilnavost mezi vrstvami. [2]

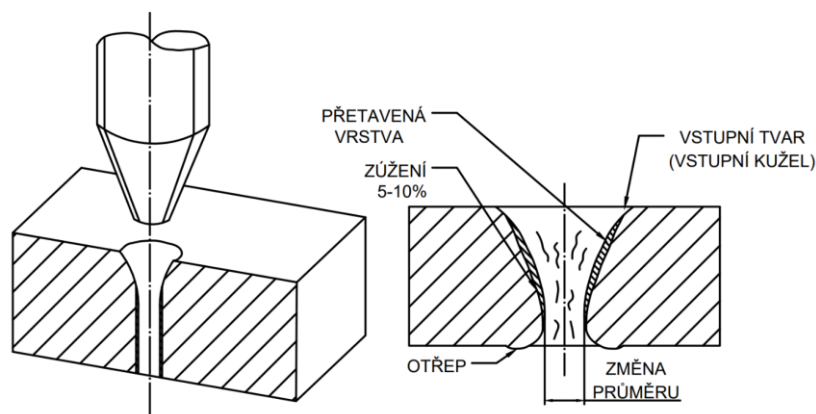
Neželezné kovy jako je měď, hliník, nikl nebo titan se můžou řezat laserem s jistým omezením. Tyto materiály mají podstatně vyšší tepelnou vodivost a jsou náchylné ke vzniku otřepů. Oproti řezání kovových materiálů jsou podstatně nižší řezné rychlosti. Řešením pro minimalizaci otřepů je řezání při vyšším tlaku plynu zabezpečujícím odebrání nataveného materiálu. [2]

Řezání nekovových materiálů může probíhat více způsoby. Princip natavení a vypaření materiálu zaručuje vysoce kvalitní řez, který zajistí vzhledově velmi hladkou až leštěnou hranu. Tento způsob dělení se používá i pro materiál PMMA. Natavení a následný střih/smyk je typické pro dělení keramiky. Poslední možnost dělení nekovových materiálů je založena na chemické degradaci obráběného materiálu. V důsledku různorodého složení proběhnou vlivem paprsku chemické změny. Energie paprsku narušuje materiálovou integritu a jeho chemické vazby. Tento způsob nachází využití především pro řezání dřeva, kompozitních materiálů nebo PVC a PUR. [2]



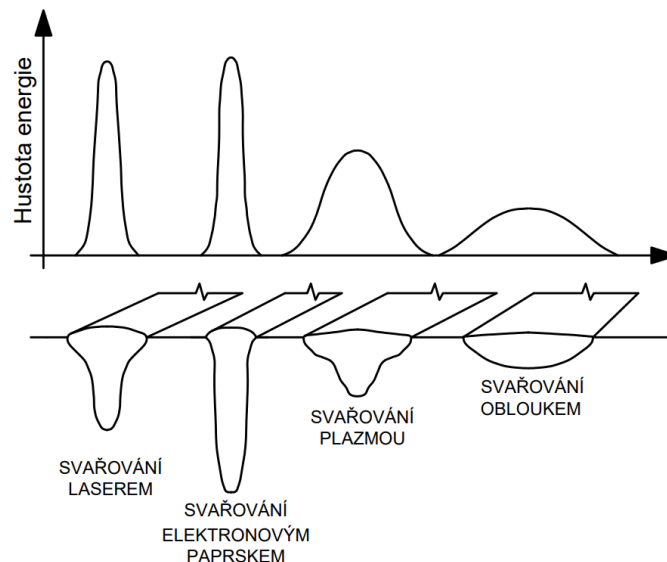
Obr. 7 Rychlost a tloušťka řezu. [19]

Vrtání laserem probíhá v kontinuálním nebo pulsním režimu a používá se k výrobě jak průběžných, tak slepých otvorů. V případě průběžných otvorů dochází ke vzniku otřepů na spodní straně řezu a průměr d řezaného otvoru se liší v rozmezí 5-20 (%). Z důvodu co nejmenšího tepelného ovlivnění okolí vrtaného otvoru slepých děr se používá pulzní režim. Většina materiálu odchází v podobě kapaliny, k vypaření materiálu dochází pouze ve středu laserového svazku, kde dosahuje nejvyšší energetické intenzity. Nejčastější využití je vrtání velmi malých otvorů při výrobě palivových filtrů, chladících otvorů lopatek proudových motorů nebo pro vrtání otvorů farmaceutických pomůcek jako jsou hypodermické jehly. [2]



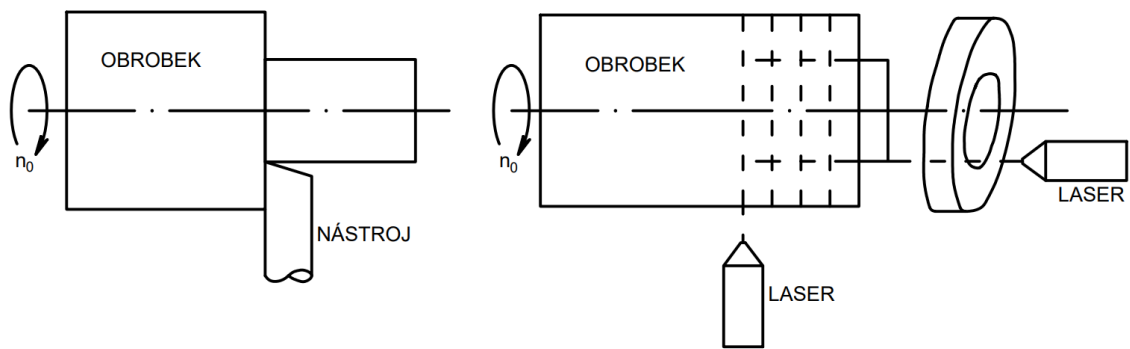
Obr. 8 Typický tvar laserem vrtaného otvoru. [14]

Svařování laserem je nejuniverzálnější metoda spojování materiálů v průmyslu. Hustota energie v laserovém svazku je mnohem vyšší než v případě svařování obloukem nebo plazmou. Díky tomu lze dosáhnout hlubokého a velmi úzkého svaru i při vyšších rychlostech svařování. [12]



Obr. 9 Tvar svaru podle typu svařovacího zařízení. [12]

Soustružení laserovým paprskem je výhodné především v tom, že se jedná o bezkontaktní obrábění, při kterém na obrobek nepůsobí mechanická síla. Tím se eliminuje chvění obrobku způsobené kontaktem s nástrojem, dosahuje se vyšší přesnosti a jsou kladeny menší nároky na upnutí polotovaru. Lze obrábět velmi přesně i těžce obrobitelné materiály, nezáleží na jejich tvrdosti, pevnosti nebo křehkosti. Podstatnou nevýhodou oproti konvenčnímu obrábění je malý úběr materiálu, kvůli kterému je proces zdlouhavý. Princip soustružení laserem spočívá ve využití dvou paprsků. První paprsek je kolmý k ose rotace obrobku, zatímco druhý paprsek je orientován souběžně s osou rotace obrobku a vstupuje do jeho čela. Tím dojde ke dvěma řezům, které z obrobku oddělí prstenec materiálu. [2]



Obr. 10 Schéma soustružení laserem. [17]

Gravírování nebo také mikrofrézování je používáno k vytvoření jak jednoduchých, tak velmi složitých reliéfů především do kalených ocelí. Metoda je založena na odpařování materiálu paprskem. Pro gravírování kovových materiálů se používají především Nd:YAG lasery. CO₂ lasery mají využití pro gravírování měkčích materiálů jako je dřevo nebo guma. [15]

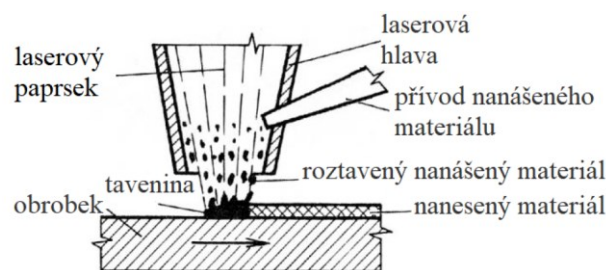
Značení a popisování je nejčastější využití laseru v případě kovových součástí. Tuto operaci lze provádět dvěma základními způsoby. Jedná se o popisování přes masku nebo popisování vychýlením paprsku.

Popisování přes masku využívá šablonu – masku, ve které je vyříznut požadovaný text nebo symbol. Maska je obvykle vyrobena z ušlechtilé oceli, mosazi nebo bronzu. Po jejím nasazení na opracovávaný materiál se nasvítí laserovým paprskem buď po řádcích nebo najednou. Popisek se přenese na materiál, zatímco místa zakrytá maskou zůstanou nepopsána. Touto metodou lze materiály popisovat paprskem rychlostí až 3 000 znaků za minutu. Hlavní nevýhodou je velikost popisovacího pole, jehož plocha je většinou do 40 (mm²). Kvůli nutnosti výroby a výměny celé masky při jakékoli změně popisku se jedná u malých sérií o nepružnou a neekonomickou formu popisování. Vhodné pouze pro větší série popisování obalů nebo etiket. [15]

Popisování vychýlením paprsku je založeno na vzájemném pohybu dvou zrcadel. Jejich vychýlením je paprsek přenášen na plochu. Díky využití optických kabelů lze popisovat také velmi malá a nedostupná místa. Výsledné značení má velmi vysokou čitelnost a kontrast. Pružnost výroby je dána jednoduchým přepsáním programu bez nutnosti jakéhokoli fyzického zásahu jako je tomu u popisování přes masku. [15]

Stejně jako u jiných operací, paprskem lze značit, popisovat nebo gravírovat mnoho materiálů. Mezi nejčastější patří kalené i nekalené oceli, mosaz, titan, hliník, slinuté karbidy nebo keramika, plasty, dřevo, papír, sklo nebo kůže. Popisování neovlivňuje povrch materiálu, může tedy být broušený, leštěný, pískovaný, lakovaný, smaltovaný nebo ošetřen různými povlaky jako je chrom nebo zinek. Zajímavostí je tzv. hloubkový popis. Paprsek vytváří písmena skládáním jednotlivých bodů. Lze je naprogramovat tak, že každý bod písmene bude mít určitou hloubku naprogramovanou výrobcem. Výrobce následně velmi snadno pozná svůj originální výrobek od padělku. [15]

Dokončování laserem spočívá v přivádění nanášeného materiálu do laserové hlavy v podobě prášku nebo drátu. Zde se materiál po kontaktu s paprskem roztaví a je nanesen na ošetřovaný povrch, kde ztuhne. Materiál se nanáší ve vrstvách, nejčastěji se jedná o kovové a keramické povlaky. Povlak může vzniknout také reakcí plynu a nataveného materiálu nebo roztavením předem naneseného materiálu povlaku přímo na součástce. Výsledná vrstva může mít sílu až 1 (mm). Výhodou je možnost povlakovat velmi tvarově složité součásti. Největší zastoupení v povlakování mají CO₂ lasery s možností nanášení materiálu rychlostí až 100 (cm².min⁻¹). [15]



Obr. 11 Schéma dokončování. [2]

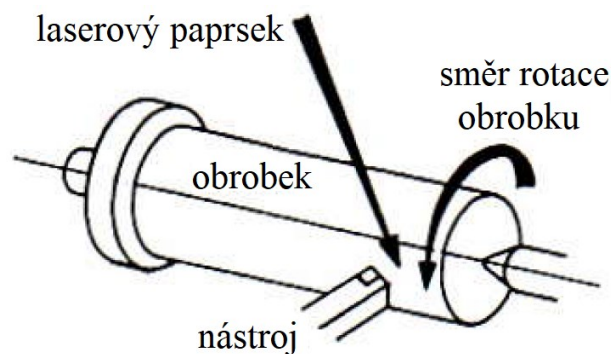
Tepelné zpracování laserem je charakteristické krátkou dobou ohřevu malého objemu materiálu, kdy v případě kalení není nutné používat chladící médium. Využívají se především CO₂ lasery se speciální optikou. Proces je založen na třech možných principech.

- *ohřev materiálu* – kalení, žihání a popouštění
- *tavení materiálu* – povrch součástky se nataví za účelem amorfizace a zpevnění povrchu
- *odpařování materiálu* – vypařováním se docílí rázového zpevnění [15]

3.1.1 LAM – Laser Assisted Machining

LAM je klasické obrábění nebo broušení brusným kotoučem, při kterém laser zajišťuje předehřev materiálu obrobku a jeho odebrání pak probíhá v plastickém stavu. Důsledek laseru tedy není natavení a odpaření materiálu, ale pouze jeho přeměna z křehkého materiálu na materiál tvárný. Materiál se nahřívá bezprostředně před nebo přímo během obrábění. Energie paprsku se po kontaktu s povrchem materiálu přemění na teplo. Množství pohlcené energie musí materiál pouze nahřát na určitou teplotu T ($^{\circ}\text{C}$) do předem stanovené hloubky, aby nedošlo k trvalému poškození nahřívané vrstvy. V praxi se nejčastěji uplatňují lasery na bázi CO_2 a Nd-YAG lasery.

Technologie s předehřevem zmenšuje působení mechanické síly nástroje na obrobek. Tím zmenšuje jeho chvění a dosahuje se přesnějšího obrábění, obdobně jako u LM obrábění. Předehřevem lze také snížit opotřebení nástroje a tím prodloužit jeho životnost a umožňuje větší odběr třísky, což přináší časovou úsporu. [2]



Obr. 12 Schéma obrábění s podporou laseru. [2]

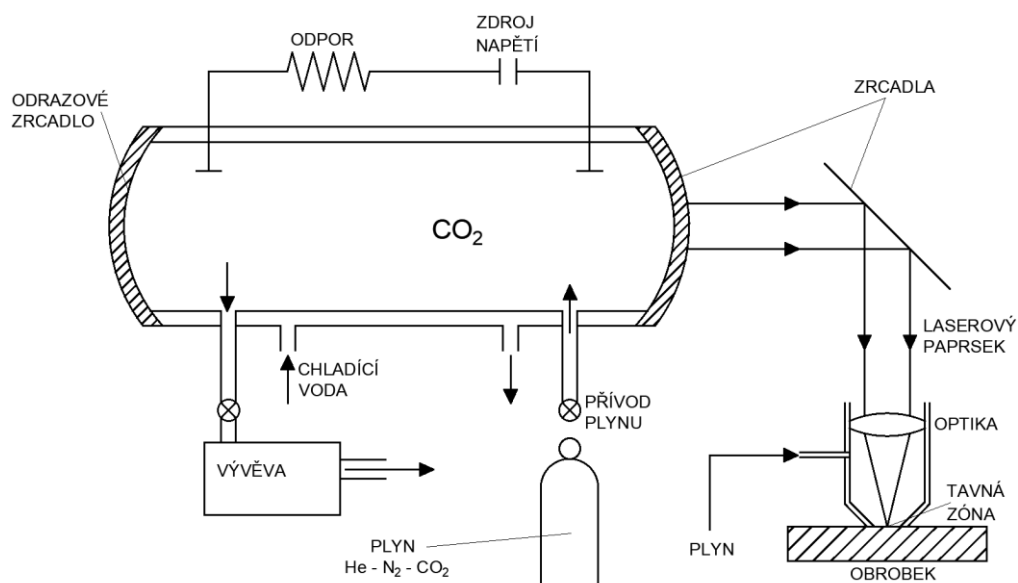
4 KONSTRUKCE A PRICIP CO₂ LASERU

Tato práce se zabývá zkoumáním mechanických vlastností materiálů PMMA po obrobení CO₂ laserem. V následující kapitole je podrobněji popsán princip tohoto typu laseru.

Ke vzniku stimulované emise záření CO₂ laseru se využívá kvantově energetického přechodu, který souvisí s oscilací molekul CO₂ (oxid uhličitý) a N₂ (stlačený dusík). Laserová trubice, která je hlavní součástí laseru, vždy obsahuje směs plynů CO₂ = 1 – 9 (%), N₂ = 13 - 32 (%) a He (helium), které tvoří největší podíl = 60 - 85 (%). Dále může směs obsahovat malé množství jiných plynů. Nezbytností pro správnou funkčnost systému je vysoká čistota plynů, která by u helia a dusíku neměla klesnout pod 99,995 (%), u oxidu uhličitého pak pod 99,990 (%). [2,4]

Dusík v podobě plynu snad absorbuje energii a díky tomu dochází k efektivnější excitaci.

Energie, kterou laser potřebuje k excitaci, je dodána v podobě doutnavého výboje, ke kterému dojde mezi elektrodami. Ty jsou napájeny generátorem vysokého napětí. Doutnavý výboj obsahuje molekuly N₂ (stlačený dusík), které jsou díky nárazům elektronů excitovány ze svého původního energetického stavu E₀ do stavu vyšší energetické hladiny E₁. Ta už je velmi blízko k energii s asymetrickými vibracemi molekul oxidu uhličitého E₂. Díky nepružným srážkám excitovaných molekul N₂ s molekulami CO₂ se může rychle měnit jejich vibrační energie. Z asymetrických vibrací na symetrické se molekuly CO₂ dostávají přeskokem z vyšší energetické hladiny E₂ na hladinu nižší. Tento děj je doprovázen vyzařováním energie o vlnové délce $\lambda = 10,6$ (μm). [2]



Obr. 13 Schéma CO₂ laseru. [2]

Aby byla zajištěna neustálá inverze na horní energetické hranici E_2 , je potřeba energii doplňovat v podobě výboje. Naopak na nižší energetické úrovni, kde se vytváří teplo vlivem srážení molekul, je zapotřebí chlazení. [2]

K odvodu tepla vzniklého při provozu CO_2 laseru se využívá chladicí médium, nejčastěji se jedná o vodu. Agregát společně s chladicím médiem musí zajistit, aby teplota v trubici nepřekročila teplotu $T = 126,85$ (°C). [2]

Během procesu se v dutině laseru použitá směs plynů postupně znehodnocuje. Jeho hlavní složka (CO_2) se začne rozpadat na CO (oxid uhelnatý) a O_2 (kyslík). Tento jev pak způsobuje snížení výkonu laseru a nepřesné nastavení řezných parametrů. Použitý plyn může být regenerován (obohacen) a opětovně použit. [2]

Lasery CO_2 lze rozdělit podle toku plynu. Plyn může proudit ve směru optické osy laseru, kdy se jedná o laser axiální, nebo ortogonální, kdy plyny proudí kolmo k optické ose a k elektrickému výboji. Výkon tohoto typu laseru roste v závislosti na objemu dutiny trubice, výkon axiálních laserů je závislý na délce trubice, které může u vysokovýkonných laserů dosahovat délky l až 10 (m). [2]

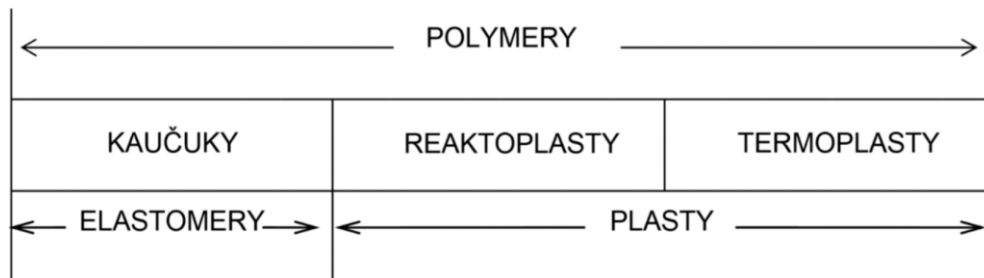
Laserový paprsek vystoupí z rezonátoru skrze polopropustné zrcadlo a následně je soustavou zrcadel přiveden do laserové hlavice, kde se nachází laserová čočka, kterou je zapotřebí chladit chladicím prstencem. Pro dosažení optimálních parametrů laserového paprsku se do optické soustavy přidávají příměsi jako je ZnSe (selenid zinečnatý), GaAs (arsenid gallitý), Ge (germanium) nebo NaCl (chlorid sodný). [2]

Mimo laserový svazek je do laserové hlavice přiváděn také podpurný plyn, jenž zabezpečuje více funkcí. Chrání čočku laserové optiky před znečištěním odebraným materiálem, v bodě dopadu paprsku na povrch materiálu může vytvářet agresivní, oxidační nebo ochrannou vrstvu, z obrobku může odstraňovat vzniklé výpary nebo odpad v podobě taveniny a tím přispívat k čistšímu a rychlejšímu procesu úběru materiálu. Čistší prostředí je také někdy zabezpečeno vakuovým prostředím, které zmíněné procesy zefektivní. [2]

Provozní podmínky a parametry laseru jsou úzce spjaty s typem opracovávaného materiálu. Praktická část práce se zabývá problematikou mechanických vlastností PMMA řezaného laserem. Následující kapitola uvádí stručné rozdělení polymerů a popis vlastností tohoto konkrétního materiálu.

5 POLYMERY

Polymery jsou látky s velmi širokým spektrem vlastností. Jejich velké molekuly často obsahují atomy vodíku, uhlíku a kyslíku nebo dusíku, chloru a dalších prvků. Během zpracování se jedná o látky především kapalné, kterým dáme finální tvar výrobku většinou za použití vysokých teplot a tlaku. Polymery jsou rozděleny do dvou základních skupin, plasty a elastomery. Plasty pak dále na termoplasty a reaktoplasty. [1]



Obr. 14 Dělení polymerů. [1]

5.1 Elastomery

Již z názvu lze zjistit přední vlastnost elastomerů. Jedná se o vysoce elastický materiál, který lze silou deformovat, aniž by došlo k jeho porušení. Tyto deformace jsou z většiny vratné. [1]

5.1.1 Kaučuky

Základní surovinou potřebnou ke vzniku elastomeru je kaučuk, který se vyskytuje ve dvou modifikacích – přírodní a syntetické.

Přírodní kaučuk vzniká z tekutiny zvané latex, která vytéká ze stromu *Hevea brasiliensis* po narušení jeho kůry. Latex se následně srazí, nejčastěji kyselinou mravenčí. Poté se pere ve vodě, vysuší se a vznikne materiál zvaný krepa. Po následných úpravách, jako je přidání plniv, aditiv a vulkanizace, se vyrobí přírodní kaučuk, který nazýváme přírodní pryží.

Syntetický kaučuk vzniká polymerací nebo kopolymerací nenasycených uhlovodíků. Nejběžněji se používají kaučuky polybutadienové, kopolymerní butadien - styrenové kaučuky, ethylen - propylenové kaučuky a kaučuky isoprenové. Z uhlovodíkových kaučuků pryž vzniká přidáním plniv, vulkanizačních činidel, antioxidantů a následně proběhne proces vulkanizace. [27]

5.2 Plasty

Za zvýšené teploty se jedná o plastický materiál, který se po dosažení požadovaného tvaru zchladí a stane se pevným, netvárným. [1]

5.2.1 Reaktoplasty

Jedná se o polymery, které chemickou reakcí zesílují a není možné je opětovně tvářet. Mezi nejčastější zástupce reaktoplastů patří nenasyčené polyestery, melaminy, pryskyřice na bázi formaldehydu nebo epoxidy. Dodávány jsou v podobě viskózních tekutin s medovou konzistencí obsahující malé molekuly. Vytvrzení – zesíťování je výsledkem chemické reakce po přidání iniciátoru a katalyzátoru za určité teploty. Ta může být pokojová nebo zvýšená, závisí na konkrétním typu reaktoplastu. Proces vytvrzování ovlivní výsledné vlastnosti produktu. Během něj vznikají mezi jednotlivými molekulami chemické vazby, které jsou třídimenzionální a tvoří polymerní síť s různou hustotou. Ideálním výsledkem je dosažení jedné makromolekuly, která tvoří celý makroskopický výrobek. Díky tomu si zachová vytvrzený reaktoplast tuhou fází i po zahřátí na vyšší teplotu a dosáhne se tak vyšší tepelné odolnosti. Nevýhodou však je zvyšující se křehkost a omezení recyklovatelnosti. [1,11]

5.2.2 Termoplasty

Přední vlastností termoplastů je možnost opakovaného vrácení zpět do plastického stavu a přetvarování do nového tvaru. Mezi nejpoužívanější termoplasty patří např. PE, PP, PVC nebo PMMA.

PMMA je transparentní termoplast. Je rozšířen především díky nízkým pořizovacím nákladům a velmi široké škále možností a využití ve všech odvětvích. Má mnoho dobrých vlastností. Je tvrdý, tuhý a pevný, jeho povrch je dobře leštitelný, zároveň si ale zachovává dobrou odolnost proti poškrábání. Díky vysoké průhlednosti je hojně využíván jako náhrada za běžné sklo, má skvělé elektrické a dielektrické vlastnosti, je odolný proti slabým kyselinám, luhům nebo tukům a olejům. Naopak k negativním vlastnostem PMMA patří jeho nízká odolnost proti prasknutí při nárazu a hořlavost. [1,7]

Teplota skelného přechodu je 106 (°C), u polotovarů, které jsou vyráběny odléváním, je to 115 (°C). Teplota, při které začíná být materiál plastický, je v rozmezí 84 - 111 (°C). PMMA je možné dlouhodobě používat a namáhat až do 70 (°C). [7]

Materiál je bezbarvý, čirý a viditelné světlo téměř nepohlcuje, propustnost je 92 (%) a jedná se o plast s nejvyšší světelnou propustností. Od tloušťky $h = 2$ (mm) materiálu dojde k naprostému pohlcení UV záření. Svou vysokou leštitelnost a lesk si zachová i po přidání transparentního barevného pigmentu. [7]

Modul pružnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 2 300 – 3 300 (MPa) a klesá s rostoucí teplotou, protože dochází ke snižování tuhosti materiálu.

Důležitou vlastností je *pevnost*, která s rostoucí teplotou klesá, stejně jako u jiných termoplastů. Poměrně malou hodnotu v porovnání s jinými termoplasty vykazuje zkouška na rázovou a vrubovou houževnatost. Svou křehkost si zachovává i při vyšších teplotách. [7]

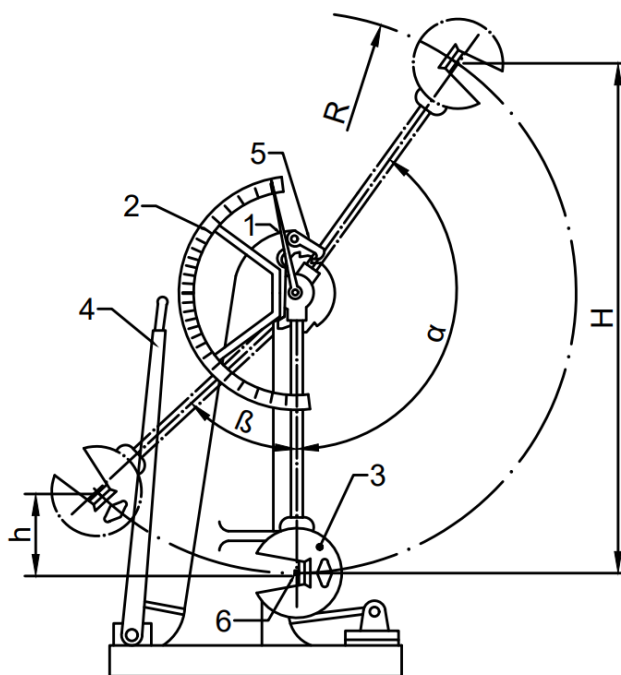
Jednotlivými typy zkoušek mechanických vlastností materiálů a jejich popisem se zabývá následující kapitola.

6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

Zkoušky mechanických vlastností materiálu jsou důležité pro správně zvolený materiál, tvar a rozměry potřebného výrobku nebo součástky. Polymerní materiály mají za tímto účelem stanovených několik typů zkoušek. [15]

6.1 Zkouška rázem

Účelem zkoušky je zjistit, jak velké množství energie je potřeba k porušení zkušebního tělesa. Ve většině případů je množství energie dostatečně velké k porušení jedním rázem, výjimečně se zkouší více rázy, jejichž energie se sčítá. Nejpoužívanější je *zkouška rázem v ohybu*, která se u plastů nejčastěji provádí na Charpyho kladivu. Měření probíhá na zkušební tyči s vrubem (u houževnatých plastů – vrubová houževnatost) nebo bez něj (křehké plasty – rázová houževnatost). Princip zkoušky, který je vyobrazen na obrázku níže. Spočívá v upevnění zkušebního tělíska (6), které leží v dráze kladiva. Kladivo (3) je západkou (5) zabezpečeno v počáteční poloze (výška H). Po uvolnění kladivo rozbije zkušební tělísko (6) a dostane do své konečné polohy (výška h), která je zaznamenána na stupnici (2) pomocí ručičky (1). Tato stupnice pak udává množství spotřebované energie. Jednotlivé polohy kladiva jsou dané úhly α a β . V konečné poloze je kladivo zabezpečeno brzdou (4). [18]



Obr. 15 Charpyho kladivo. [23]

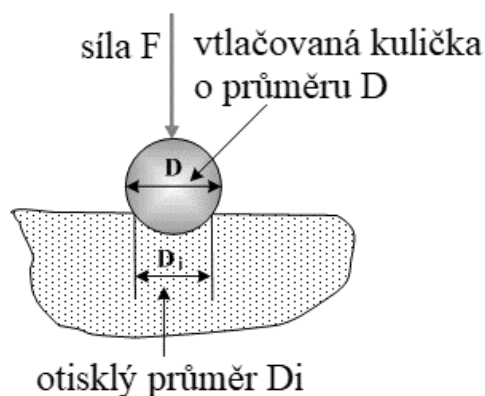
6.2 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti je využívána především díky rychlosti provedení zkoušky, finanční nenáročnosti a možnosti měřit i na velmi malých tělesech. Tvrdost je definována jako odpor kladený materiálem vůči vniknutí cizího tělesa.

Vrypová zkouška podle Martense je prováděna na leštěném povrchu zkoušeného materiálu kuželovým diamantovým hrotem, na který působí měnitelný tlak určitou rychlostí. Výsledkem je síla potřebná k dosažení vrypu o šířce 0,01 (mm).

Zkouška tvrdosti podle Rockwella spočívá v měření hloubky vtisku diamantového kuželu nebo kuličky ze slinutého karbidu po dvou stupních zatížení.

Zkouška tvrdosti podle Brinella se provádí na očištěném povrchu materiálu. Do tělesa je vtlačována kulička ze slinutého karbidu. Měří se průměr vtisku, který zůstane na povrchu po odlehčení. Zkouška má přesně definované podmínky jako je poměr průměru vtlačované kuličky vůči síle materiálu, teplota a čas zatížení. [18]



Obr. 16 Zkouška tvrdosti podle Brinella. [31]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je velmi přesná zkouška. Vnikajícím tělesem je čtyřboký diamantový jehlan a měří se úhlopříčky vtisku. Zkouška podle Vickerse byla aplikována na materiál zkoumaný v praktické části práce.

6.3 Statická zkouška dlouhodobá

Zkouška tečení slouží ke zjištění mechanických vlastností materiálu, který je dlouhodobě vystaven vyšším teplotám. Jeho vlastnosti za normálních teplot tak ztrácí význam. Při zvýšené teplotě se nejčastěji provádí zkouška pevnosti v tahu. Plasty mají mnohem vyšší hodnotu tečení (creep) než kovy. Zvyšuje se s rostoucí teplotou a zatížením. [18]

Je zde pozorováno především protažení zkušební tělesa v daných časových intervalech. Ze získaných dat pak vyhodnotíme křivku tečení (creepová křivka), která popisuje závislost deformace na čase. [29]

Zkouška relaxace je sledování průběhu napětí v závislosti na experimentálním čase při konstantním prodloužení. [30]

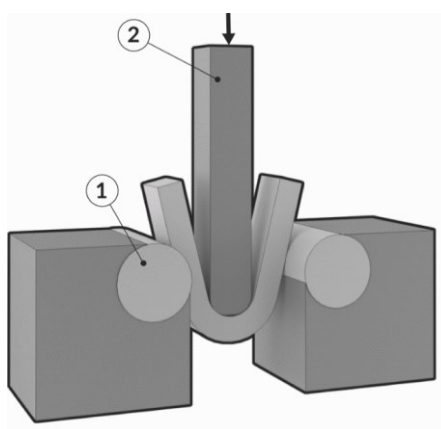
Napětí může klesat v závislosti na fyzikálních nebo chemických změnách ve vnitřní struktuře zkoušeného materiálu. [28]

6.4 Statická zkouška krátkodobá

Tlaková zkouška v případě polymerů se používá především u vrstvených tvrzených hmot. Zkušební tělíska mají přesně definovaný tvar válečku nebo krychle, v závislosti na typu materiálu. Zkouška se používá především pro křehké materiály, protože u měkkých a tvárných materiálů nelze přesně zaručit okamžik porušení. [18]

Ohybová zkouška je obzvláště důležitá pro křehké materiály, především lité. U houževnatějších materiálů nemusí dojít k porušení zkoušeného vzorku. Schéma zkoušky je vyobrazeno níže. Těleso se volně uloží na podpěry (1) a následně do jeho středu působí zatěžující síla (2). Napětí je v průřezu zkušební tělesa rozloženo nerovnoměrně, od nulové hodnoty v neutrální ose až k maximální hodnotě na povrchu. Měří se průhyb tyče do chvíle, kdy se tyč přelomí nebo dojde k jejímu trvalému prohnutí.

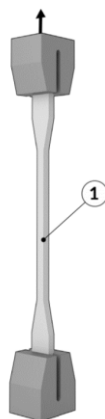
Výsledkem zkoušky je materiálová mez pevnosti v ohybu σ_{mo} a modul pružnosti v ohybu E_o , která vyjadřuje napětí, při kterém dojde k přelomení tyče. Tvar zkušební tyče závisí na druhu zkoušeného materiálu. [18, 35]



Obr. 17 Schéma ohybové zkoušky. [35]

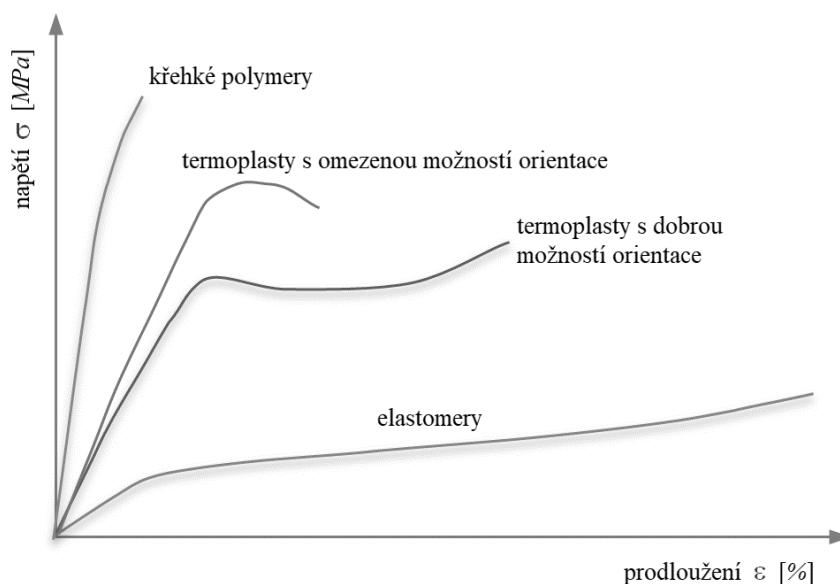
Krátkodobá zkouška ohybem se provádí dle normy ČSN EN ISO 178 (640607) Plasty - Stanovení ohybových vlastností. [29]

Tahová zkouška je nejběžnější ze statických zkoušek. Určí se z ní některé základní hodnoty, které jsou potřebné ke správnému zvolení materiálu pro konkrétní využití. Zkouška probíhá upnutím zkušebního tělíska (1) do čelistí zkušebního zařízení, které jej pevně uchopí. Následně na tělísko působí tahová síla, která je vyvolána odjezdem vrchní čelisti přesně definovanou rychlostí ve směru osy tělíska. [18]



Obr. 18 Schéma tahové zkoušky. [32]

Přesný postup tahové zkoušky pro plasty popisuje norma ČSN EN ISO 527 (640604). Výsledkem zkoušky je tahový diagram, který udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí σ . [26, 37]



Obr. 19 Orientační průběh tahové zkoušky dle typu polymeru. [37]

Detailnějším popisem tahové a ohybové zkoušky se zabývá praktická část práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRÁCE

Cílem práce bylo zjištění vlivu CO₂ paprsku na mechanické vlastnosti PMMA, čehož bylo dosaženo pomocí:

- Zkoušky tahem
- Zkoušky ohybem
- Zkoušky mikrotvrdomosti

8 LASEROVÉ ZAŘÍZENÍ ILS-3NM

Zařízení ILS 3NM je plotr s CO₂ laserovým paprskem o maximálním výkonu $P = 100$ W. Pracovní oblast plotru je formát A2 a pracovní délka osy $z = 210$ mm. Maximální rychlost posuvu $v_f = 1\,524$ mm.s⁻¹. Parametry výkon P i řezná rychlost v_f jsou dále v práci vyjádřeny v %. Výkon byl během celé práce neměnný $P = 100$ % a řezná rychlost měla hodnoty $v_f = 3$, 5 a 7 %.

Tab. 1 Přepočítání jednotek řezné rychlosti

v_f
3 (%) = 45,72 (mm.s ⁻¹)
5 (%) = 76,20 (mm.s ⁻¹)
7 (%) = 106,68 (mm.s ⁻¹)

Zařízení je vybaveno odsávacím otvorem, ke kontrole správného průběhu operace slouží průhledný kryt nad celou plochou a osvětlení pracovní plochy uvnitř zařízení. Zařízením lze řezat nebo gravírovat dřevo, plasty, pryž, kůže, kovy nebo keramika. Předností plotru je automatické nastavení ohniskové vzdálenosti dle použité čočky, které zajistí ostrý paprsek v podobě jeho koncentrace na co nejmenší možný bod v místě kontaktu s obráběnou plochou a možnost opracovávat rotační prvky. Detailní parametry zařízení popisuje následující tabulka (*Tab. 2.*, str. 41).

Tab. 2 Parametry laseru ILS 3NM

Laserové zařízení ILS 3NM	
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 1 524 mm/sec
Řízení výkonu laseru	Nastavitelné pd 1 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
Data na displeji	seznam vzorků, sílu laseru, gravírovací rychlost, čas průběhu, načtené soubory, nastavení a diagnostiku
Napájení	~110/~240 V
Chlazení	Vzduchové



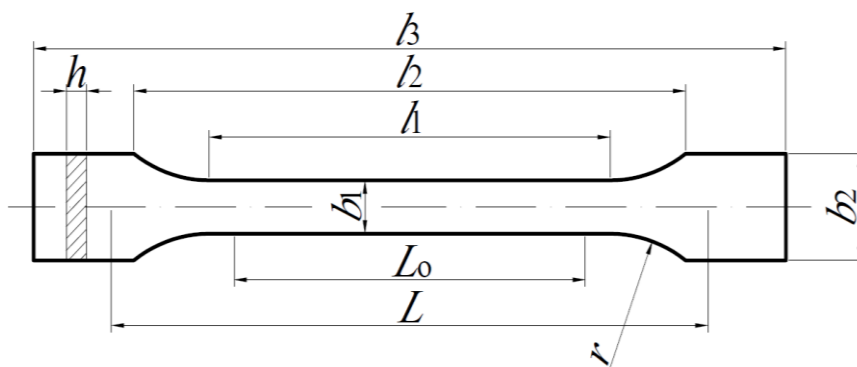
Obr. 20 Laserové zařízení ILS 3NM

9 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Prvním krokem experimentální části byla příprava zkušebních tělísek, která zahrnuje vytvoření souboru s obrysy vzorků narýsovaných dle daných rozměrů. Ty definuje norma příslušná pro danou zkoušku. Po vytvoření souboru proběhlo nastavení řezných podmínek na laserovém zařízení a samotné vyřezání vzorků.

9.1 Zvolené rozměry

Zkušební tělísko pro tahovou zkoušku popisuje norma ČSN ISO 527-2. Jeho tvar s kótami je uveden v obrázku *Obr. 21*, přesné rozměry jsou uvedeny v tabulce *Tab. 3*.



Obr. 21 Zkušební tělísko pro zkoušku tahem

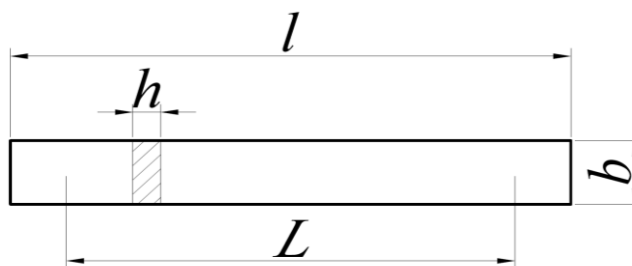
Tab. 3 Rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku tahem

Kóta	Popis	Rozměr (mm)
l_3	Celková délka	150
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80
r	Poloměr	25
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi vzorku	110
b_2	Šířka konců	20
b_1	Šířka zúžené části	10
h	Tloušťka	4
L_0	Počáteční měřená délka	50
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	90

K normalizovaným tělískům pro tahovou zkoušku byla přidána nenormalizovaná tělíska se zúženým profilem namáhané části.

Zúžení bylo z původního rozměru $b_1 = 10$ mm na $b_1 = 8, 6, 4$ a 2 (mm).

Zkušební tělísko pro zkoušku ohybem je definováno normou ČSN ISO 178. Jeho tvar s obecnými kótami je uveden v obrázku *Obr. 22*, přesné rozměry vzorku jsou uvedeny v tabulce *Tab. 4*.



Obr. 22 Zkušební tělísko pro zkoušku ohybem

Tab. 4 Rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku ohybem

Kóta	Popis	Rozměr (mm)
l	Celková délka	80
b	Šířka	10
h	Tloušťka	4
L	Vzdálenost mezi podpěrami	60

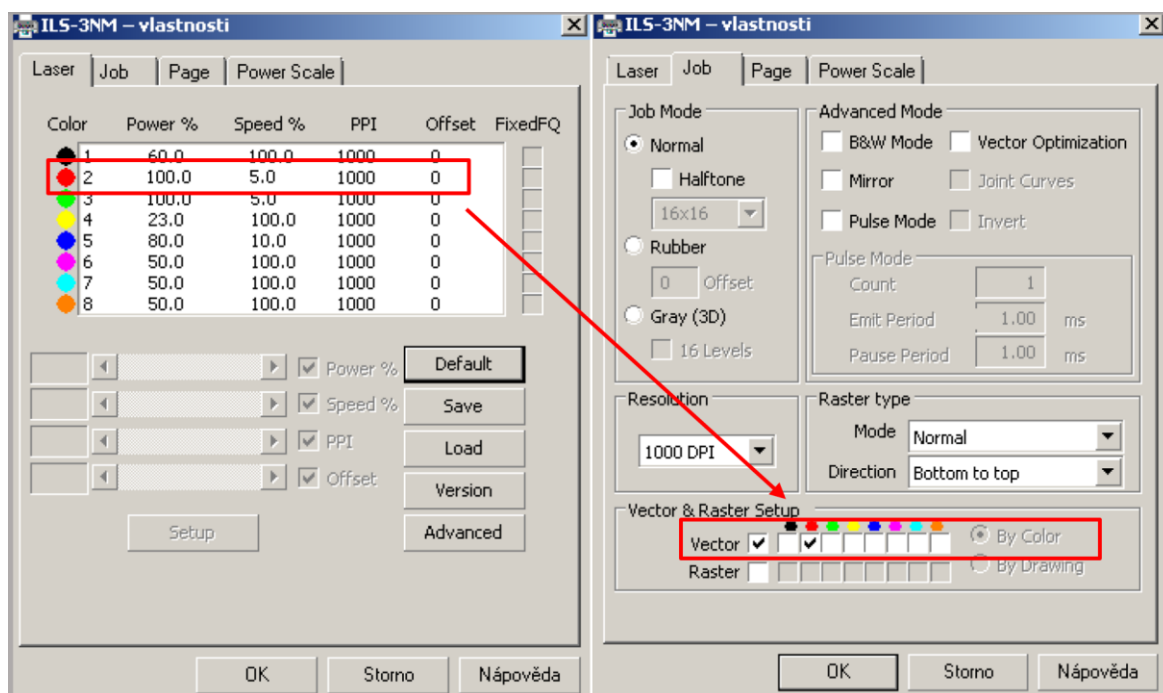
Pro zkoušku mikrotvrdomosti byla zvolena zkušební tělíska rozměrově shodná s tělísky pro zkoušku ohybem.

9.2 Vytvoření souboru

Vzorky byly narýsovány v programu AutoCAD a následně vyexportovány ve formátu .dwg, který je pro software CorelDraw komunikující s laserovým zařízením nejvhodnější.

Po otevření souboru v programu CorelDraw je nutné zkontrolovat a případně upravit obrys zkušebního tělíska tak, aby tvořil jednu uzavřenou smyčku a nebyl složen z čar. Laser díky tomu tělísko vyřeže kontinuálně bez zastavení nebo přejíždění mezi konci jednotlivých čar. Z tohoto důvodu bylo také důležité dbát na to, aby začátek a konec řezu, který leží v jednom bodě, byl v nenamáhaném místě, kde neovlivní výsledek zkoušky – materiál je na tomto místě po velmi krátkou dobu vystaven laserovému paprsku dvakrát.

Dalším krokem je nastavení konkrétních parametrů vypalovaných vzorků. Obrys tělíska musí mít formát vlasového obrysu, kterému se následně přiřadí barva. Software komunikuje s laserem pomocí barevných hladin, kde každé barvě můžou být přiřazeny rozdílné nastavení parametrů výkonu, řezné rychlosti a PPI.



Obr. 23 Nastavení řezných parametrů v softwaru CorelDraw

Na vyřezání tělíska pro tahovou zkoušku byla nejprve zvolena čočka s ohniskovou vzdáleností 1,5“. Pro pět rozměrových skupin vzorků popsanych v kapitole 9.1 (str. 42) byly zvolen výkon 100 %, a řezná rychlost 3, 5 a 7 (%).

Následující obrázek zachycuje proces řezání a hotová zkušební tělíska pro tahovou zkoušku.



Obr. 24 Řezání vzorků pro zkoušku tahem

Pro další porovnání řezných parametrů byly zvoleny čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5, 2,5 a 4 (") spolu s konstantním řezným výkonem 100 % a konstantní řeznou rychlostí 3 %. U těchto parametrů je zajištěno úplné prořezání materiálu PMMA o tloušťce 4 mm všemi čočkami. Těmito parametry byly vyřezány pouze vzorky s rozměry stanovené normou.

Následně byly vyrobeny vzorky pro zkoušku ohybem. Čočky měly opět ohniskovou vzdálenost 1,5, 2,5 a 4 ("), řezný výkon byl 100 % a řezná rychlost byla 3 %.



Obr. 25 Řezání vzorků pro zkoušku ohybem

Zkouška mikrotvrdomosti pro plasty není normou definována, proto se běžně užívá norma ČSN 14577 popisující zkoušku tvrdosti kovů. Měření proběhlo na vzorcích vyřezaných čočkami s ohniskovými vzdálenostmi 1,5, 2,5 a 4 (") s neměnným výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 %, a na vzorcích vyřezaných čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5, výkonem 100 % a rozdílnou řeznou rychlostí 3, 5 a 7 (%).

10 VYHODNOCOVACÍ METODY

K vyhodnocení dat naměřených při zkouškách je zapotřebí stanovit jasný postup, které výpočty budou provedeny.

Aritmetický průměr \bar{x} je základní pojem statistiky vyjadřující průměrnou hodnotu sledovaného souboru dat. Jedná se o součet všech hodnot souboru vydělený jejich počtem. Lze jej vyjádřit jako:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 \dots + x_n}{n} \quad (10.1)$$

kde \bar{x} znamená aritmetický průměr

$x_1 + x_2 \dots + x_n$ značí součet hodnot od první až po n hodnotu x

n značí počet sečtených hodnot

Stejný vzorec lze také vyjádřit pomocí sumy:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (10.2)$$

Nejistota typu A u_A je založena na statistickém zpracování opakovaných měření za stejných podmínek jako je tlak nebo teplota v laboratoři. Chyby měření jsou chápány jako neznámé.

Nejistota typu A se zakládá na analýze hodnot naměřených za stálých podmínek prostředí. Vypočítá se jako:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (10.3)$$

kde n je počet měření

\bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot

x_i konkrétní naměřené hodnoty

Pokud je počet měření nižší než 10, hodnota u_A se koriguje následujícím koeficientem k_A :

Tab. 5 Koeficient násobení nejistoty u_A

Počet měření n	2	3	4	5	6	7	8	9
Koeficient k_A	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

Směrodatná odchylka s slouží k určení rozptýlení hodnot od hodnot průměrných. Vypočítá se jako odmocnina z rozptylu:

$$s = \sqrt{R} \quad (10.4)$$

kde R je rozptyl

Směrodatná odchylka popisuje, v jakém rozmezí od průměru souboru leží jeho daná část.

- 68,2% hodnot souboru leží v rozmezí ± 1 směrodatné odchylky od aritmetického průměru
- 95,4% hodnot souboru leží v rozmezí ± 2 směrodatné odchylky od aritmetického průměru
- 99,6% hodnot souboru leží v rozmezí ± 3 směrodatné odchylky od aritmetického průměru

Medián $Me(x)$ (střední hodnota) je hodnota statistického souboru, která leží vprostřed hodnot seřazených podle jejich velikosti. Vyjadřujeme jej jako:

$$Me(x) = x_{(n+1)/2} \quad (10.5)$$

kde $Me(x)$ značí medián

x je soubor dat o velikosti n prvků

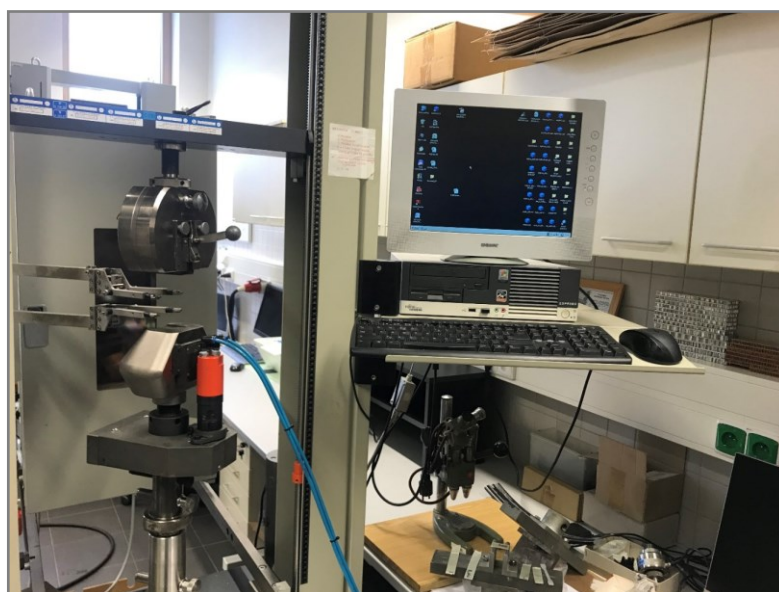
Medián eliminuje nedostatky aritmetického průměru v případě velkých rozdílů konkrétních hodnot souboru dat.

Hodnoty násobku dvou a tří směrodatné odchylky jednotlivých měření a medián jsou uvedeny v přílohách společně se všemi naměřenými daty.

11 ZKOUŠKA TAHEM

Tahová zkouška plastů je stanovena normou ČSN EN ISO 527-1 Plasty – Stanovení tahových vlastností. V návaznosti na ni pak norma ČSN EN ISO 527-2 popisuje tahovou zkoušku materiálů v podobě extrudované desky o tloušťce 4 mm, která byla pro experimentální část použita.

Zwick Materialprüfung 1456 je víceúčelové zařízení, které slouží ke zkoušce tahové, ohybové a tlakové. Zkouška byla provedena staticky, ale materiály lze namáhat také cyklicky.



Obr. 26 Zařízení Zwick 1456

Tab. 6 Parametry zařízení Zwick Materialprüfung 1456

Zwick Materialprüfung 1456	
Pracovní výška	1 284 mm
Pracovní šířka	420 mm
Výška zařízení	2 012 mm
Šířka zařízení	630 mm
Snímače zatěžující síly	2,5 a 20 KN
Maximální posuvová rychlost příčnicku	800 mm.min ⁻¹
Vyhodnocuje	tah, ohyb a tlak
Způsob zatížení	statické a cyklické

11.1 Vlastní měření zkoušky tahem

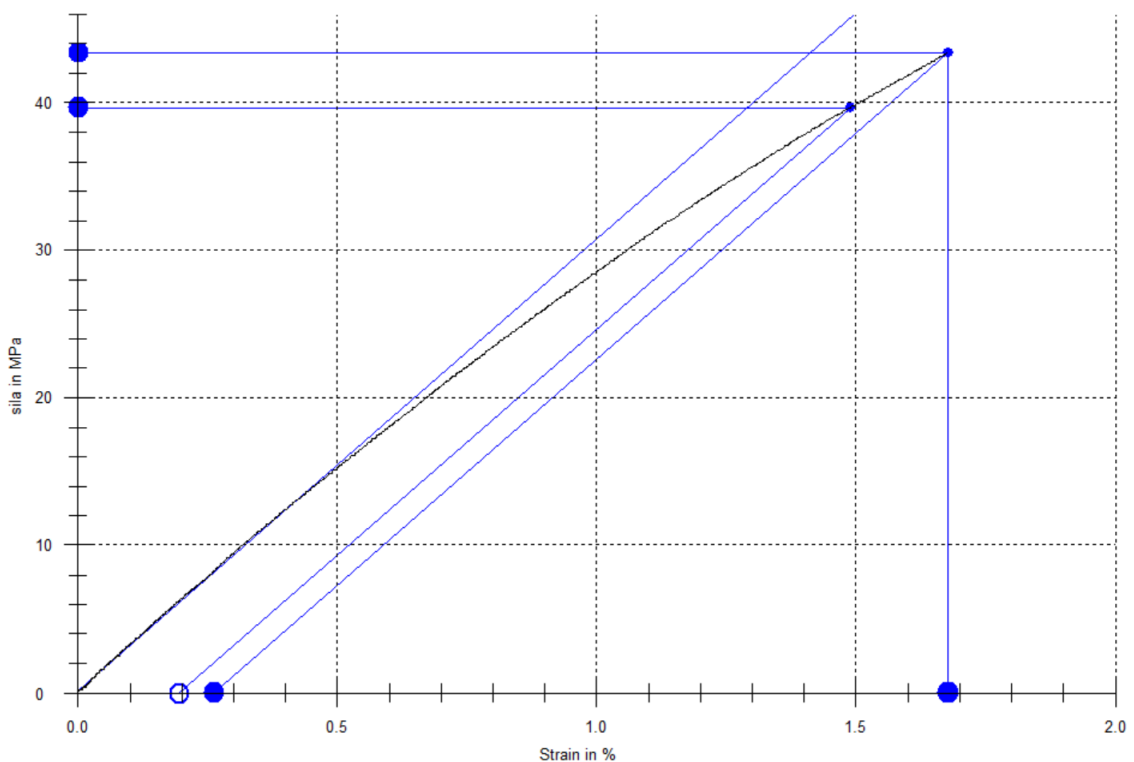
Podstatou zkoušky je protahování zkušebního tělíska v jeho podélné ose konstantní tažnou rychlostí do fáze jeho porušení nebo dosažení předem stanovených hodnot (napětí v podobě zatížení nebo deformace v podobě prodloužení).

Zkušební rychlosti, kterými se budou v průběhu měření čelisti vzdalovat, byly nastaveny na $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do momentu změření modulu pružnosti v tahu E_t a následně na rychlost $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do momentu ukončení zkoušky. Extenzometr byl nastaven na upínací vzdálenost 50 mm.

Prvním krokem každého opakovaného cyklu bylo změření rozměrů b_1 (mm) a h (mm) zkušebního tělíska. Tyto rozměry byly zapsány do výpočetní tabulky programu TestExpertII, přes který trhací stroj Zwick komunikuje s počítačem.

Poté se do čelistí stroje vloží a upne zkušební tělísko tak, aby byla jeho osa shodná s tahovou osou zkušebního stroje. Čelisti se utáhnou, aby nedošlo k proklouznutí tělíska v průběhu zkoušky, ale zároveň nesmí dojít k jeho mechanickému porušení vlivem silného stisku. Horní čelist je zabezpečena mechanicky a dolní pneumaticky.

Po upnutí tělíska je možné provést samotnou zkoušku. Průběh zkoušky včetně grafu a jejich výsledků, které jsou zapsány v tabulce, se následně zobrazí v softwaru TestExpertII.



Obr. 27 Graf průběhu zkoušky tahem

11.2 Vyhodnocované parametry zkoušky tahem

Pro vyhodnocení zkoušky byly stanoveny tyto výpočty:

- E_t (MPa) – modul pružnosti v tahu
- F_{\max} (N) – maximální síla dosažená při zkoušce
- ΔF_{\max} (%) – poměrné prodloužení při dosažení maximální síly
- W_{break} (N.mm⁻¹) – práce spotřebovaná pro přetržení
- σ_{mt} (MPa) – mez pevnosti v tahu

Výpočty byly provedeny dle příslušné normy.

Modul pružnosti v tahu E_t (MPa) vyjadřuje schopnost materiálu odolávat plastické (nevratné) deformaci. Geometricky se vynáší jako směrnice přímkové části diagramu, kde poměrné prodloužení roste úměrně s napětím. Po stanovení dvou bodů v této oblasti se vynese úsečka a z jejího úhlu tangens se získá modul. Vyjádřit jej lze jako:

$$E_t = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} \text{ (MPa)} \quad (11.1)$$

Kde E_t (MPa) - modul pružnosti v tahu, $\Delta \sigma$ (MPa) je změna napětí, $\Delta \varepsilon$ (%) je poměrné prodloužení, ΔF (N) je změna působící síly, S_0 (mm²) je plocha průřezu zkoušené části vzorku, ΔL (mm) je změna délky zkušební tělíska a L_0 (mm) je původní délka zkušební tělíska.

Maximální síla F_{\max} (N) je největší dosažená síla, která byla naměřena do okamžiku dosažení meze kluzu – mez, při které je zaznamenána první plastická deformace.

Poměrné prodloužení při dosažení maximální síly ΔF_{\max} (%) je způsobeno vznikem tahových napětí a dochází k deformaci tělesa v podobě prodloužení vzorku ve směru osy působící síly a snížením plochy průřezu S_0 . Deformaci lze rozdělit na pružnou (elastickou), kdy tělísko získá svůj původní tvar po uvolnění zatěžující síly, nebo trvalou (plastickou), kdy po uvolnění síly zůstane tělísko deformované. Hodnota poměrného prodloužení se vyjadřuje jako poměr deformovaného rozměru k rozměru původnímu. Lze vyjádřit jako:

$$\Delta F_{\max} = \frac{\Delta L}{\Delta L_0} (\%) \quad (11.2)$$

Kde ΔF_{\max} (%) je poměrné prodloužení při dosažení maximální síly, ΔL (mm) je změna délky zkušební tělíska a L_0 (mm) je původní délka zkušební tělíska.

W_{break} (N.mm⁻¹) je práce spotřebovaná do přetržení zkušební tělíska.

Mez pevnosti v tahu σ_{mt} (MPa) je maximální napětí, kterému je materiál schopen odolávat v tahu a odpovídá největší dosažené síle F_{\max} . Lze ji vyjádřit jako:

$$\sigma_{mt} = \frac{F_{\max}}{S_0} (\text{MPa}) \quad (11.3)$$

Kde σ_{mt} (MPa) je mez pevnosti v tahu, S_0 (mm²) je počáteční plocha průřezu zkušební části tělíska a F_{\max} (N) je největší dosažená síla.

12 ZKOUŠKA OHYBEM

U houževnatých materiálů se většinou zkouška ohybem neprovádí, protože průhyb zkušebního tělíska je pro kvalitní výsledky příliš veliký a vzorek se nemusí trvale zdeformovat. U PMMA jako u křehkého amorfního polymeru je naopak zkouška ohybem dobrým ukazatelem jeho deformační schopnosti.

12.1 Vlastní měření zkoušky ohybem

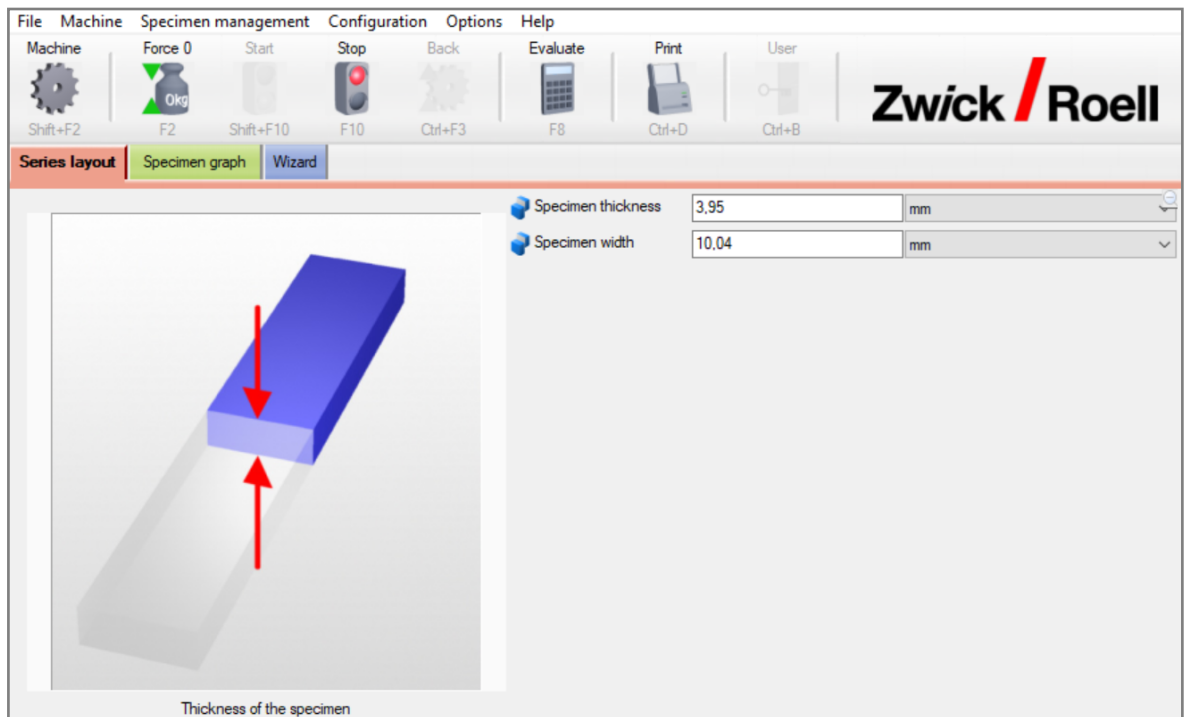
Zkouška je založena na principu uložení zkušebního tělíska obdélníkového průřezu na dvě podpěry, které je následně v jeho středu zatíženo konstantně rostoucí silou F (N), jenž je přenášena trnem. Zkouška probíhá do chvíle, kdy dojde ke zlomení tělíska.

The screenshot displays the Zwick/Roell TestExpertII software interface. The top menu bar includes File, Machine, Specimen management, Configuration, Options, and Help. Below the menu is a toolbar with icons for various functions. The main window is divided into several sections:

- Left Sidebar:** A tree view showing the test configuration steps, each with a green checkmark indicating it is completed or active. The steps include: Test definition, Start position, Pre-load, Specimen data, Test, End of test, Results, E-Modulus, Yield point, Break investigation, Extensometer, Specimen holders, Actions after test, Test data memory, Display/Calculation, and Parameters for the report.
- Central Graph:** A plot showing the test results, likely Force vs. Displacement, with a blue curve and a red dot indicating a specific point of interest.
- Right Sidebar:** A list of active parameters with columns for Abbreviation, Units, and Name. The list includes parameters such as Flow, Fhigh, Emod, F at 0.1% plastic deformation, F at 0.2% plastic deformation, Proof stress ratio, Fx1 through Fx6, Force at test standard deflection, Upper yield point, Yield point ratio, dl at upper yield point, dl (corr.) at upper yield point, Fmax, dl at Fmax, dl(corr.) at Fmax, dl(plast.) at Fmax, Fbreak, dl at break, dl (corr.) at break, dl (plastic) at break, W to Fmax, W to break, and S0.

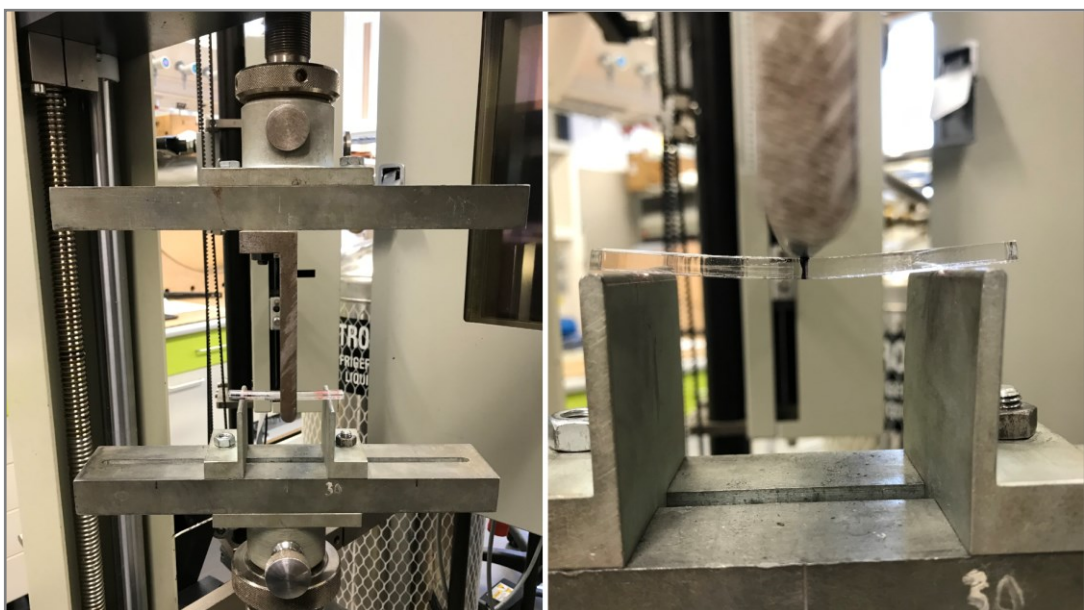
Obr. 28 Konfigurace parametrů programu TestExpertII

Dalším krokem je změření rozměrů b_1 a h . Rozměry se následně zapíšou do softwaru TestExpertII, který je použit při vyhodnocení měření.

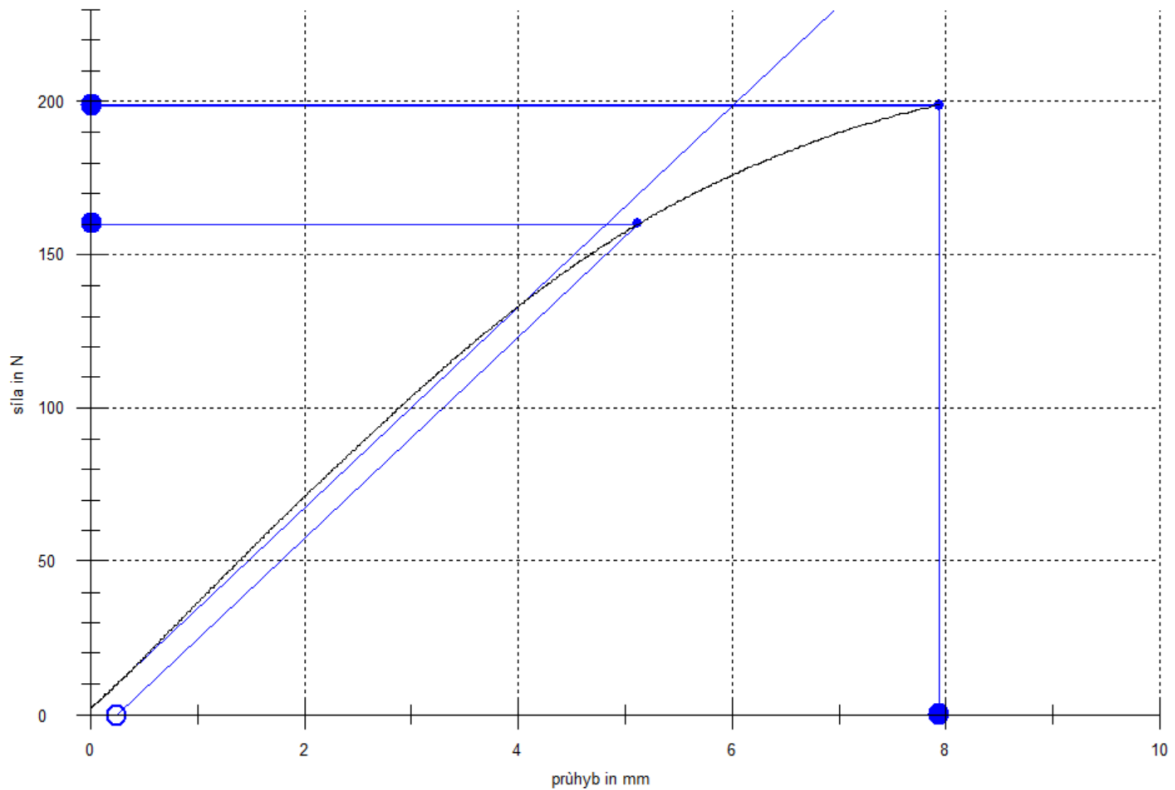


Obr. 29 Zadávání rozměrů zkoušeného vzorku

Následně již bylo na podpory kolmo a symetricky ke středu zatěžujícího trnu uloženo zkušební tělísko, které bylo zatěžováno.



Obr. 30 Průběh zkoušky ohybem



Obr. 31 Graf průběhu zkoušky ohybem

12.2 Vyhodnocované parametry zkoušky ohybem

Po provedení zkoušky ohybem byla vyhodnocena následující data:

- E_o (MPa) – modul pružnosti v ohybu
- σ_{mo} (MPa) – mez pevnosti v ohybu
- F_{max} (N) – maximální síla dosažená při zkoušce
- ΔF_{max} (%) – průhyb vzorku při dosažení maximální síly
- WF_{max} (N.mm⁻¹) – spotřebovaná energie pro dosažení maximální síly

Výpočty byly stanoveny dle normy ČSN IEN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností.

Modul pružnosti v ohybu E_o (MPa) obdobně jako u tahové zkoušky vyjadřuje schopnost materiálu odolávat nevratné deformaci a stejným způsobem se taky získává jeho hodnota – vynesením směrnice přímkové části diagramu a jejího úhlu tangens.

$$E_o = tg\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \text{ (MPa)} \quad (12.1)$$

Mez pevnosti v ohybu σ_{mo} (MPa) maximální napětí, kterému je materiál schopen odolávat v ohybu a odpovídá největší dosažené síle F_{max} . Lze ji vyjádřit jako:

$$\sigma_{mo} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ (MPa)} \quad (12.2)$$

Kde σ_{mo} (MPa) je mez pevnosti v ohybu, F_{max} (N) je maximální dosažená síla, L (mm) je vzdálenost mezi podporami, b (mm) je šířka vzorku v řezu a h (mm) je výška vzorku v řezu.

Maximální síla F_{max} (N) je největší dosažená síla, která byla naměřena zaznamenání první plastická deformace.

Změna na maximální síle ΔF_{max} (%) je deformace ohybem v okamžiku dosažení maximální síly F_{max} (N).

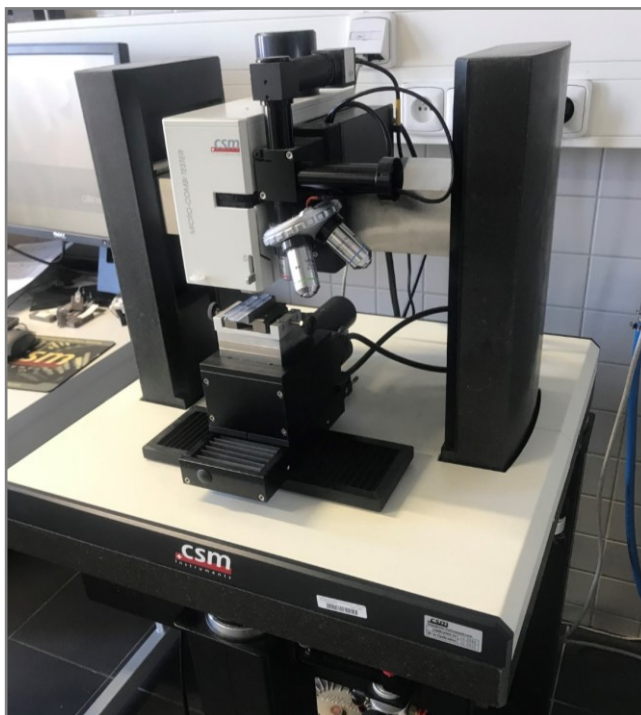
WF_{max} (N.mm⁻¹) je práce spotřebovaná do dosažení maximální zatěžující síly.

Všechny výše popsané výpočty vyhodnocuje použitý software TestExpertII automaticky.

13 KOMBINOVANÁ ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI

Zkouška DSI (Depth Sensing Indentation) je založena na neustálém zaznamenávání hloubky vtisku a působící síly během jejího růstu i poklesu.

K měření mikrotvrdomosti opracovaného materiálu bylo použito zařízení CSM Micro Combi Tester, které je osazeno univerzální měřicí hlavou pro stanovení mechanických vlastností objemových vzorků nebo povlaků o tloušťce 1 - 20 μm . Umožňuje změřit adhezi, odolnost vůči vrypu, tvrdost, modul pružnosti, tření a opotřebení.



Obr. 32 Zařízení CSM Micro Combi Tester

Tab. 7 Technická specifikace zařízení

Maximální zatížení	30 (N)
Rozlišení zatížení	6 (μN)
Rychlost zatížení	až 300 (N/min)
Rozsah hloubky	1 000 (μm)
Rozlišení hloubky	0,03 (μm)
Rychlost vrypu	0,1 - 600 (mm/min)

13.1 Vlastní měření kombinované zkoušky mikrotvrdosti

Měření probíhalo na řezané hraně co nejbližší k místu, kde paprsek vstupoval do obráběného materiálu. Po uložení vzorku do zařízení na něj začne působit postupně rostoucí síla, která je přenášena diamantovým jehlanem. Jakmile síla dosáhne hodnoty $F = 1$ (N), její růst se zastaví a síla působí neměnně po dobu 90 sekund. Následně dochází k postupnému uvolňování zatěžující síly a proces měření je u konce.

13.2 Vyhodnocované parametry kombinované zkoušky mikrotvrdosti

Ze zkoušky byly vyhodnoceny tyto parametry:

Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

Za ideálních podmínek chování materiálu je obdobný jako Youngův modul.

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}} \text{ (MPa)} \quad (13.1)$$

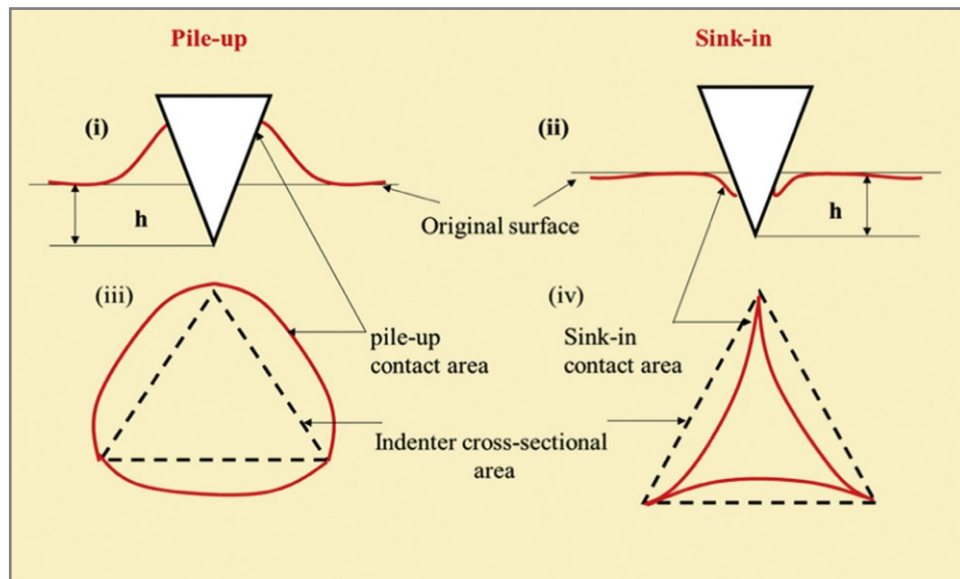
Kde v_s = Poissonův poměr pro materiál zkušebního tělíska, v_i = Poissonův poměr pro materiál hrotu, E_i = modul vnikajícího hrotu, E_r = redukovaný modul vtiskového kontaktu.

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C * \sqrt{A_p}} \quad (13.2)$$

Kde C = kontaktní poddajnost, A_p = průmět kontaktní plochy.

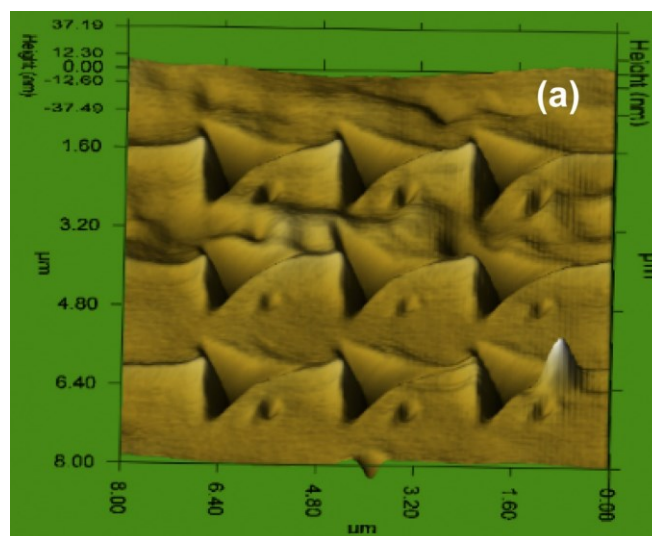
Při měření však může dojít k tzv. „pile-up“ nebo „sink-in“ efektu, který může výsledky měření ovlivnit. Jedná se o hromadění (přemístování) materiálu během rostoucího zatížení buď ve směru působící síly, kdy je materiál vtahován hrotem (sink-in), nebo je naopak hrotem vytlačován a hromadí se po obvodu hrotu nad úroveň původního povrchu (pile-up).

Na následujícím obrázku je znázorněno ovlivnění projekční plochy při průniku do stejné hloubky, kdy v případě pile-up efektu je plocha zdánlivě menší než ve skutečnosti, naopak v případě sink-in je projekční plocha zdánlivě větší než ve skutečnosti. [38]



Obr. 33 Pile-up a sink-in efekt. [38]

Pro PMMA je typickým chováním hromadění materiálu, tedy pile-up efekt. [38]



Obr. 34 Fotografie vtisků v materiálu PMMA. [38]

Jelikož je zdánlivá projekční plocha menší než plocha skutečná, po korekci plochy je možné, že v případě PMMA budou výsledné mechanické vlastnosti materiálu o více než 30% nižší. [38]

Vtisková tvrdost H_{IT}

Vyjadřuje odolnost materiálu vůči jeho poškození nebo trvalé deformaci.

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p} \text{ (MPa)} \quad (13.3)$$

Kde F_{\max} = maximální síla, které bylo během měření dosaženo, A_p = úhlopříčka plochou kontaktu mezi hrotem zařízení a zkušebním tělískem v závislosti na hloubce vtisku.

Tvrdość podle Vickerse HV_{IT}

Stejně jako H_{IT} vyjadřuje odolnost materiálu vůči poškození nebo trvalé deformaci.

Vyjádření při zkoušce s jehlanem pro měření podle Vickerse:

$$A_p = 24,50 * h_c^2 \quad (13.4)$$

Kde h_c – kontaktní hloubka hrotu se zkušebním tělískem.

Hloubka vtisku h_m

Během měření je zaznamenána maximální hloubka, do které se diamantový jehlan dostal.

14 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

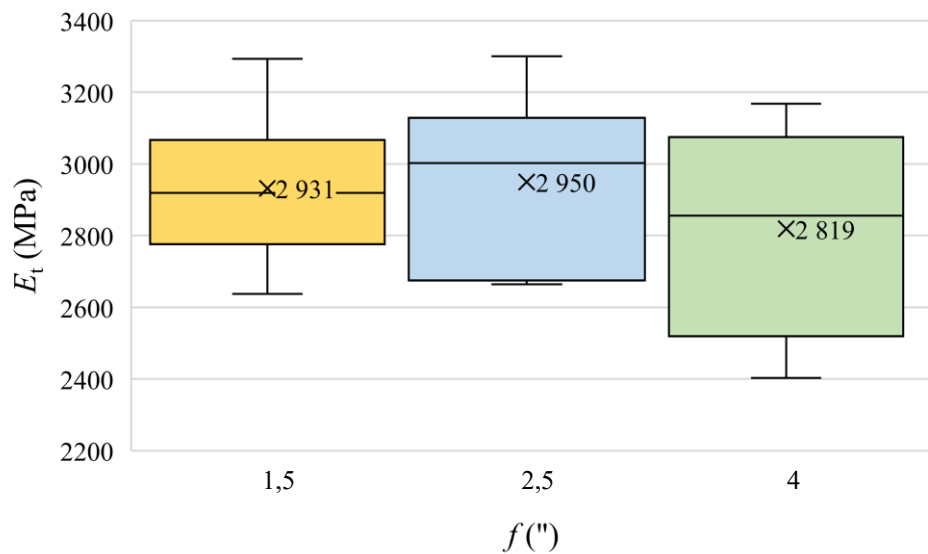
V následujících kapitolách jsou uvedena vyhodnocení naměřených dat zkoušky tahem, zkoušky ohybem a kombinované zkoušky mikrotvrdomi.

14.1 Výsledky tahové zkoušky pro rozdílnou ohniskovou vzdálenost

V tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány ččkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností, konstantním řezným výkonem 100 % a konstantní řeznou rychlostí 3 %. Šířka namáhané části tělíska byla 10 mm. Pro každou ohniskovou vzdálenost proběhlo 10 měření.

Tab. 8 Výsledky tahové zkoušky pro $P/v_f = 100/3$ (%) a rozdílnou f

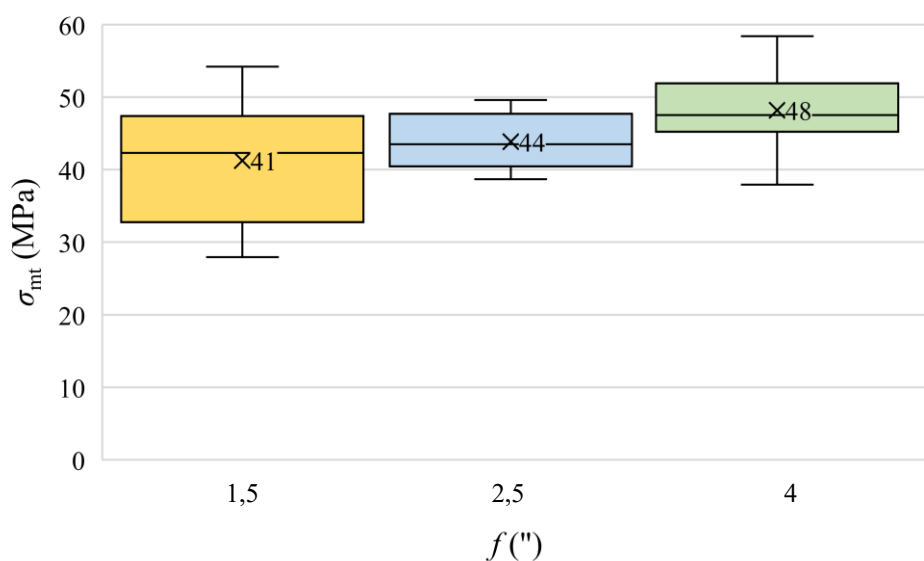
$f = 1,5$ (")								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1601,54	2931,45	41,24	1,52	446,65	9,76	3,98	38,82
s	339,11	190,69	8,65	0,49	237,91	0,14	0,02	0,63
u_A	107,24	60,30	2,73	0,16	75,23	0,04	0,01	0,20
$f = 2,5$ (")								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1718,73	2949,96	43,84	1,65	478,88	9,80	4,00	39,21
s	148,93	249,01	3,83	0,18	105,76	0,05	0,02	0,37
u_A	47,10	78,75	1,21	0,06	33,44	0,02	0,01	0,12
$f = 4$ (")								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1884,81	2818,92	48,19	1,92	620,16	9,80	3,98	39,13
s	222,94	274,48	5,84	0,35	203,17	0,08	0,01	0,26
u_A	70,50	86,80	1,85	0,11	64,25	0,02	0,00	0,08



Obr. 35 Modul pružnosti v tahu v závislosti na ohniskové vzdálenosti

Z výsledků měření tahové zkoušky pro vzorky vyrobené čočkami o rozdílné ohniskové vzdálenosti je zřejmé, že modul pružnosti v tahu E_t má nejvyšší hodnoty v případě čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5". U čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5" došlo k mírnému poklesu, hodnota E_t byla nejnižší u čočky s ohniskovou vzdáleností 4".

Mez pevnosti v tahu σ_{mt} byla nejvyšší u čočky s ohniskovou vzdáleností 4", u čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5" byl zaznamenán pokles. Nejnižší hodnota pak byla zaznamenána u čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5".



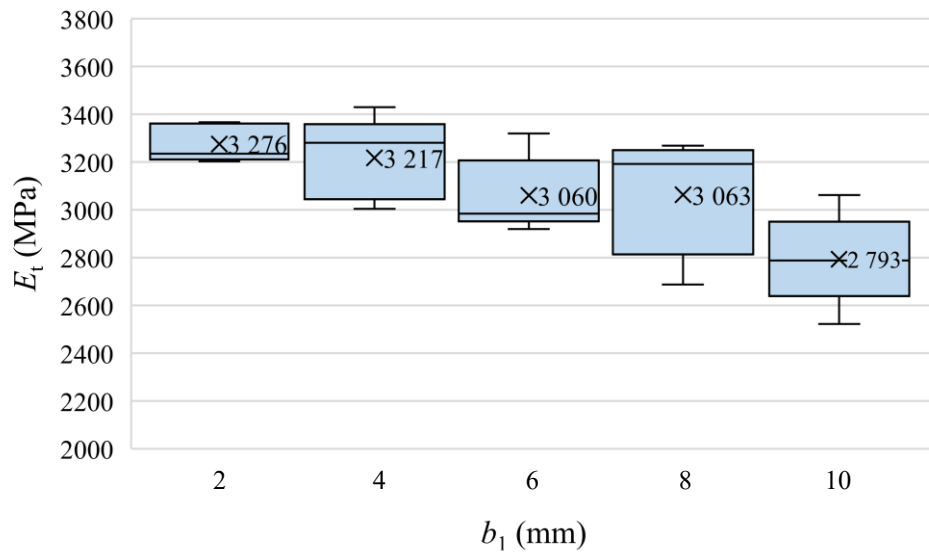
Obr. 36 Pevnost v tahu v závislosti na ohniskové vzdálenosti

14.2 Výsledky tahové zkoušky pro nové vzorky

V následující tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 7 %. Šířka namáhané části tělíska b_1 byla proměnná. Pro každý rozměr b_1 proběhlo 5 měření.

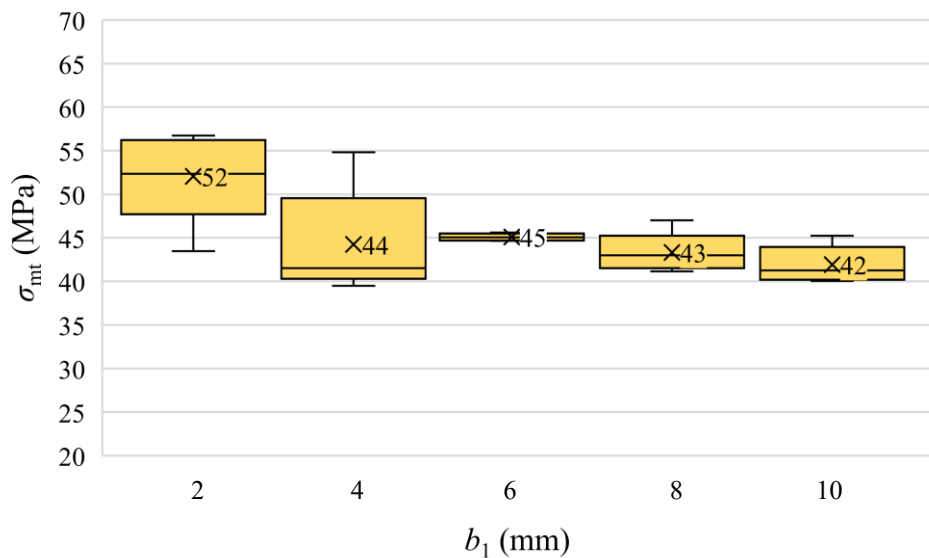
Tab. 9 Výsledky tahové zkoušky vzorků pro $P/v_f = 100/7$ (%) a různé b_1 (mm)

$b_1 = 2$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	371,94	3275,56	52,04	2,00	128,59	1,81	3,95	7,15
s	35,54	78,94	5,22	0,29	31,44	0,02	0,01	0,08
u_A	22,25	49,43	3,27	0,18	19,68	0,01	0,00	0,05
$b_1 = 4$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	663,08	3217,12	44,25	1,52	172,19	3,80	3,94	14,98
s	94,58	170,97	6,15	0,29	64,15	0,02	0,01	0,09
u_A	59,22	107,04	3,85	0,18	40,17	0,01	0,01	0,05
$b_1 = 6$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1038,36	3059,92	45,08	1,52	267,84	5,83	3,95	23,03
s	10,40	157,59	0,41	0,16	14,20	0,02	0,01	0,03
u_A	6,51	98,67	0,26	0,10	8,89	0,01	0,01	0,02
$b_1 = 8$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1333,27	3062,84	43,31	1,42	327,22	7,81	3,94	30,79
s	69,66	246,68	2,26	0,13	45,68	0,02	0,01	0,09
u_A	43,62	154,44	1,41	0,08	28,60	0,01	0,01	0,06
$b_1 = 10$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1633,38	2793,24	41,91	1,48	392,77	9,87	3,95	38,97
s	86,74	192,96	2,12	0,15	52,69	0,04	0,01	0,12
u_A	54,31	120,81	1,33	0,09	32,99	0,03	0,00	0,07



Obr. 37 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 7$ (%)

U vzorků vyřezaných čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 7 % byl zaznamenán mírně klesající trend modulu pružnosti v tahu E_t i pevnosti v tahu σ_{mt} s rostoucí šířkou krčku b_1 .

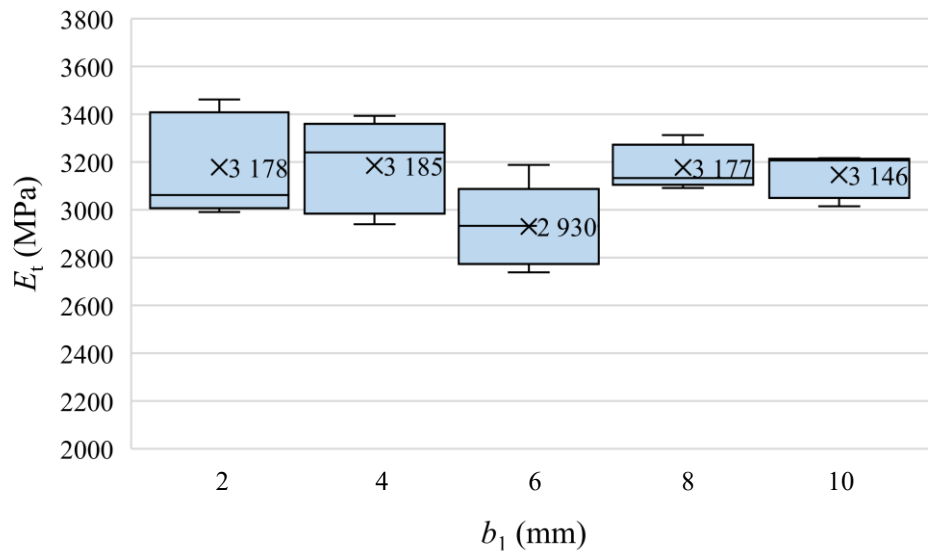


Obr. 38 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 7$ (%)

V následující tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 5 %. Šířka namáhané části tělíska b_1 byla proměnná. Pro každý rozměr b_1 proběhlo 5 měření.

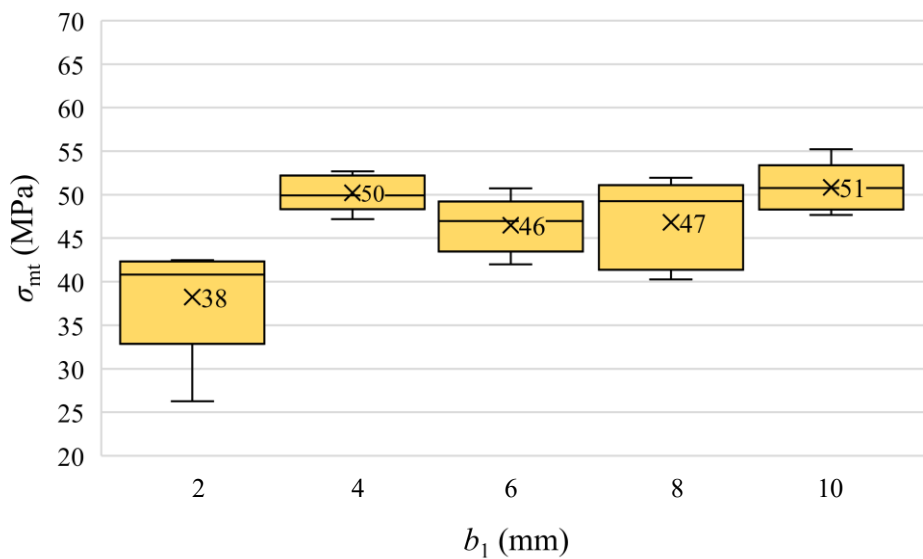
Tab. 10 Výsledky tahové zkoušky vzorků pro $P/v_f = 100/5$ (%) a různé b_1 (mm)

$b_1 = 2$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	269,58	3178,30	38,23	1,18	57,23	1,78	3,98	7,07
s	44,62	214,53	6,81	0,26	18,67	0,04	0,01	0,13
u_A	19,96	95,94	3,04	0,12	8,35	0,02	0,01	0,06
$b_1 = 4$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	759,26	3185,40	50,21	1,88	244,65	3,83	3,94	15,12
s	33,85	194,10	2,13	0,13	29,61	0,03	0,01	0,09
u_A	21,19	121,53	1,33	0,08	18,54	0,01	0,02	0,05
$b_1 = 6$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1064,92	2930,36	46,47	1,68	304,49	5,80	3,95	22,91
s	75,13	174,50	3,25	0,19	58,30	0,02	0,01	0,13
u_A	47,04	109,26	2,03	0,12	36,50	0,01	0,01	0,08
$b_1 = 8$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1440,26	3177,04	46,83	1,78	432,54	7,79	3,95	30,76
s	157,13	92,63	5,14	0,27	116,00	0,04	0,01	0,20
u_A	98,38	57,99	3,22	0,17	72,63	0,03	0,01	0,12
$b_1 = 10$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1969,38	3146,28	50,83	1,90	660,89	9,81	3,95	38,75
s	104,89	91,80	2,88	0,24	118,04	0,09	0,01	0,33
u_A	65,67	57,48	1,80	0,15	73,91	0,06	0,01	0,21



Obr. 39 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%)

U vzorků vyřezaných čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 5 % nebyl zaznamenán žádný pravidelný trend změny modulu pružnosti v tahu E_t nebo pevnosti v tahu σ_{mt} .

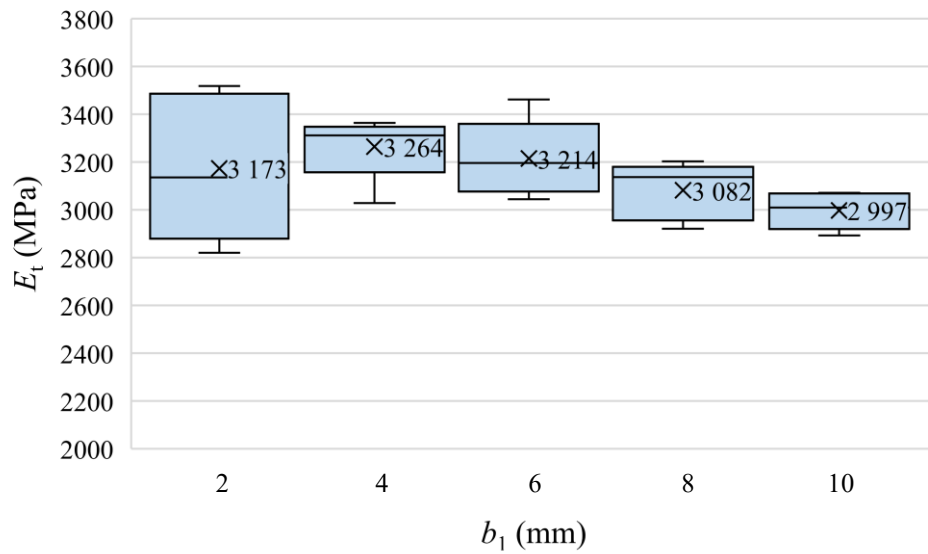


Obr. 40 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%)

V následující tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 %. Šířka namáhané části tělíska b_1 byla proměnná. Pro každý rozměr b_1 proběhlo 5 měření.

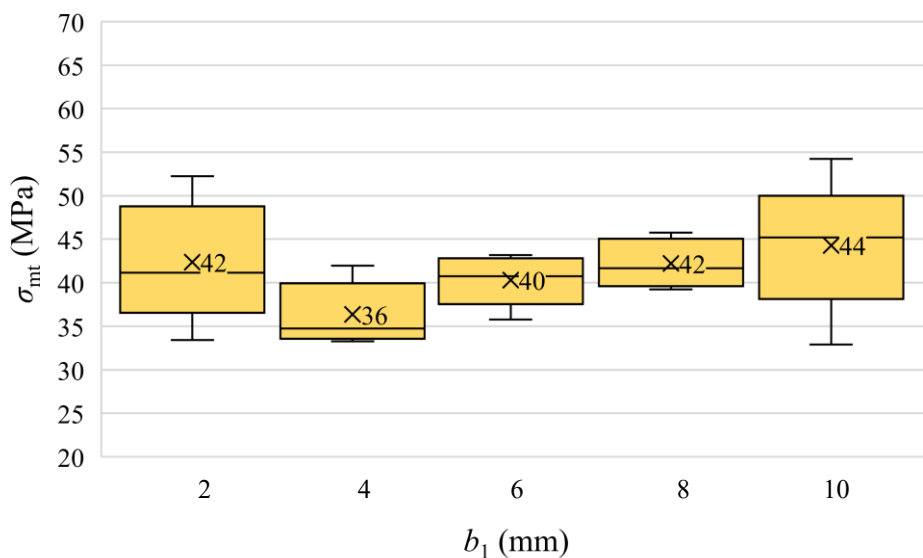
Tab. 11 Výsledky tahové zkoušky pro $P/v_f = 100/3$ (%) a různý rozměr b_1

$b_1 = 2$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	294,58	3172,98	42,36	1,58	80,83	1,74	4,02	6,98
s	41,73	307,89	6,98	0,46	34,31	0,06	0,02	0,22
u_A	26,13	192,77	4,37	0,29	21,48	0,04	0,01	0,14
$b_1 = 4$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	540,80	3264,30	36,35	1,16	106,85	3,74	3,97	14,87
s	56,34	134,99	3,61	0,15	24,57	0,04	0,01	0,13
u_A	35,27	84,52	2,26	0,09	15,39	0,02	0,01	0,08
$b_1 = 6$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	918,93	3214,06	40,29	1,42	210,21	5,75	3,97	22,80
s	70,33	160,69	2,94	0,08	31,98	0,04	0,00	0,17
u_A	44,03	100,61	1,84	0,05	20,02	0,02	0,00	0,11
$b_1 = 8$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1291,14	3081,60	42,20	1,48	320,47	7,70	3,97	30,60
s	85,05	120,33	2,81	0,13	46,96	0,03	0,02	0,19
u_A	53,25	75,34	1,76	0,08	29,40	0,02	0,01	0,12
$b_1 = 10$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	b_1 (mm)	h (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1730,86	2996,86	44,29	1,66	515,77	9,81	3,99	39,10
s	292,10	77,02	7,62	0,45	226,67	0,17	0,01	0,69
u_A	182,88	48,22	4,77	0,28	141,92	0,11	0,01	0,43



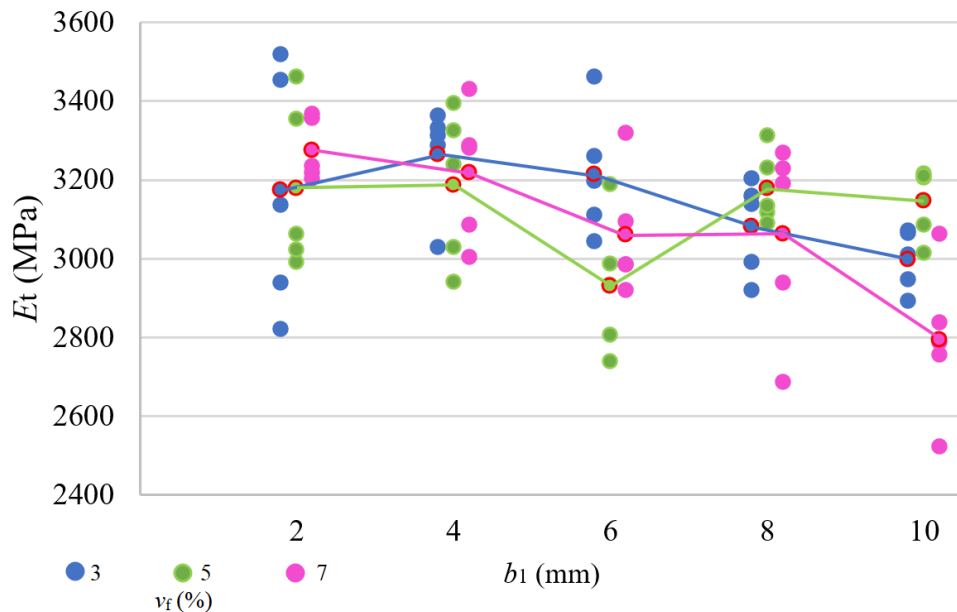
Obr. 41 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%)

U vzorků vyřezaných čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 % byl zaznamenán růst modulu pružnosti v tahu E_t u do rozměru zkušebního tělíska $b_1 = 4$ mm a následně pokles až k $b_1 = 10$ mm. Pevnost v tahu σ_{mt} mírně klesla u šířky zkušebního tělíska $b_1 = 4$ mm a následně rostla až do šířky $b_1 = 10$ mm .



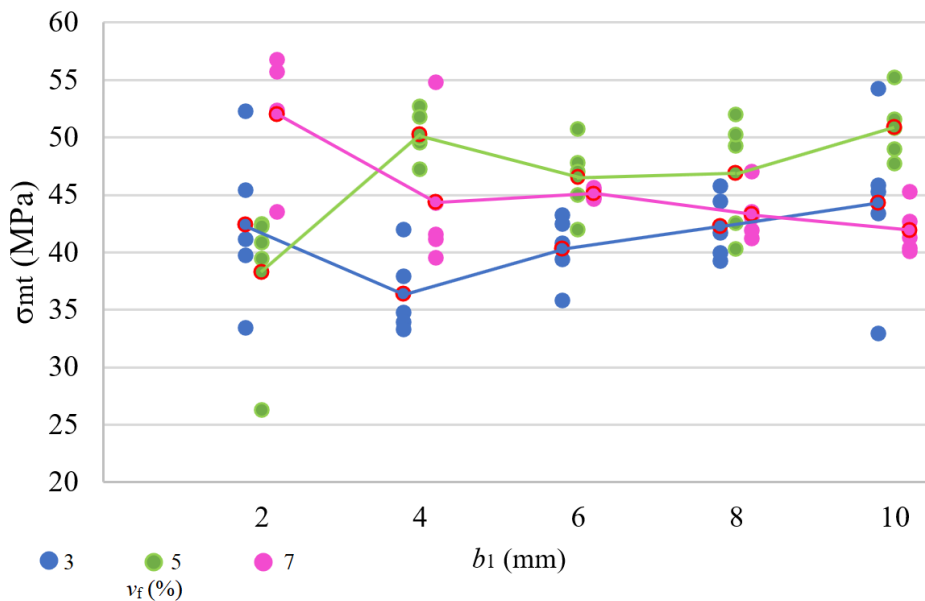
Obr. 42 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%)

Následující graf zobrazuje závislost modulu pružnosti v tahu E_t na šířce profilu nových vzorků. Jsou v něm bodově zaneseny všechny neměřené hodnoty jednotlivých řezných rychlostí, které jsou barevně odlišeny. Mezi hodnotami je také zvýrazněna průměrná hodnota každého souboru a výsledky měření jsou spojeny křivkou s výsledky jiné šířky profilu dané řezné rychlosti.



Obr. 43 Závislost modulu pružnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti

Následující graf zobrazuje obdobné hodnoty, pouze místo závislosti modulu pružnosti v tahu E_t zaznamenává hodnoty pevnosti v tahu σ_{mt} .



Obr. 44 Závislost pevnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti

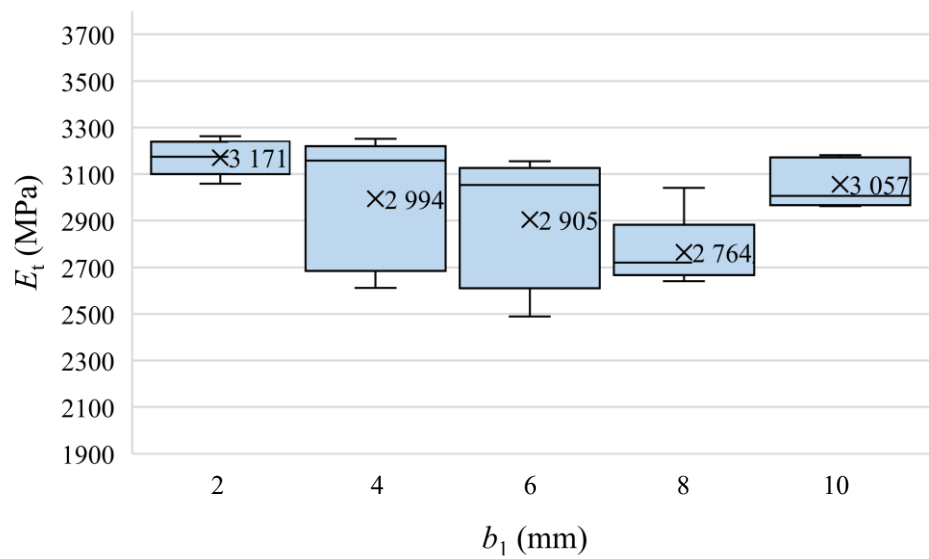
14.3 Výsledky tahové zkoušky pro staré vzorky

Tahová zkouška proběhla také na vzorcích, které byly vyrobeny za stejných podmínek, ale jejich stáří je 9 let. Po tuto dobu byly uloženy v suchém prostředí za standardního atmosférického tlaku, stálé pokojové teploty (okolo 22°C) a nebyly vystaveny přímému slunečnímu ani jinému svitu.

V následující tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 %. Šířka namáhané části tělíska b_1 byla proměnná. Pro každý rozměr b_1 proběhlo 5 měření.

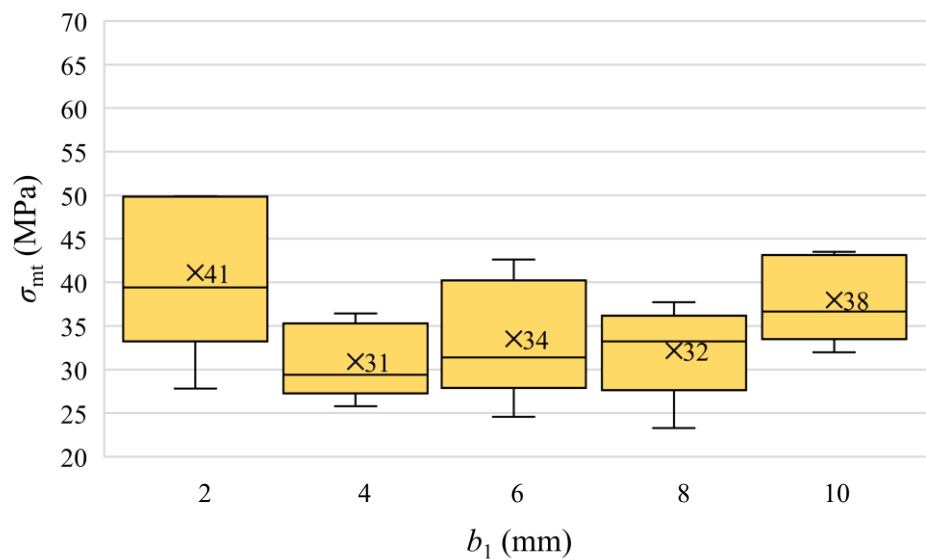
Tab. 12 Výsledky tahové zkoušky starých vzorků pro $P/v_f = 100/3$ (%) a různé b_1 (mm)

$b_1 = 2$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	303,14	3170,94	41,10	1,52	82,23	4,06	1,81	7,37
s	68,88	77,17	9,19	0,48	43,15	0,03	0,04	0,17
u_A	43,12	48,32	5,75	0,30	27,01	0,02	0,03	0,11
$b_1 = 4$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	478,18	2993,72	30,90	1,02	79,19	4,01	3,86	15,46
s	72,31	288,51	4,31	0,18	25,43	0,01	0,08	0,35
u_A	45,28	180,64	2,70	0,11	15,92	0,01	0,05	0,22
$b_1 = 6$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	777,46	2905,34	33,52	1,14	149,29	4,04	5,73	23,15
s	169,60	285,13	6,92	0,36	71,82	0,03	0,08	0,33
u_A	106,19	178,52	4,33	0,23	44,97	0,02	0,05	0,21
$b_1 = 8$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1002,98	2763,70	32,16	1,10	175,34	4,02	7,76	31,19
s	166,87	158,99	5,41	0,19	59,62	0,03	0,09	0,30
u_A	104,48	99,54	3,38	0,12	37,33	0,02	0,06	0,19
$b_1 = 10$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1505,54	3056,94	37,97	1,30	327,16	4,06	9,77	39,63
s	206,99	106,21	5,00	0,33	111,61	0,05	0,07	0,37
u_A	129,59	66,50	3,13	0,21	69,88	0,03	0,04	0,23



Obr. 45 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%)

Z výsledků měření je zřejmý pokles modulu pružnosti v tahu E_t od vzorku s šířkou krčku $b_1 = 2$ mm po $b_1 = 8$ mm a následně nárůst u vzorků s šířkou krčku 10 mm. Z měření pevnosti v tahu σ_{mt} nevyplývá žádný pravidelný trend a hodnoty jsou kolísavé.

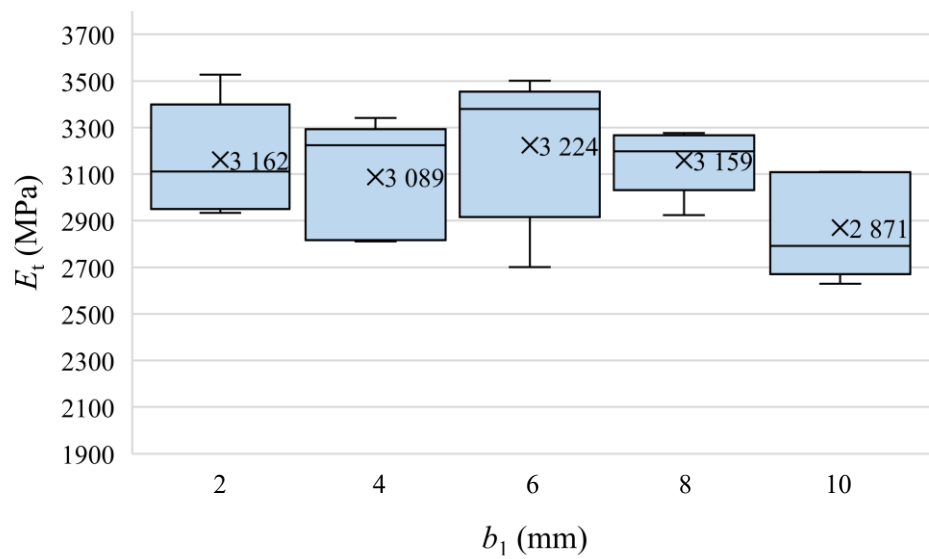


Obr. 46 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%)

V následující tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 5 %. Šířka namáhané části tělíska b_1 byla proměnná. Pro každý rozměr b_1 proběhlo 5 měření.

Tab. 13 Výsledky tahové zkoušky starých vzorků pro $P/v_f = 100/5$ (%) a různý rozměr b_1

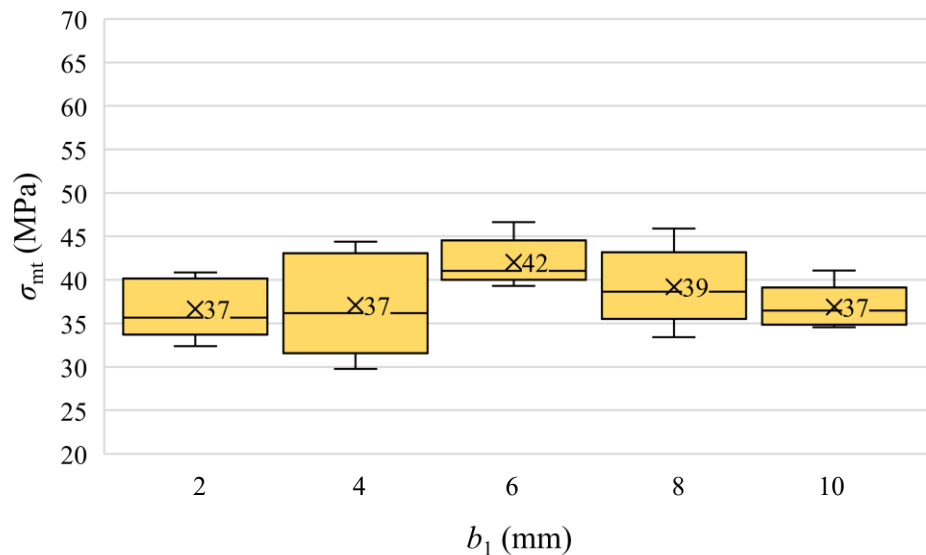
$b_1 = 2$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	263,16	3161,84	36,66	1,20	51,40	3,94	1,82	7,18
s	25,28	244,10	3,44	0,21	12,63	0,02	0,03	0,12
u_A	15,83	152,83	2,15	0,13	7,91	0,01	0,02	0,07
$b_1 = 4$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	555,82	3088,56	37,08	1,24	115,45	3,93	3,81	15,00
s	88,12	252,21	5,98	0,27	43,31	0,01	0,02	0,08
u_A	55,17	157,91	3,74	0,17	27,12	0,01	0,01	0,05
$b_1 = 6$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	949,24	3224,46	42,03	1,44	227,55	3,94	5,73	22,59
s	61,84	322,97	2,80	0,11	41,10	0,01	0,09	0,35
u_A	38,72	202,21	1,76	0,07	25,73	0,01	0,06	0,22
$b_1 = 8$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1195,10	3158,96	39,21	1,32	257,51	3,95	7,72	30,49
s	136,39	141,71	4,56	0,19	70,27	0,02	0,02	0,15
u_A	85,40	88,73	2,85	0,12	44,00	0,01	0,01	0,09
$b_1 = 10$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1413,38	2870,50	36,89	1,20	280,82	3,95	9,71	38,32
s	94,08	225,27	2,56	0,19	48,72	0,03	0,09	0,63
u_A	58,90	141,04	1,60	0,12	30,50	0,02	0,06	0,39



Obr. 47 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%)

Výsledky měření modulu pružnosti v tahu E_t vykazují mírný pokles hodnoty od šířky krčku 2 mm po šířku krčku 4 mm. Následně byl zaznamenán nárůst hodnot u krčku o šířce 6 mm a poté postupný pokles hodnot až k šířce krčku 10 mm.

Výsledky měření pevnosti v tahu σ_{mt} zaznamenaly mírný nárůst hodnot od krčku o šířce 2 mm po šířku krčku 6 mm a následně pokles hodnot k šířce krčku 10 mm.

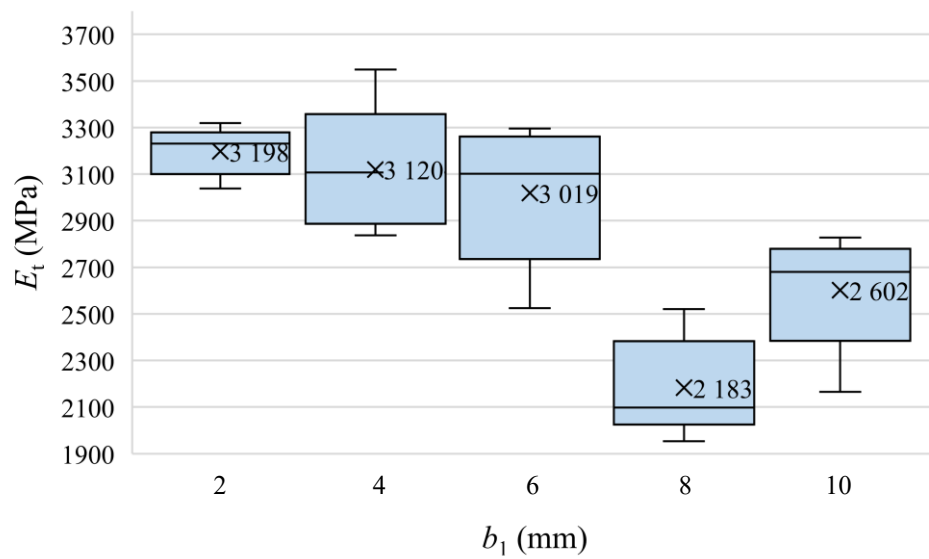


Obr. 48 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%)

V následující tabulce jsou vyhodnocená data tahové zkoušky vzorků, které byly řezány čoučkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 7 %. Šířka namáhané části tělíska b_1 byla proměnná. Pro každý rozměr b_1 proběhlo 5 měření.

Tab. 14 Výsledky tahové zkoušky starých vzorků pro $P/v_f = 100/7$ (%) a různý rozměr b_1

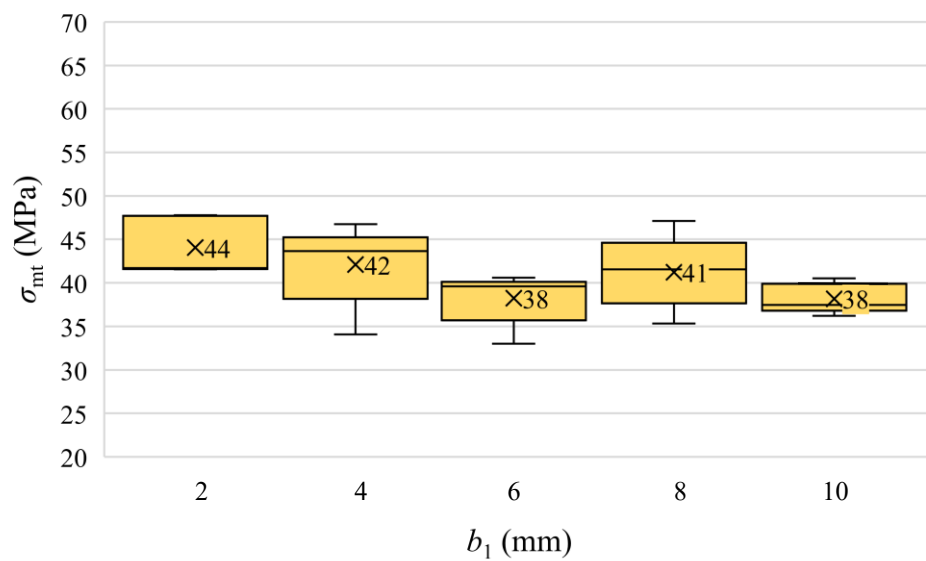
$b_1 = 2$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	318,24	3197,72	44,06	1,58	83,42	3,93	1,84	7,22
s	23,86	105,16	3,32	0,16	15,23	0,03	0,03	0,13
u_A	14,94	65,84	2,08	0,10	9,53	0,02	0,02	0,08
$b_1 = 4$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	636,56	3119,70	42,09	1,48	154,23	3,95	3,83	15,13
s	69,71	273,87	4,77	0,22	37,09	0,02	0,04	0,08
u_A	43,65	171,47	2,99	0,14	23,22	0,01	0,03	0,05
$b_1 = 6$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	875,76	3019,40	38,23	1,34	184,02	3,95	5,79	22,90
s	74,95	306,86	3,02	0,09	34,23	0,01	0,07	0,28
u_A	46,93	192,12	1,89	0,06	21,43	0,01	0,04	0,18
$b_1 = 8$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1268,54	2182,82	41,21	1,56	303,78	3,96	7,77	30,78
s	133,08	215,24	4,24	0,18	73,69	0,00	0,03	0,12
u_A	83,32	134,76	2,66	0,11	46,13	0,00	0,02	0,07
$b_1 = 10$ (mm)								
	F_{\max} (N)	E_t (MPa)	σ_{mt} (MPa)	ΔF_{\max} (%)	W_{break} (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	1474,20	2601,82	38,16	1,32	310,94	3,96	9,74	38,63
s	67,71	256,95	1,71	0,08	25,62	0,01	0,02	0,11
u_A	42,40	160,88	1,07	0,05	16,04	0,01	0,01	0,07



Obr. 49 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 100/7$ (%)

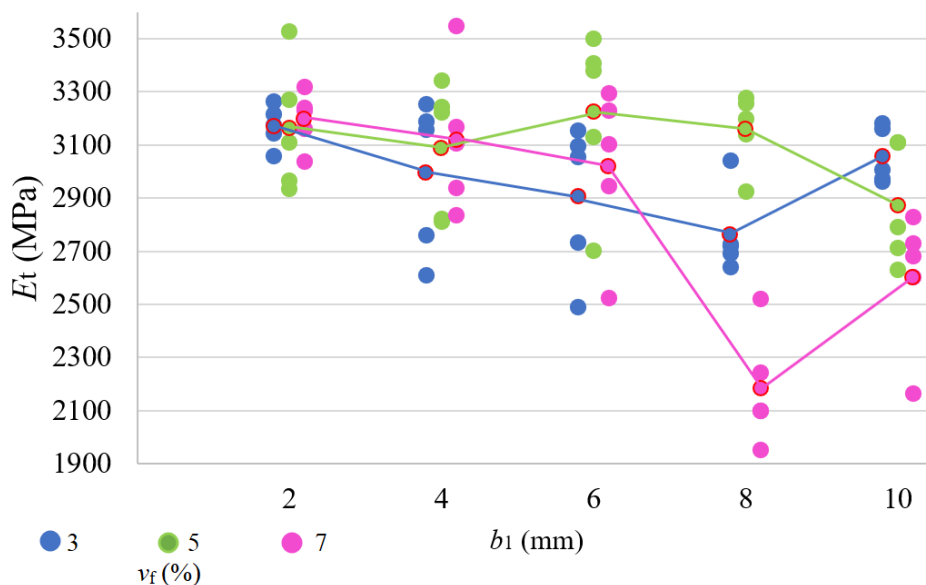
Z výsledků měření modulu pružnosti v tahu E_t pro řeznou rychlost 7 % lze vyzorovat stejný trend jako u řezné rychlosti 3 %. Hodnoty klesají od síly krčku 2 mm po 8 mm a následně rostou u šířky 10 mm. U krčku 8 mm a 10 mm byl také zaznamenán velmi výrazný pokles hodnot E_t .

Pevnost v tahu σ_{mt} nezaznamenala žádný pravidelný trend a kolísání hodnot nebylo tak výrazné, jako v případě výsledků E_t .



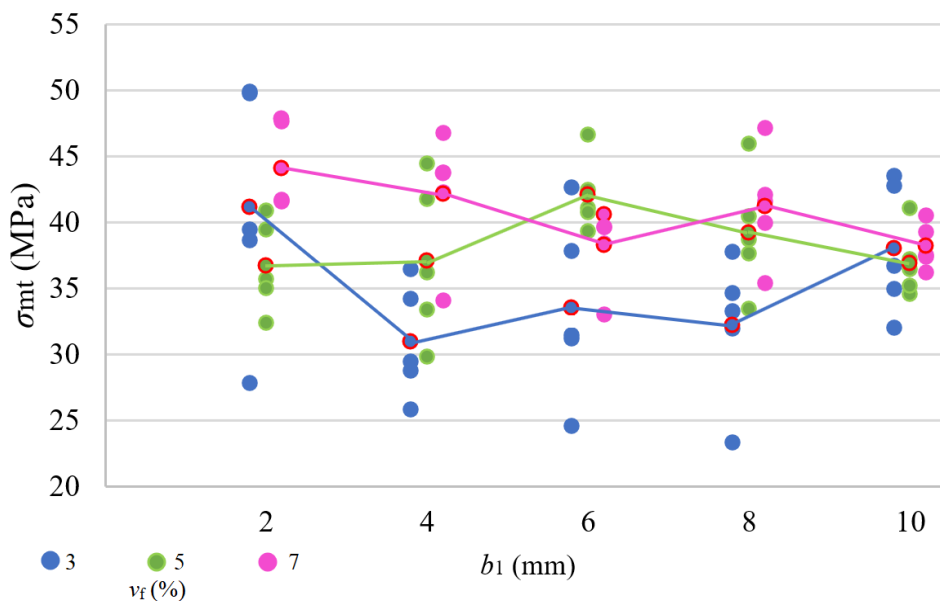
Obr. 50 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 100/7$ (%)

Následující graf zobrazuje závislost modulu pružnosti v tahu E_t na šířce profilu starých vzorků. Jsou v něm bodově zaneseny všechny neměřené hodnoty jednotlivých rychlostí v_f , které jsou barevně odlišeny. Mezi hodnotami je také zvýrazněna průměrná hodnota každého souboru a výsledky měření jsou spojeny křivkou s výsledky jiné šířky profilu dané řezné rychlosti.



Obr. 51 Závislost modulu pružnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti

Následující graf zobrazuje obdobné hodnoty, pouze místo závislosti modulu pružnosti v tahu E_t zaznamenává hodnoty pevnosti v tahu σ_{mt} .



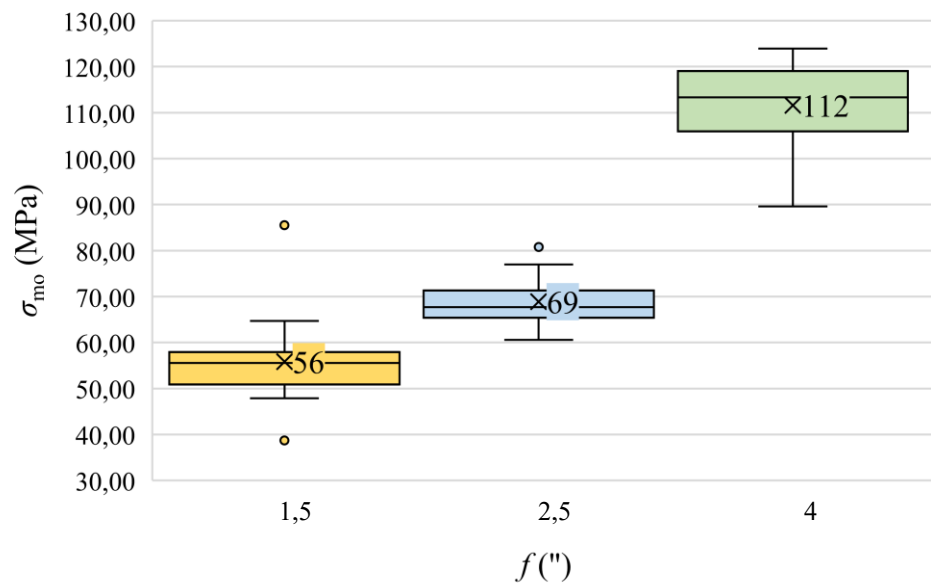
Obr. 52 Závislost pevnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti

14.4 Výsledky zkoušky ohybem

V následující tabulce jsou vyhodnocená data ohybové zkoušky vzorků, které byly řezány čočkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností, výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 %. Pro každou ohniskovou vzdálenost proběhlo 20 měření.

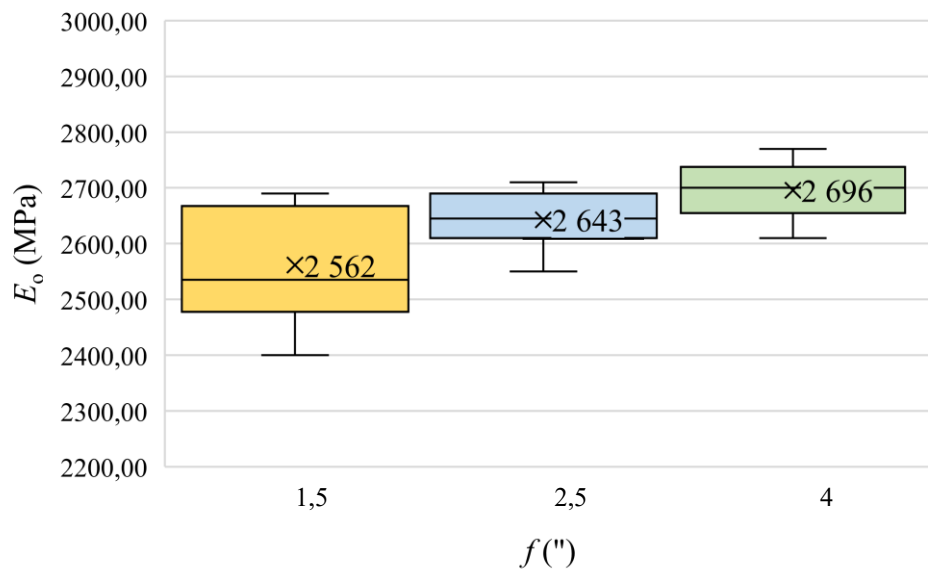
Tab. 15 Výsledky ohybové zkoušky pro čočky s rozdílnou ohniskovou vzdáleností

$f = 1,5 (")$								
	E_o (MPa)	F_{max} (N)	σ_{mo} (MPa)	ΔF_{max} (%)	$W F_{max}$ (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	2561,50	90,63	55,81	1,79	128,26	4,01	9,71	38,90
s	103,68	14,89	9,07	0,35	53,05	0,02	0,05	0,25
u_A	23,18	3,33	2,03	0,08	11,86	0,00	0,01	0,05
$f = 2,5 (")$								
	E_o (MPa)	F_{max} (N)	σ_{mo} (MPa)	ΔF_{max} (%)	$W F_{max}$ (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	2642,50	110,33	68,85	2,25	195,48	3,97	9,78	38,79
s	46,21	9,74	6,30	0,24	40,28	0,01	0,04	0,17
u_A	10,33	2,18	1,41	0,05	9,01	0,00	0,01	0,04
$f = 4 (")$								
	E_o (MPa)	F_{max} (N)	σ_{mo} (MPa)	ΔF_{max} (%)	$W F_{max}$ (n.mm ⁻¹)	h (mm)	b_1 (mm)	S_0 (mm ²)
\bar{x}	2695,50	185,75	111,58	4,78	811,02	3,97	10,12	40,22
s	50,94	15,96	9,40	0,88	256,11	0,02	0,05	0,26
u_A	11,39	3,57	2,10	0,20	57,27	0,00	0,01	0,06



Obr. 53 Výsledky pevnosti v ohybu pro rozdílné ohniskové vzdálenosti

Z výsledků jasně vyplývá, že se zvětšující se ohniskovou vzdáleností roste mez pevnosti v ohybu σ_{mo} i modul pružnosti v ohybu E_o .



Obr. 54 Výsledky modulu pružnosti v ohybu pro rozdílné ohniskové vzdálenosti

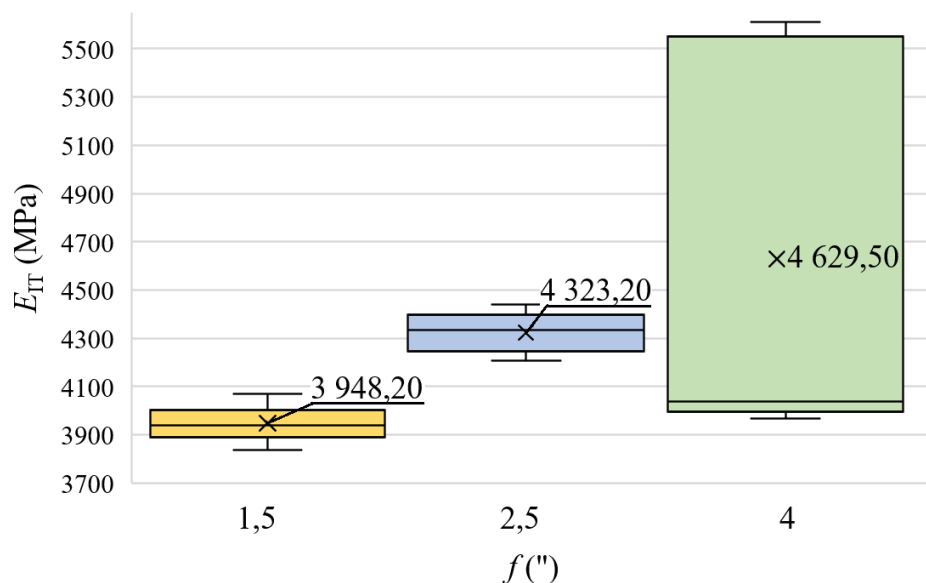
14.5 Výsledky vtiskového modulu pružnosti

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky měření vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro typy vzorků, které jsou popsány v kapitole 9.1 (str. 43). Pro každý typ proběhlo 10 měření.

Tab. 16 Výsledky měření vtiskového modulu pružnosti

E_{IT} (Mpa)	$P/v_f = 100/3 \%$			$P/v_f = 100/5 \%$	$P/v_f = 100/7 \%$
	$f = 1,5''$	$f = 2,5''$	$f = 4''$	$f = 1,5''$	$f = 1,5''$
1	3997,00	4406,00	4054,00	3738,00	3887,00
2	3947,00	4441,00	5612,00	3741,00	3991,00
3	4001,00	4292,00	4023,00	3728,00	3949,00
4	3892,00	4378,00	3987,00	3721,00	4057,00
5	4005,00	4251,00	5598,00	3848,00	3977,00
6	3924,00	4377,00	3967,00	3957,00	3996,00
7	3931,00	4241,00	5535,00	3994,00	4035,00
8	3835,00	4247,00	5513,00	3848,00	3990,00
9	3881,00	4206,00	4009,00	4100,00	3883,00
10	4069,00	4393,00	3997,00	3818,00	3877,00
\bar{x}	3948,20	4323,20	4629,50	3849,30	3964,20
s	70,21	84,32	805,51	129,81	63,75
u_A	22,20	26,66	254,72	41,05	20,16

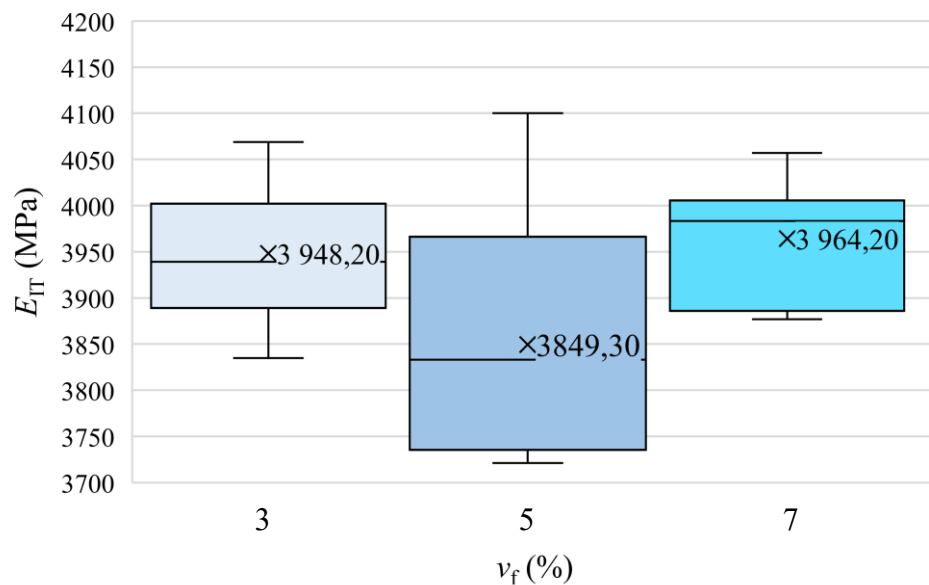
V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky vtiskového modulu pružnosti E_{IT} naměřené na vzorcích, které byly řezány výkonem 100 %, řeznou rychlostí 3 %, ale ččkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností. Z výsledků lze vypočítovat růst vtiskového modulu pružnosti E_{IT} společně s rostoucí ohniskovou vzdáleností.



Obr. 55 Závislost vtiskového modulu pružnosti na ohniskové vzdálenosti

V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky vtiskového modulu pružnosti E_{IT} naměřené na vzorcích, které byly řezány stejnou čoučkou o ohniskové vzdálenosti 1,5“, výkonem 100 %, ale různou řeznou rychlostí.

Řezná rychlost 3 a 7 (%) měla velmi podobné hodnoty, pouze u řezné rychlosti 5 % došlo k mírnému poklesu průměrné hodnoty E_{IT} .



Obr. 56 Závislost vtiskového modulu pružnosti na řezné rychlosti

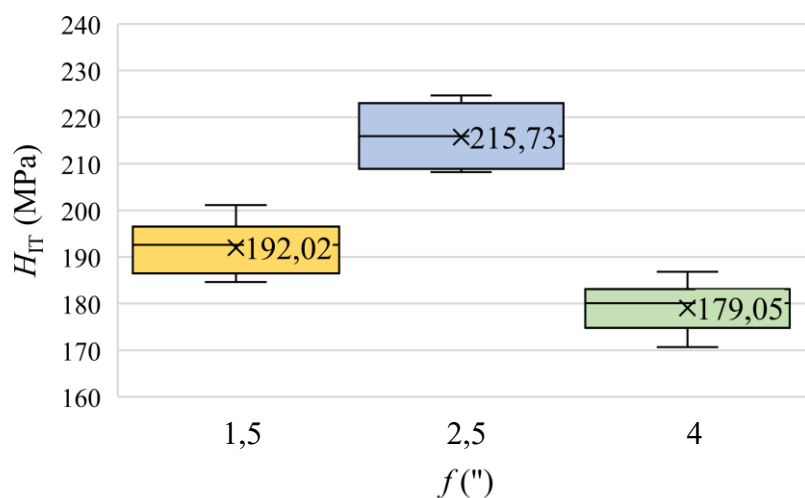
14.6 Výsledky vtiskové tvrdosti

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky měření vtiskové tvrdosti H_{IT} pro typy vzorků, které jsou popsány v kapitole 9.1 (str. 43). Pro každý typ proběhlo 10 měření.

Tab. 17 Výsledky měření vtiskové tvrdosti

H_{IT} (Mpa)	$P/v_f = 100/3 \%$			$P/v_f = 100/5 \%$	$P/v_f = 100/7 \%$
	$f = 1,5''$	$f = 2,5''$	$f = 4''$	$f = 1,5''$	$f = 1,5''$
1	201,17	224,68	186,84	184,14	184,02
2	192,13	224,51	176,64	184,95	191,40
3	200,31	214,06	183,98	188,77	193,84
4	186,94	222,52	180,95	183,01	197,20
5	195,26	208,25	175,79	184,80	196,38
6	185,16	217,83	179,19	195,39	193,80
7	193,57	209,41	171,95	198,85	193,56
8	184,63	209,04	170,65	192,47	192,20
9	187,86	208,51	182,79	193,43	189,35
10	193,13	218,50	181,77	189,53	185,73
\bar{x}	192,02	215,73	179,05	189,54	191,75
s	5,88	6,76	5,24	5,38	4,28
u_A	1,86	2,14	1,66	1,70	1,35

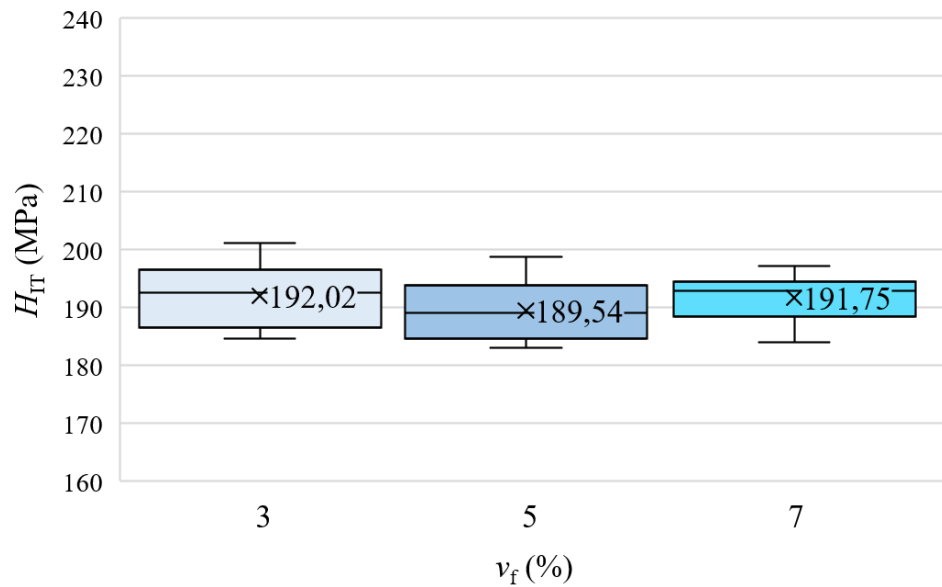
V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky vtiskové tvrdosti H_{IT} naměřené na vzorcích, které byly řezány výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 %, ale čočkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností. Z výsledků lze vypočítat nejvyšší tvrdost u vzorků, které byly řezány čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5''. Nižší hodnoty vtiskové tvrdosti vykazuje řez provedený čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a nejnižší pak čočkou s ohniskovou vzdáleností 4''.



Obr. 57 Závislost vtiskové tvrdosti na ohniskové vzdálenosti

V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky vtiskového modulu pružnosti H_{IT} naměřené na vzorcích, které byly řezány čoučkou o ohniskové vzdálenosti 1,5“, konstantním výkonem 100 %, ale různou řeznou rychlostí.

U rozdílných řezných rychlostí nebyl zaznamenán žádný podstatný rozdíl.



Obr. 58 Závislost vtiskové tvrdosti na řezné rychlosti

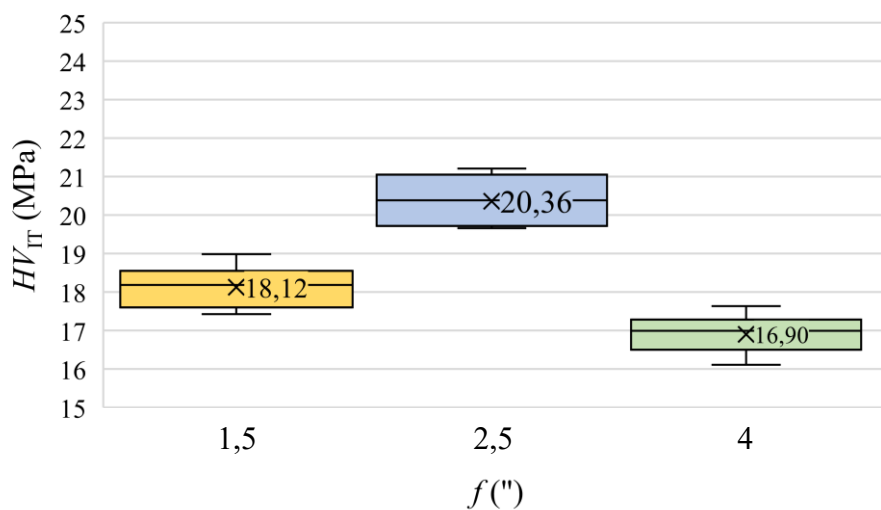
14.7 Výsledky tvrdosti dle Vickerse

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky měření vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro typy vzorků, které jsou popsány v kapitole 9.1 (str. 43). Pro každý typ proběhlo 10 měření.

Tab. 18 Výsledky měření tvrdosti dle Vickerse

HV _{IT} (HV)	$P/v_f = 100/3 \%$			$P/v_f = 100/5 \%$	$P/v_f = 100/7 \%$
	$f = 1,5''$	$f = 2,5''$	$f = 4''$	$f = 1,5''$	$f = 1,5''$
1	18,99	21,21	17,64	17,38	17,37
2	18,13	21,19	16,67	17,46	18,07
3	18,91	20,20	17,37	17,82	18,30
4	17,65	21,00	17,08	17,27	18,61
5	18,43	19,66	16,59	17,44	18,54
6	17,48	20,56	16,91	18,44	18,29
7	18,27	19,77	16,23	18,77	18,27
8	17,43	19,73	16,11	18,17	18,14
9	17,73	19,68	17,25	18,26	17,87
10	18,23	20,62	17,16	17,89	17,53
\bar{x}	18,12	20,36	16,90	17,89	18,10
s	0,56	0,64	0,50	0,51	0,40
u_A	0,18	0,20	0,16	0,16	0,13

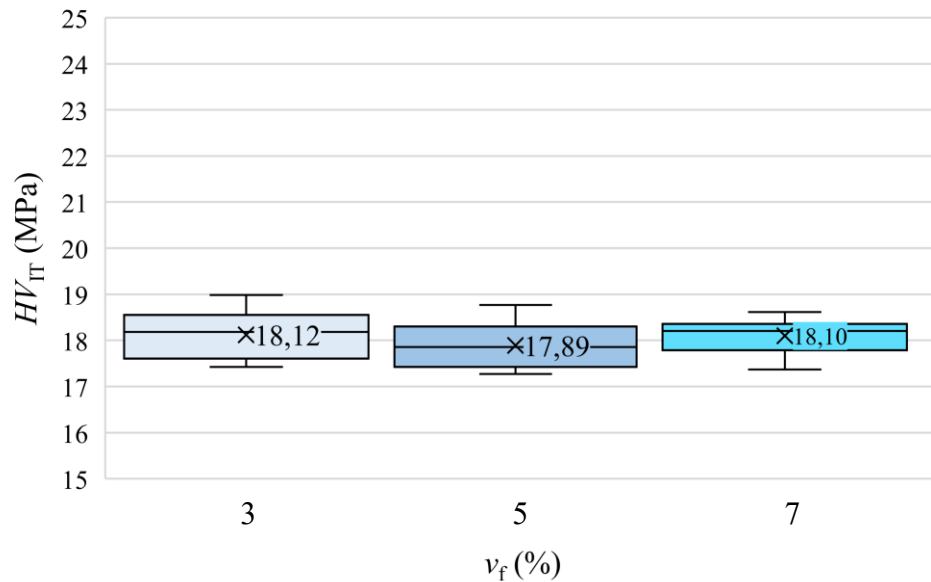
V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} naměřené na vzorcích, které byly řezány výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3%, ale čočkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností. Největší tvrdost byla naměřena u vzorků, které byly řezány čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5'', následně čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a nejnižší tvrdost u čočky s ohniskovou vzdáleností 4''.



Obr. 59 Závislost tvrdosti dle Vickerse na ohniskové vzdálenosti

V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} naměřené na vzorcích, které byly řezány stejnou čočkou o ohniskové vzdálenosti 1,5“, konstantním výkonem 100 %, ale různou řeznou rychlostí.

U rozdílných řezných rychlostí nebyl zaznamenán téměř žádný rozdíl.



Obr. 60 Závislost tvrdosti dle Vickerse na řezné rychlosti

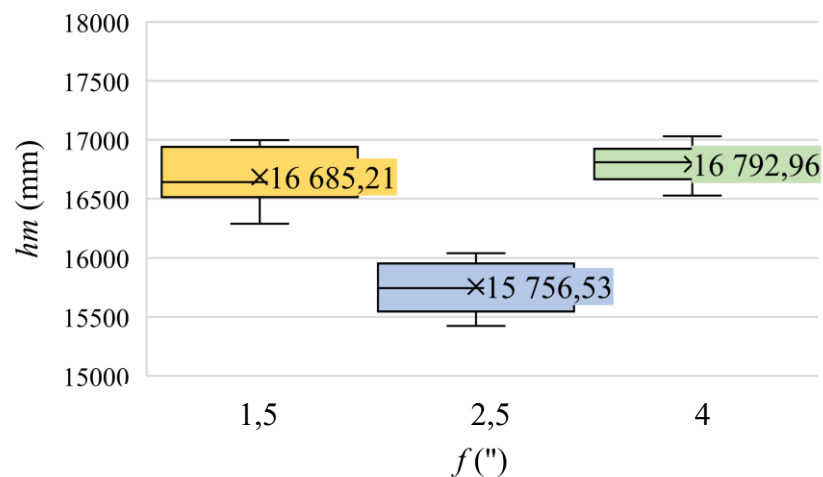
14.8 Výsledky hloubky vtisku

K výsledkům měření mikrotvrdości, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách, byla naměřena také hloubka vtisku hm (nm), do které zařízení během měření proniklo při dosažení síly 1 N. Trend měření vykazuje přesně opačný charakter než měření vtiskové tvrdosti H_{IT} a tvrdosti dle Vickerse HV_{IT} .

Tab. 19 Výsledky měření hloubky vtisku

hm (nm)	$P/v_f = 100/3 \%$			$P/v_f = 100/5 \%$	$P/v_f = 100/7 \%$
	$f = 1,5''$	$f = 2,5''$	$f = 4''$	$f = 1,5''$	$f = 1,5''$
1	16289,35	15515,59	16698,93	16957,99	16982,52
2	16600,99	15422,37	16529,23	17040,21	16710,22
3	16394,42	15797,90	16819,73	16845,72	16508,55
4	16933,24	15554,97	16955,18	17019,30	16367,66
5	16574,71	15999,00	16566,98	16882,54	16426,67
6	16960,99	15686,30	17030,10	16483,12	16621,65
7	16681,11	15926,59	16740,73	16343,23	16480,61
8	16998,15	15935,87	16802,07	16618,36	16566,87
9	16864,28	16039,83	16871,41	16563,83	16689,73
10	16554,82	15686,83	16915,25	16730,81	16834,20
\bar{x}	16685,21	15756,53	16792,96	16748,51	16618,87
s	246,12	216,53	162,16	239,39	190,33
u_A	77,83	68,47	51,28	75,70	60,19

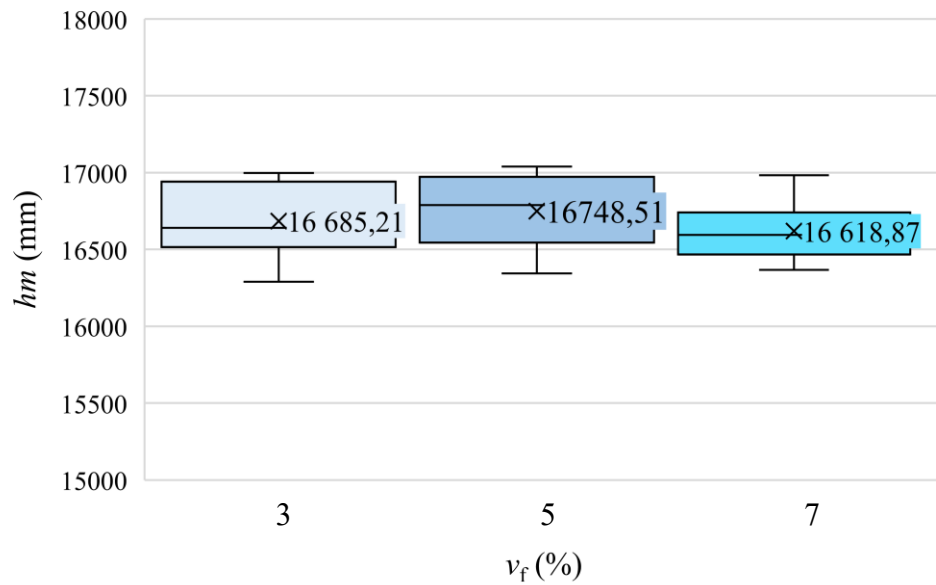
V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky hloubky vtisku naměřené na vzorcích, které byly řezány výkonem 100 % a řeznou rychlostí 3 %, ale čočkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností. Největší hloubka byla naměřena u vzorků, které byly řezány čočkou s ohniskovou vzdáleností 4'', následně čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a nejmenší hloubka u čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5''.



Obr. 61 Závislost hloubky vtisku na ohniskové vzdálenosti

V níže uvedeném grafu jsou zobrazeny výsledky hloubky měření zaznamenaná na vzorcích, které byly řezány stejnou čoučkou o ohniskové vzdálenosti 1,5“, výkonem 100 %, ale různou řeznou rychlostí.

U rozdílných řezných rychlostí nebyl zaznamenán žádný výrazný rozdíl.



Obr. 62 Závislost hloubky vtisku na řezné rychlosti

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá vlivem laserového paprsku na mechanické vlastnosti PMMA. V práci je popsán postup výroby vzorků na CO₂ laserovém zařízení ILS 3NM. Pro řezání zkušebních vzorků byly použity čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5“, 2,5“ a 4“ v kombinaci se stálým výkonem zařízení 100 W a stálou řeznou rychlostí 45,72 (mm.s⁻¹). Dále byly připraveny vzorky, které byly řezány čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“ a řezným výkonem 100 W, ale měnila se řezná rychlost. Její hodnoty byly 45,72, 76,20 a 106,68 (mm.s⁻¹). Všechny vzorky byly vyrobeny z extrudované desky materiálu PMMA o tloušťce 4 mm.

Pro zkoušku tahem byla čočkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností připravena tělíska dle normy ČSN EN ISO 527. Dále byla vyrobena tělíska řezaná čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“ a rozdílnou řeznou rychlostí, u kterých byl profil zúžený na rozměr 8, 6, 4 a 2 (mm). Tyto vzorky byly vyrobeny především pro možnost porovnání se vzorky, jejichž stáří je 9 let a byly vyrobeny za stejných podmínek.

U vzorků, které byly řezány čočkami s různými ohniskovými vzdálenostmi byly zaznamenány výsledky zlepšujících se mechanických vlastností spolu s větší ohniskovou vzdáleností u pevnosti v tahu. U modulu pružnosti v tahu nebyl zaznamenán pravidelný trend.

U nových vzorků se zúženým profilem i vzorků, jejichž stáří je 9 let a byly připraveny rozdílnou řeznou rychlostí, nebyl zaznamenán pravidelný trend v závislosti na šířce profilu. Velký rozptyl naměřených hodnot může být zapříčiněn extrudovaným materiálem. Laserový paprsek také ztrácí svou energii při vzdalování se od svého nulového bodu. Je tedy pravděpodobné, že jednotlivé vzorky absorbovaly jiné množství záření a při malých rozdílech řezných rychlostí se absorbované množství jednoznačně neprojevovalo na mechanických vlastnostech opracovaného materiálu.

Pro detailnějším zkoumáním vlivu řezné rychlosti na mechanické vlastnosti by bylo vhodné zvýšit soubor zkoušených vzorků a zajistit k výrobě vzorků desku PMMA vyrobenou litím. Lité desky nemají vzhledem k použité výrobní technologii rozdíl pnutí mezi jejich povrchem a jádrem. Vhodné by bylo také použít desku s menší tloušťkou, aby bylo možné použít vyšší řezné rychlosti.

Pro zkoušku ohybem byla čočkami s rozdílnou ohniskovou vzdáleností připravena tělíska dle normy ČSN EN ISO 178. U vzorků byly zaznamenány výsledky lepších mechanických vlastností spolu s větší ohniskovou vzdáleností pro modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu.

Při řezání PMMA různými čočkami je zřejmé, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností byly řezané hrany výrazně natavenější. K tomu dochází kvůli rozdílné šířce paprsku. Ten je širší u čoček s větší ohniskovou vzdáleností. U širšího paprsku dojde k rozložení jeho tepelné energie do většího objemu obráběného materiálu. Řezání PMMA laserem by mělo ideálně probíhat za co nejvyšší využitelnosti sublimace. Sublimační teplota PMMA je 300°C. Pravděpodobně dochází k tomu, že se zvyšujícím se průměrem paprsku je méně energie využito na sublimaci materiálu a větší část tepelné energie je pohlcena materiálem, který se rozteče a opět zatuhne. Tepelně ovlivněná zóna HAZ (heat affected zone) a zóna vystavená IR záření je tedy větší u větších ohniskových vzdáleností. Výsledky studie *Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics* [36] dokazují, že v případě PMMA velikost těchto zón ovlivňuje mechanické vlastnosti.

Kombinovaná zkouška mikrotvrdomosti byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14577. Z výsledků měření vtiskové tvrdosti a vtiskové tvrdosti dle Vickerse vyplynulo, že povrch řezu má nejvyšší tvrdost při řezání čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5“, následně čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5“ a nejnižší tvrdost byla naměřena u čočky s ohniskovou vzdáleností 4“. Tyto výsledky potvrzuje také hloubka měření, jejíž výsledky se pohybovaly v hodnotách okolo 16 000 nm a měla přesně opačný trend. Potvrdila tak menší míru průniku měřicího hrotu do povrchu řezu při stejném silovém zatížení 1 N v případě tvrdšího povrchu.

Volbou vhodných pracovních podmínek je možné dosáhnout vyhovujících mechanických vlastností užitého produktu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [2] MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. Košice: Vienala, vydavateľstvo a tlačiareň Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [3] ŘASA, Jaroslav a Zuzana ŘASA. MM spektrum: Nekonenční metody obrábění - 4. díl. Www.mmspektrum.cz [online]. 2008 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [4] Ion J.C., Laser processing of engineering materials, First Edition: Principles, Procedure and Industrial Application. Elsevier, 2005. ISBN-0-7506-6079-1.
- [5] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. Výrobní inženýrství a technologie. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [6] Leonardo technology. E-learning. Možné dělení typů a druhů laserů [online]. © 2020 [cit. 2020-12-7] Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [7] Koplast. Popis zpracovávaných materiálů. Plexisklo-popis plexiskla [online]. © 2016 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>
- [8] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. MM spektrum: Nekonenční metody obrábění. Www.mmspektrum.cz [online]. 2007 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni.html>
- [9] Flow water jet: Jak funguje vodní paprsek. Www.flowwaterjet.cz [online]. 2021 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#basics>
- [10] Obrábění iontovým paprskem. Technický týdeník [online]. 2014 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-iontovym-paprskem_27769.html
- [11] JANČÁŘ, J. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.

[12] Katayama, Seiji. Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing Limited, 2013.

Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHLWT0001/handbook-laser-welding/handbook-laser-welding>

[13] LAPŠANSKÁ, Hana. Lasrové technologie v praxi. Univerzita Palackého v Olomouci [online], 13.12.2010 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z:

<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>

[14] Bellows G, Kohls JB (1982) Drilling without drills. American Machinist, Special report 743, pp 173–188

[15] ŘASA, Jaroslav a Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3. 2. díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 221 s. ISBN 80-7183-336-3.

[16] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-244-8.

[17] Chryssolouris, G., Brecht, J., Kordas, S., and Wilson, E. (February 1, 1988).

"Theoretical Aspects of a Laser Machine Tool." ASME. J. Eng. Ind. February 1988; 110(1): 65–70. <https://doi.org/10.1115/1.3187844>

[18] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.

[19] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 5. díl. MM spektrum [online]. 2008 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z:

<https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>

[20] KRUTINA, Ing. Jiří. Laserové technologie v průmyslu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2010, roč. 2010, č. 3 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>

[21] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přepracované vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.

[22] Waterjets. Ayers Tech [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <http://ayers-tech.com/waterjets>

- [23] VYSLOUŽIL, Zdeněk a Jaroslav ZELKO. Meranie v strojárstve: pre poslucháčov stredných a vysokých škôl strojárského smeru. 2., preprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1973. Edícia strojárskej literatúry (Alfa).
- [24] Laser Systems for Optical Microscopy [online]. [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscoperesource/primer/techniques/microscopylasers/>
- [25] GELETA, Vojtech. Progresívne technológie obrábania. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2013, 163 stran. ISBN 978-80-227-3997-9.
- [26] Třída 6406 - Zkoušení plastů a výrobků z plastů. Shop.normy.biz [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/trida/6406>
- [27] KUTA, Antonín. Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999, 203 s. ISBN 80-7080-367-3.
- [28] SCHÄTZ, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1979. 264 s.
- [29] ČSN EN ISO 178 (640607) Plasty - Stanovení ohybových vlastností. Shop.normy.biz [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/508675>
- [30] ŠIMEK, I.: *Fyzika polymérov*. 2. vyd. Bratislava: SVŠT, 1981. 167 s.
- [31] Hardness test methods. Substech.com [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=hardness_test_methods
- [32] Tensile testing: Destructive testing. Manufacturingguide [online]. Svenska [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/tensile-testing>
- [33] PrestoWonders. *Prestowonders.com* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://prestowonders.com/corporate/ils-3nm-intelligent-laser-system.php>
- [34] Zwick Roell. *www.zwickroell.com* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/pre-owned-market/pre-owned-1456-20-kn/>
- [35] Bend testing: Destructive testing. Manufacturingguide [online]. Svenska [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/bend-testing>

[36] Ahmed B. Khoshaim, Ammar H. Elsheikh, Essam B. Moustafa, Muhammad Basha, Ezzat A. Showaib. Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics, Journal of Materials Research and Technology, Volume 11, 2021 [online]. [cit. 2021-04-20] Pages 235-246, ISSN 2238-7854,.

Dostupné z : <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.012>

[37] STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF POLYMERS. Polymer Properties

Database [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z:

<https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Stress-Strain%20Behavior.html>

[38] Mallikarjunachari G, Pijush Ghosh, Pile-up response of polymer thin films to static and dynamic loading, Thin Solid Films, Volume 677, 2019, Pages 1-12, ISSN 0040-6090,

Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.01.040>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
a	šířka řezu (mm)
A_p	úhlopříčka kontaktní plochy (mm)
b	šířka (mm)
d	průměr (mm)
h	tloušťka (mm)
l	délka (mm)
L	délka (mm)
L	vzdálenost mezi podporami (mm)
L_0	počáteční délka (mm)
r	poloměr (mm)
S_0	plocha (mm ²)
ΔL	změna délky (mm)
k_A	koeficient násobení směrodatné odchylky
$Me(x)$	medián
n	počet
s	směrodatná odchylka
u_A	nejistota typu A
\bar{x}	průměr
x	soubor dat
x_i	konkrétní hodnota
α	úhel alfa (°)
β	úhel beta (°)

Zkratka	Význam
Ar	argon
CO ₂	oxid uhličitý
GaAs	arsenid gallitý
Ge	germanium
He	helium
Kr	krypton
N	dusík
N ₂	stlačený dusík
NaCl	chlorid sodný
Nd:YAG	yttrium aluminum garnet
Ne	neon
O ₂	kyslík
Xe	xenon
ZnSe	selenid zinečnatý
PE	polyethylen
PMMA	polymethylmethakrylát
PP	polypropylen
PUR	polyuretan
PVC	polyvinylchlorid

Zkratka	Význam
E_2	horní energetická hranice
E_i	modul pružnosti vnikajícího hrotu (MPa)
E_{IT}	vtiskový modul pružnosti (MPa)
E_o	modul pružnosti v ohybu (MPa)
E_r	redukovaný modul vtiskového kontaktu
E_t	modul pružnosti v tahu (MPa)
F	síla (N)
F_{max}	maximální dosažená síla (N)
h_c	kontaktní hloubka (mm)
h_c	kontaktní hloubka (mm)
h_c	kontaktní hloubka (mm)
H_{IT}	vtisková tvrdost (MPa)
h_m	hloubka měření (nm)
HV_{IT}	tvrdost dle Vickerse (VK)
ν_i	Poissonův poměr pro materiál hrotu
ν_s	Poissonův poměr pro materiál zkušebního tělíška
W_{break}	práce spotřebovaná pro přetržení (N.mm ⁻¹)
WF_{max}	spotřebovaná energie pro dosažení maximální síly (N.mm ⁻¹)
ΔF	změna působící síly (N)
ΔF_{max}	poměrné prodloužení na maximální síle (%)
$\Delta \varepsilon$	poměrné prodloužení (%)
$\Delta \sigma$	změna napětí (MPa)
σ_{mo}	mez pevnosti v ohybu (MPa)
σ_{mt}	mez pevnosti v tahu (MPa)

Zkratka	Význam
C	kapacita (F)
DPI	počet bodů na palec
f	ohnisková vzdálenost (")
f	frekvence (Hz)
G	vodivost (S)
IR	infračervené záření
n	energetická účinnost (%)
p	tlak (Pa)
P	výkon (W)
PPI	počet pulsů na palec
R	odpor (Ω)
Ra	drsnost (μm)
RTG	rentgenové záření
T	perioda (s)
T	teplota ($^{\circ}\text{C}$)
U	napětí (V)
UV	ultra fialové záření
v_f	řezná rychlost ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
λ	vlnová délka (nm)
ρ	hustota ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma obrábění ultrazvukem. [14]</i>	11
<i>Obr. 2 Schéma zařízení pro generování vodního paprsku. [22]</i>	12
<i>Obr. 3 Rozdělení laserů dle aktivního média. [4]</i>	17
<i>Obr. 4 Schéma znázorňující parametry laserů. [4]</i>	18
<i>Obr. 5 využití laseru. [2]</i>	20
<i>Obr. 6 Řezání laserem. [17]</i>	21
<i>Obr. 7 Rychlost a tloušťka řezu. [19]</i>	23
<i>Obr. 8 Typický tvar laserem vrtaného otvoru. [14]</i>	23
<i>Obr. 9 Tvar svaru podle typu svařovacího zařízení. [12]</i>	24
<i>Obr. 10 Schéma soustružení laserem. [17]</i>	25
<i>Obr. 11 Schéma dokončování. [2]</i>	26
<i>Obr. 12 Schéma obrábění s podporou laseru. [2]</i>	27
<i>Obr. 13 Schéma CO₂ laseru. [2]</i>	28
<i>Obr. 14 Dělení polymerů. [1]</i>	30
<i>Obr. 15 Charpyho kladivo. [23]</i>	33
<i>Obr. 16 Zkouška tvrdosti podle Brinella. [31]</i>	34
<i>Obr. 17 Schéma ohybové zkoušky. [35]</i>	36
<i>Obr. 18 Schéma tahové zkoušky. [32]</i>	37
<i>Obr. 19 Orientační průběh tahové zkoušky dle typu polymeru. [37]</i>	37
<i>Obr. 20 Laserové zařízení ILS 3NM</i>	41
<i>Obr. 21 Zkušební tělísko pro zkoušku tahem</i>	42
<i>Obr. 22 Zkušební tělísko pro zkoušku ohybem</i>	43
<i>Obr. 23 Nastavení řezných parametrů v softwaru CorelDraw</i>	44
<i>Obr. 24 Řezání vzorků pro zkoušku tahem</i>	45
<i>Obr. 25 Řezání vzorků pro zkoušku ohybem</i>	45
<i>Obr. 26 Zařízení Zwick 1456</i>	48
<i>Obr. 27 Graf průběhu zkoušky tahem</i>	49
<i>Obr. 28 Konfigurace parametrů programu TestExpertII</i>	52
<i>Obr. 29 Zadávání rozměrů zkoušeného vzorku</i>	53
<i>Obr. 30 Průběh zkoušky ohybem</i>	53
<i>Obr. 31 Graf průběhu zkoušky ohybem</i>	54
<i>Obr. 32 Zařízení CSM Micro Combi Tester</i>	56
<i>Obr. 33 Pile-up a sink-in efekt. [38]</i>	58
<i>Obr. 34 Fotografie vtisků v materiálu PMMA. [38]</i>	58

<i>Obr. 35 Modul pružnosti v tahu v závislosti na ohniskové vzdálenosti</i>	61
<i>Obr. 36 Pevnost v tahu v závislosti na ohniskové vzdálenosti</i>	61
<i>Obr. 37 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 7$ (%).....</i>	63
<i>Obr. 38 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 7$ (%).....</i>	63
<i>Obr. 39 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%).....</i>	65
<i>Obr. 40 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%)</i>	65
<i>Obr. 41 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%).....</i>	67
<i>Obr. 42 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%)</i>	67
<i>Obr. 43 Závislost modulu pružnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti</i>	68
<i>Obr. 44 Závislost pevnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti</i>	68
<i>Obr. 45 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%).....</i>	70
<i>Obr. 46 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 3$ (%)</i>	70
<i>Obr. 47 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%).....</i>	72
<i>Obr. 48 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 5$ (%)</i>	72
<i>Obr. 49 Modul pružnosti v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 100/7$ (%)</i>	74
<i>Obr. 50 Pevnost v tahu v závislosti na šířce krčku pro $v_f = 100/7$ (%)</i>	74
<i>Obr. 51 Závislost modulu pružnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti</i>	75
<i>Obr. 52 Závislost pevnosti v tahu na šířce profilu a řezné rychlosti</i>	75
<i>Obr. 53 Výsledky pevnosti v ohybu pro rozdílné ohniskové vzdálenosti</i>	77
<i>Obr. 54 Výsledky modulu pružnosti v ohybu pro rozdílné ohniskové vzdálenosti.....</i>	77
<i>Obr. 55 Závislost vtiskového modulu pružnosti na ohniskové vzdálenosti</i>	78
<i>Obr. 56 Závislost vtiskového modulu pružnosti na řezné rychlosti</i>	79
<i>Obr. 57 Závislost vtiskové tvrdosti na ohniskové vzdálenosti</i>	80
<i>Obr. 58 Závislost vtiskové tvrdosti na řezné rychlosti.....</i>	81
<i>Obr. 59 Závislost tvrdosti dle Vickerse na ohniskové vzdálenosti.....</i>	82
<i>Obr. 60 Závislost tvrdosti dle Vickerse na řezné rychlosti</i>	83
<i>Obr. 61 Závislost hloubky vtisku na ohniskové vzdálenosti.....</i>	84
<i>Obr. 62 Závislost hloubky vtisku na řezné rychlosti</i>	85

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i> Přepočet jednotek řezné rychlosti.....	40
<i>Tab. 2</i> Parametry laseru ILS 3NM.....	41
<i>Tab. 3</i> Rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku tahem	42
<i>Tab. 4</i> Rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku ohybem	43
<i>Tab. 5</i> Koefficient násobení nejistoty u_A	46
<i>Tab. 6</i> Parametry zařízení Zwick Materialprüfung 1456	48
<i>Tab. 7</i> Technická specifikace zařízení	56
<i>Tab. 8</i> Výsledky tahové zkoušky pro $P/v_f = 100/3$ (%) a rozdílnou f	60
<i>Tab. 9</i> Výsledky tahové zkoušky vzorků pro $P/v_f = 100/7$ (%) a různé b_1 (mm).....	62
<i>Tab. 10</i> Výsledky tahové zkoušky vzorků pro $P/v_f = 100/5$ (%) a různé b_1 (mm).....	64
<i>Tab. 11</i> Výsledky tahové zkoušky pro $P/v_f = 100/3$ (%) a různý rozměr b_1	66
<i>Tab. 12</i> Výsledky tahové zkoušky starých vzorků pro $P/v_f = 100/3$ (%) a různé b_1 (mm)	69
<i>Tab. 13</i> Výsledky tahové zkoušky starých vzorků pro $P/v_f = 100/5$ (%) a různý rozměr b_1 .71	
<i>Tab. 14</i> Výsledky tahové zkoušky starých vzorků pro $P/v_f = 100/7$ (%) a různý rozměr b_1 .73	
<i>Tab. 15</i> Výsledky ohybové zkoušky pro čočky s rozdílnou ohniskovou vzdáleností	76
<i>Tab. 16</i> Výsledky měření vtiskového modulu pružnosti	78
<i>Tab. 17</i> Výsledky měření vtiskové tvrdosti.....	80
<i>Tab. 18</i> Výsledky měření tvrdosti dle Vickerse	82
<i>Tab. 19</i> Výsledky měření hloubky vtisku	84

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Naměřená data zkoušky tahem

Příloha P II: Naměřená data zkoušky ohybem

Příloha P III: Naměřená data zkoušky mikrotvrdomosti