

Výzkum vlivu laserového paprsku na vlastnosti výrobků

Bc. Vojtěch Táborský

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch TÁBORSKÝ**

Osobní číslo: **T09578**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Výzkum vlivu laserového paprsku na vlastnosti výrobků**

Zásady pro vypracování:

1. Hodnoťte činnost technologických laserů.
2. Uveďte vliv laserového paprsku na materiály.
3. Stanovte vliv působení laserového paprsku na změnu mechanických charakteristik materiálů.
4. Popište a statisticky hodnoťte vliv technologických podmínek na proces laserového obrábění polymerů.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1.Maňková,I.:Progresívne technologie.Vienala Košice.2000.

2.Lukovics,I.-Vačkář,J.:Obrobiteľnosť materiálov laserem.In.:Zborník konferencie laserov spracovanie materiálov.Košice.1988.s 181-196.

3.Hogel,H.:Strahlwerkzeug Laser.B:G.Teubner Stuttgart.1992.

4.Sadovski,A.-Krehlik,R.:Lasery v obrábění a metrologii.SNTL Praha,1977.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

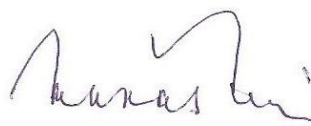
Datum zadání diplomové práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2011**

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 5.5.2011


.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

V této práci se zabývám laserovou technologií a jejím použitím pro zpracování plastů. V první části se zabývám vznikem laserového paprsku a jeho fyzikální podstatou. Poté popisují lasery dle jejich aktivního média. Ve druhé části se zabývám popisem vlivu laserové paprsku na různé materiály, převážně na plasty konkrétně na PMMA.

Klíčová slova: laserový paprsek, tepelně ovlivněná zóna, vlastnosti obrobenej plochy

ABSTRACT

This thesis deals with the laser technology and its usage for plastic processing. The first part of the thesis deals with the creation of a laser beam, its physical origin and description of lasers according to their active medium. The second part deals with the influence of a laser beam on different materials mainly plastics such as PMMA.

Keywords: laser beam, zone influenced by warm, the characteristics of tooled surface

Na tomto místě bych chtěl poděkovat za odborné vedení a pomoc při zpracování této diplomové práce panu Prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi CSc a panu Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při obrábění v laboratořích ÚVI. Dále bych chtěl poděkovat za podporu své rodině a všem přátelům.

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

OBSAH

ÚVOD	10
1 HODNOŤTE ČINNOST TECHNOLOGICKÝCH LASERŮ	11
1.1 HISTORIE A PRINCIP LASERU	11
1.2 VLASTNOSTI LASERU	14
1.2.1 Fyzikální princip laseru	16
1.2.2 Optika laseru	17
1.3 DRUHY LASERU	19
1.3.1 Přehled laserů	21
1.4 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	22
1.4.1 Rubínový laser.....	22
1.4.2 Neodymový laser.....	23
1.5 KAPALINOVÉ LASERY	23
1.6 PLYNOVÉ LASERY.....	23
1.6.1 Helium-neonový laser	24
1.6.2 CO ₂ laser	24
1.6.3 Dusíkový laser.....	25
1.6.4 Excimerové lasery	25
1.7 POLOVODIČOVÉ LASERY	26
1.8 VLÁKNOVÉ LASERY	26
2 VLIV LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁLY	27
2.1 NEKOVOVÉ MATERIÁLY.....	31
2.2 KOVY	33
2.3 POMOCNÉ (ASISTENČNÍ) PLYNY	35
3 PRAKTICKÁ ČÁST	38
3.1 POUŽITÉ MĚŘIDLA A PŘÍSTROJE	38
3.1.1 Laser	38
3.1.2 Dynamometr s tenzometrickými členy.....	39
3.1.3 Bruska.....	39
3.1.4 Frézka.....	40
3.2 BROUŠENÍ PMMA.....	40
3.2.1 Broušení kostek z PMMA	41
3.2.2 Broušení zkušebních tyčinek.....	43
3.3 FRÉZOVÁNÍ PMMA.....	44
3.4 TAHOVÁ ZKOUŠKA	44
3.4.1 Měřicí zařízení	45
3.4.2 Postup trhací zkoušky.....	47
3.4.3 Zkušební tyčinky	47
3.5 STANOVENÍ VLIVU LASEROVÉHO PAPRSKU NA ZMĚNU MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK MATERIÁLŮ.....	49
3.5.1 Vliv výkonu na mez pevnost při řezání laserem	49

3.5.2	Vliv tloušťky na mez pevnosti	53
3.5.3	Porovnání technologií	55
3.5.4	Součinitel velikosti.....	57
3.6	VLIV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK NA PROCES LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ.....	64
3.6.1	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu.....	64
ZÁVĚR		68
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		72
SEZNAM OBRÁZKŮ		74
SEZNAM TABULEK.....		76
SEZNAM PŘÍLOH.....		77

ÚVOD

V dnešní době jsou tradiční konstrukční materiály, především oceli a litiny, nahrazovány materiály na bázi plastů. Plastové materiály vyžadují jiné způsoby zpracování a obrábění. Jedním z důležitých způsobů obrábění pro plastové materiály je obrábění laserovým paprskem. Objev laseru je jedním z nejdůležitějších objevů minulého století, neboť se s ním setkáváme v množství rozličných oborů lidské činnosti. Technologie laserového opracování materiálu umožňuje rychlé, ekonomické a ekologické zpracování v podstatě jakéhokoliv materiálu. Pro moji diplomovou práci budu využívat laserový paprsek jako „řezný nástroj“. Ve své diplomové práci se budu zabývat vlivem laserového paprsku na polymerní materiály především na polymethylmetakrylát (PMMA). Budu mít trhací tyčinky z desek PMMA vyřezané pomocí laserového paprsku. Pro srovnání s těmito laserem ovlivněnými trhacími tyčinkami jsem frézoval a brousil trhací tyčinky vyrobené vstřikováním. Poté jsem zjišťoval ovlivnění PMMA pomocí trhací zkoušky a meze pevnosti.

1 HODNOŤTE ČINNOST TECHNOLOGICKÝCH LASERŮ.

1.1 Historie a princip laseru

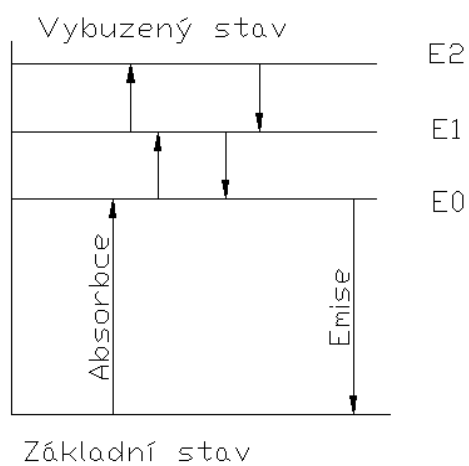
První, kdo formuloval teorii laseru, jehož podstatou je stimulovaná emise záření, byl v roce 1917 Albert Einstein. Podstatnější rozvoj tohoto vědního oboru nastává v letech padesátých a v roce 1960 zkonstruoval T. H. Maiman první funkční rubínový laser. V průběhu pěti let byly objeveny téměř všechny druhy laseru, které známe. V roce 1961 pánové Javan, Bennet a Heriot vyzkoušeli v laboratorních podmínkách plynový laser na bázi hélia a neodýmu (He-Ne). Pan Snitzer v roce 1961 použil poprvé pevnolátkový laser na bázi neodýmu (Nd)-sklo. Laser na bázi polovodičů byl objeven roku 1962. V roce 1964 byl poprvé představen argonový iontový laser a pevnolátkový (Nd-YAG) laser. Kapalínový laser je poprvé zmiňován roku 1966. Vrtání otvorů do diamantových kalibrů (které jsou součástí nástroje pro tažení drátu) bylo první praktické využití rubínového laseru v roce 1966.

Slovo laser je zkratkou anglických slov **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což můžeme přeložit jako zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Běžné světlo je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí stimulujícího elektromagnetického záření. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká tak, že vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí ν , kterou určíme z rovnice:

$$E_2 - E_1 = \nu \cdot h \quad (1)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s] je Planckova konstanta.

Vybuzený atom se vnějším zásahem vrací do původní energetické polohy. Při tomto přechodu do jiné energetické hladiny se přebytek energie vyzáří ve formě fotonu světla. Taková emise se nazývá vybuzená (stimulovaná). Barva světla závisí na rozdílu energetických hladin. Přechod atomu z nižší energetické hladiny se nazývá absorpcí, přechod na nižší energetickou hladinu se nazývá emisí.



Obr. 1 Skokové změny hodnot energie [6]

Laserové světlo je monochromatické a rovnoběžné, proto je možné soustředit optikou laserový paprsek do úzkého bodového svazku.

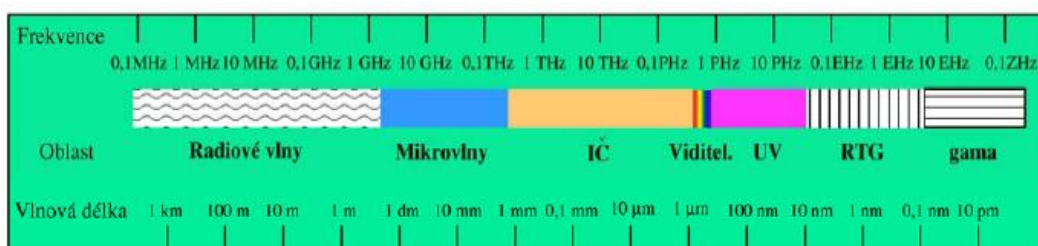
laser (pracovní látka)	vlnová délka (v mikrometrech)	střední výkon	režim	poznámka
rubín	0,6943	1 W	impulsní	červený
neodymové sklo	1,058	1 W	impulsní	infračervený
YAG:Nd	1,064	150 W	spojitý	infračervený
arsenid galitý	0,840	0,01 W	spojitý	vysoká účinnost, chlazení
AlGaAs	0,7-0,9	1 W	spojitý	vysoká účinnost, chlazení
sulfid kademnatý	0,5-0,7		impulsní	EIL
KCl:Li	2,5-2,9		spojitý	brevná centra, přeladitelný
organická barviva	0,55-0,67	100 W	spojitý	přeladitelné
rhodamin	0,590			
helium-neon	0,6328; 1,15; 3,39	0,05 W	spojitý	měřicí účely
helium-kadmium	0,325; 0,442	0,1 W	spojitý	"bílý"
argon	0,33; 0,48; 0,51	150 W	spojitý	modrozelený
krypton	0,46; 0,64		spojitý	
oxid uhličitý	10,6	100 W	spojitý	infračervený
-"- s průtokem plynu	10,6	10 kW	spojitý	
-"- elektroionizační	10,6	10 kW	spojitý	EIL
-"- gazodynamický	10,6	100 kW	spojitý	
-"- s příčným buzením	10,6		impulsní	TEA
oxid uhelnatý	5,0-6,6		spojitý	vysoká účinnost
kyanovodík	128,6; až 773	1 W	spojitý	submilimetrový
páry mědi	0,51; 0,58	40 W	impulsní	
dusík	0,337			ultrafialový
vodík	0,116; 0,160			ultrafialový
fluorovodík	2,6-3,5	10 kW	spojitý	chemický
fluorodeuterium	3,6-5,0	10 kW	spojitý	chemický

Obr. 2 Přehled technologických laserů [6]

1.2 Vlastnosti laseru

Laser se v podstatě skládá z kvantového elektronického zesilovače a generátoru světelných vln. Využívá stimulovanou emisi záření na generaci světelného paprsku, který má tyto světelné vlastnosti [1]:

- Monochromatický paprsek obsahuje prakticky jen jednu vlnovou délku. Vlnové délky laserového záření spadají od mikrovlnné oblasti přes infračervené tepelné záření a viditelné světlo až po rentgenové paprsky.



Obr. 3 Elektromagnetické spektrum [8]

- Má vysoký stupeň koherence jak prostorové, tak časové. Všechny částice v prostorově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku.
- Má minimální rozbíhavost (divergenci), která je charakterizována polovinou vrcholového úhlu, který vystupuje z laseru o průměru r_0 . Rozbíhavost je dále daná vlnovou délkou λ_w .

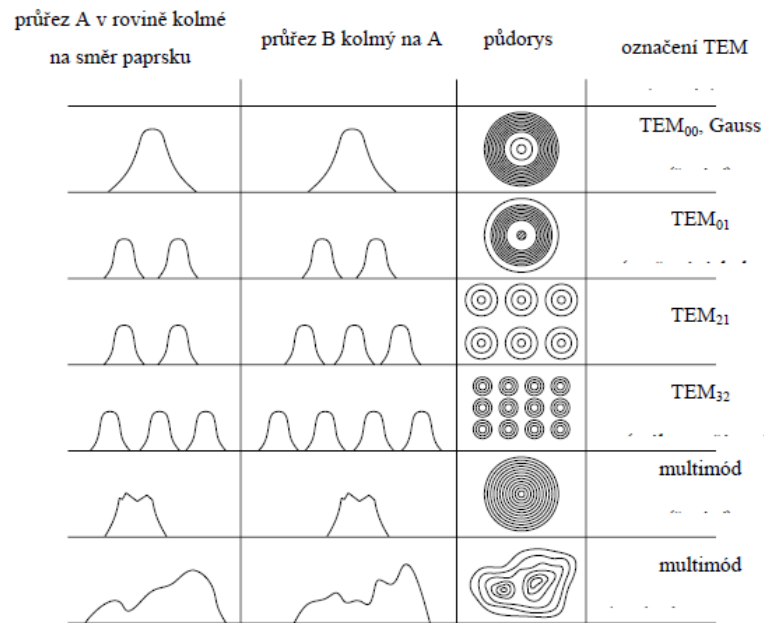
$$\Theta = \frac{\lambda_w}{\pi \cdot r_0} \quad (2)$$

- Vysokou hustotu vystupujícího výkonu I [W/cm^2], u které neplatí zákony o záření absolutně černého tělesa. I_0 je hustota výkonu ve středu paprsku, r_0 je poloměr paprsku redukováný o hodnotu e^2 . Hustota I je dána vztahem:

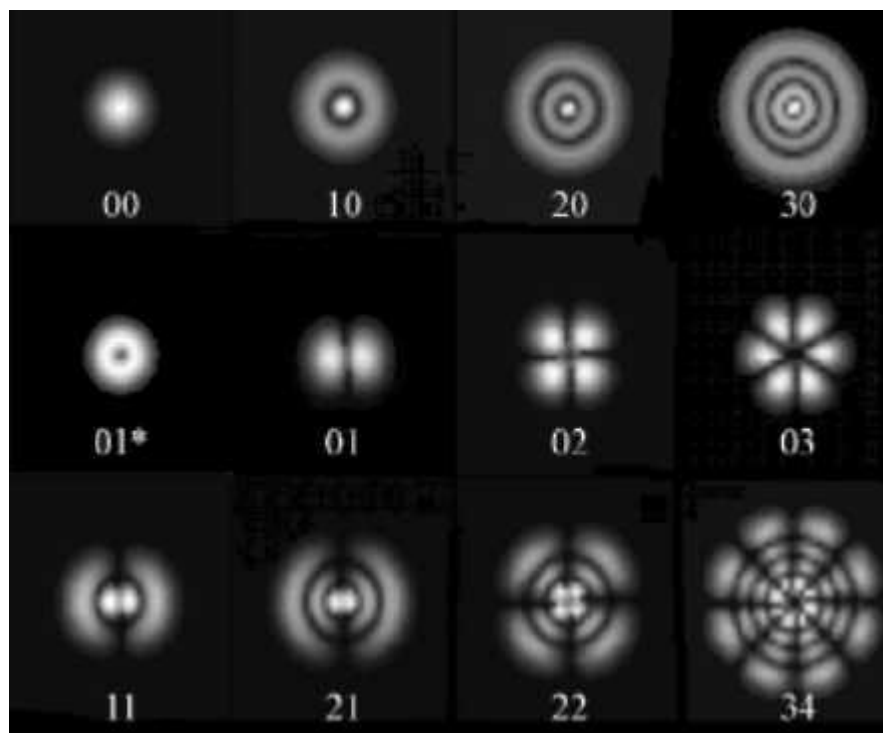
$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

- Má módovou strukturu: V příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu, základní mód nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód, v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Největší hustoty energie při dané výstupní energii laseru je možné dosáh-

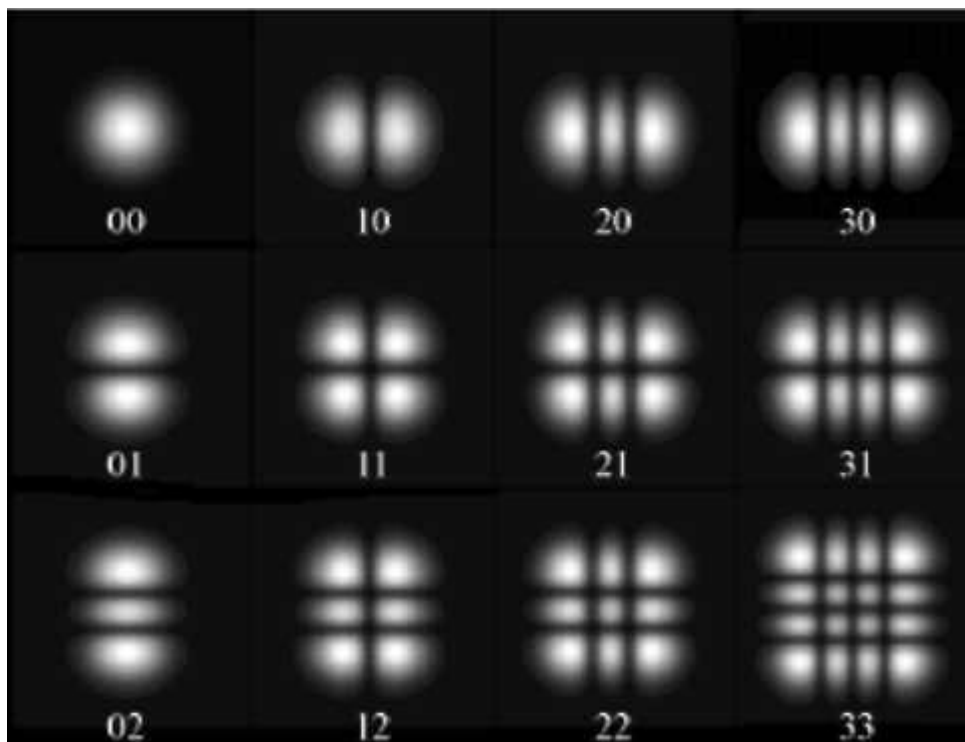
nout lasery pracujícími v základním módu označovaném TEM₀₀ (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití, například pro řezání, svařování apod.



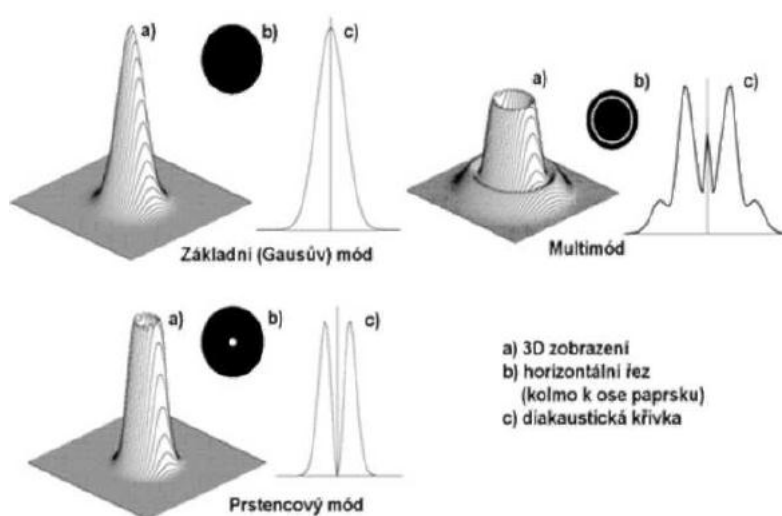
Obr. 4 Módové struktury laseru [6]



Obr. 5 Ukázky módů TEM [4]



Obr. 6 Ukázky módů TEM [4]



Obr. 7 Módové struktury ve 3D [4]

1.2.1 Fyzikální princip laseru

Všechny lasery mají téměř shodné základní konstrukční provedení. V aktivním prostředí laseru se kumuluje energie vybuzená z budícího zdroje. Aktivní prostředí můžeme v podstatě rozdělit na tři základní (pevnolátkové, kapalinové, plynové plazmové a polovodičové). Jako budícího zdroje se používají elektrický výboj, elektronický paprsek, viditelné světlo, chemické reakce a

další způsoby. Po načerpání aktivní prostředí samovolně emituje přebytečnou energii ve formě fotonů. Tyto fotony mají odlišné frekvence, směr pohybu, fázi a polarizaci. Tyto odlišnosti odstraní optický rezonátor, který propustí jen frekvenci shodnou s jeho vlastní rezonanční frekvencí. Fotony se pohybují obvykle rovnoběžně s osou optického rezonátoru a dopadají kolmo na zrcadla. Od nepropustného zrcadla se odrazí zpět přes aktivní látku na polopropustné zrcadlo. Přes polopropustné zrcadlo prochází fotony jako koherentní laserový paprsek. Ostatní fotony s jinými parametry se vyzáří přes aktivní látku, ale nejsou zesílněné.



Obr. 8 Konstrukce laseru [5]

1.2.2 Optika laseru

Optická soustava je velmi důležitá pro konečné podmínky a výkon působící na dopadovou plochu. Z uvedených vlastností vyplývá, že můžeme při vhodné fokusaci (optikou) soustředit mimořádně vysokou energii na malou plochu. Tento jev nám v místě dopadu nataví, až odpaří danou vrstvu materiálu, a tím dosahujeme vlastního obrábění materiálu. Při nepoužití optického zařízení dosahuje průměr laserového paprsku několik milimetrů. Při použití optického zařízení dosahujeme při řezání CO₂ laserem o výkonu 1kW průměr řezu 0,3 mm. Při tomto nastavení dosahujeme hustoty energie 1,4 MW/cm².

Tab. 1 Hustoty výkonu energetických zdrojů

Zdroj energie	Hustota výkonu [W/cm ²]
Slunce (čočka f= 50 mm)	$5 \cdot 10^2$
Elektrický oblouk	$1 \cdot 10^5$
Acetylenový-kyslíkový plamen	$1 \cdot 10^4$
Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^5$

Elektronový paprsek	$4 \cdot 10^8$
CO ₂ laser cw	$1 \cdot 10^9$
Nd laser pw	$1 \cdot 10^{14}$

V místě, kde je intenzita záření ($1/e^2$), která je dvojnásobkem osové intenzity, se měří a vypočítává průměr paprsku. Toto měření provádíme za předpokladu, že máme nastaven mód TEM 00 s Gaussovým rozložením.

Výpočty optiky laserového paprsku:

- Poloměr paprsku v ohnisku v nejužším bodě (beam waist):

$$r_f = \frac{r_o \cdot f}{\left[(d_1 - f)^2 + f_H^2 \right]^{1/2}} \quad (4)$$

- Vzdálenost beam waist od čočky:

$$d_m = f + \frac{(d_1 - f)^2}{\left[(d_1 - f)^2 + f_H^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

$$f_H = \frac{n \cdot f \cdot \lambda_w}{r_o} \quad (6)$$

- Poloměr zkorigovaného paprsku:

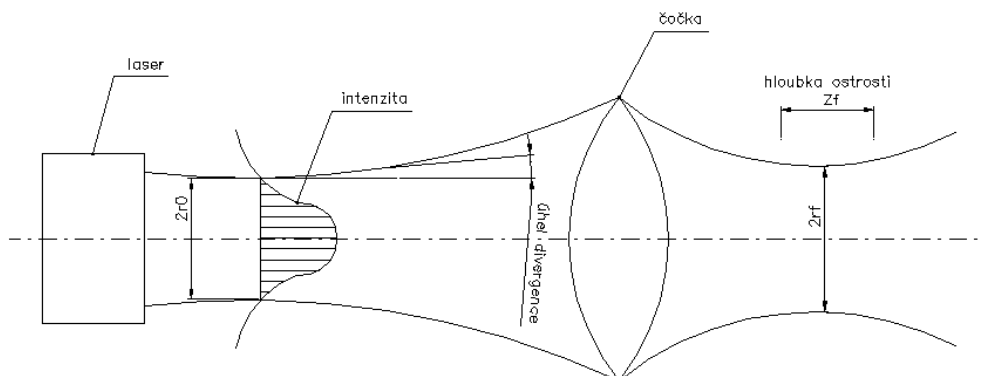
$$r_f = \frac{f \cdot \lambda_m}{\pi \cdot r_o} \quad (7)$$

- Pro multimód je poloměr paprsku:

$$r_f = f \cdot \Theta \quad (8)$$

Jestliže chceme v místě dopadu laserového paprsku dosáhnout co největší intenzity, musíme paprsek co nejlépe zaostřit. Dále bychom měli obráběný materiál udržovat v konstantní vzdálenosti od zaostřovací čočky optického zařízení, abychom se s paprskem nedostali pod hloubku ostrosti Z_f . Pod touto hodnotou intenzita energie výrazně klesá.

$$Z_f = 0,64 \cdot \frac{\lambda_m}{\pi} \cdot \frac{f^2}{r_o^2} \quad (9)$$

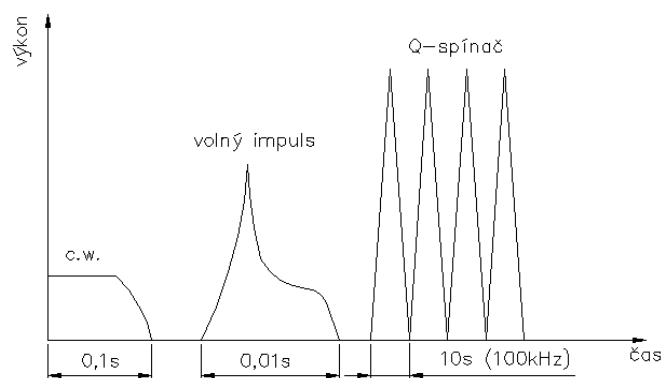


Obr. 9 Optická rozbíhavost laserového paprsku [8]

1.3 Druhy laseru

Základní konstrukce laseru je v podstatě pořád stejná, ale na trhu je v dnešní době velmi rozmanitá nabídka laserů lišící se výkonem, druhem použití a vlastnostmi. Lasery se dělí podle:

- a) **aktivního prostředí:** pevné, kapalinové, plynové a polovodičové
- b) **vlnové délky:** lišící se dle použití aktivního média, infračervené, světelné záření, ultrafialové záření a rentgenové záření
- c) **režimu paprsku:** lasery pracují ve třech základních časově závislých režimech, kontinuálně (continuous wave cw), pulzně (pulsed wave pw) a Q-switched (Qs) režimu. Qs režim je zvláštní kontinuální režim schopný generovat impulsy s vysokou hustotou výkonu.



Obr. 10 Druhy provozního režimu [5]

- d) **výkonu:** nízkovýkonné (desetiny W ÷ stovky W) pro vrtání a řezání, vysokovýkonné (1 kW ÷ 30 kW) pro sváření a tepelné zpracování
- e) **konstrukce laserového zařízení:** systém pohyblivého stolu a pevného laseru, pohyblivý laser a pevný stůl (odpadá upínání obrobků)

f) **použití:** Laserový paprsek se využívá v mnoha odvětvích lidské činnosti např. v lékařství, metrologii, elektronice, reklamě apod. Pro použití v průmyslu už není laserový paprsek okrajovou technologií, což dokazuje německá norma DIN 8580, která klasifikuje použití laseru do těchto tříd:

Tab. 2 DIN 8580

primární tvarování	tváření	řezání	spojování	Povlakování	tepelné zpracování
stereolitografie	tváření laserovým ohřevem	sublimační tavné s aktivním plynem	sváření	povrchové legování	kalení
Spékání		vrtání	pájení	plazma CVD	žihání
		gravírování			zpevňování
		LAM			
		popisování			

1.3.1 Přehled laserů

Tab. 3 Přehled laserů [1]

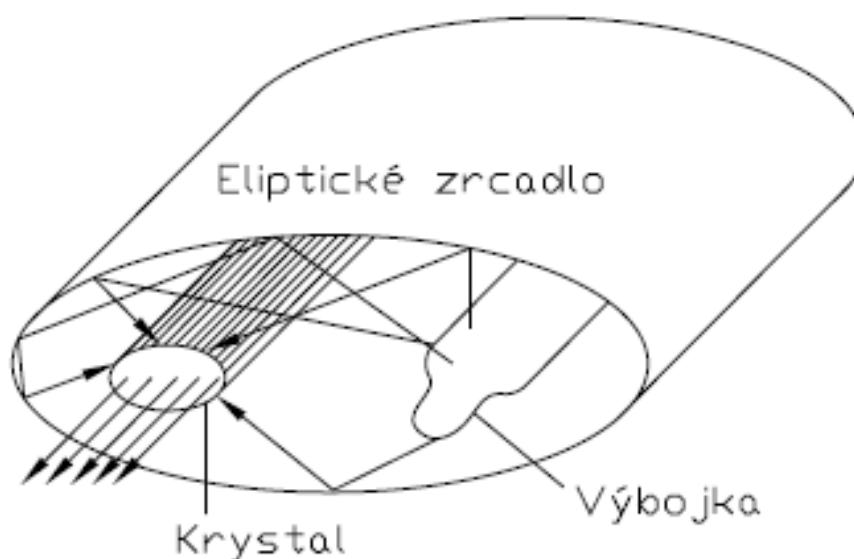
Druh laseru	Aktivní látka		Vln.délka [μm]	Typ paprsku	Výkon	Aplikace
kapalinový	barvivo Rhodamine 6	etanol, me- thanol	0,34÷1,175	pulzní	100W	fotoche- mie, spek- troskopie
pevný	Rubín	Cr^{3+}	0,6943	pulzní	5W	holografie
	Nd-YAG	Nd^{3+}	1,064	kontinuální, pulzní	100÷12 00W	strojíren- ství
	alexandrit		0,7÷0,818	pulzní	10W	
	Nd-sklo	Nd^{3+}	1,064	pulzní	2mW	
plynový	CO_2 (N_2+He)	CO_2	10,6	kontinuální, pulzní	500W÷ 15kW	strojíren- ství
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20mW	metrolo- gie, geo- gezie, ho- lografie
	Ar	Ar^+	0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální, pulzní	1÷5kW	chirurgie
	Excimetr (ArCl) (XeCl) (XeF) (KrF)		0,17 0,308 0,351 0,248	pulzní	20÷200 W	chirurgie, strojíren- ství
polovodi- čový	GaAs		0,8÷0,9	pulzní	2÷10m W	PC, opto- elektroni- ka

1.4 Pevnolátkové lasery

Aktivní prostředí této skupiny laserů tvoří pevné krystalické, případně amorfní látky dopované příměsí vhodných iontů (např. Cr^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , apod.), nebo iontů vzácných zemin (např. Nd^{3+} , Sm^{2+} , Eu^{3+} , apod.). Pevná fáze v těchto případech tvoří vlastně jen nosný skelet aktivního prostředí. K vlastnímu optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. U pevnolátkových laserů se téměř výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje vyvolává změna v obsazení energetických hladin.

1.4.1 Rubínový laser

Tento typ laseru byl zkonstruován jako první, jak už bylo uvedeno v úvodní kapitole. Jako aktivní prostředí se používá krystal Al_2O_3 (safír), ve kterém jsou rozptýleny trojmocné ionty Cr^{3+} . Chrom se nachází v koncentraci zhruba 0,05%. Původní barvou Al_2O_3 je bílá, ale po aktivování ionty chromu se zbarví do růžova. Při pokojové teplotě pracuje jako impulzový, ale při teplotě $-196,15^\circ\text{C}$ (77K) pracuje v trvalém provozu. Délky budících impulzů se pohybují od desetin milisekund až po jednu milisekundu. Pro dosažení co největší výstupní intenzity je potřebná co nejkratší doba výstupního impulzu. Střední výkon rubínového laseru je v řádu miliwattů, ale je možno dosáhnout okamžitého výkonu přes 100 W. Činnost laseru je pouze několik procent. Rubínový laser se v průmyslu využívá k vrtání tvrdých materiálů, v lékařství se používá v dermatologii a laserové lokaci družic. Chlazení je nutné použít při kontinuálním provozu, toto chlazení musí být velmi účinné.



Obr. 11 Rubínový laser [5]

1.4.2 Neodymový laser

Aktivní prostředí tohoto laseru je yttrio-alumíniový granát s ionty Nd^{3+} a je označován jako Nd:YAG. Může také pracovat ve všech režimech a parametry lze ovlivnit volbou čerpacích výbojek (wolfram – jodová, xenonová, kryptonová). Optickým buzením jsou excitovány ionty neodymu. Výstupní vlnová délka je ve spektru infračerveného záření. Jedním ze specifíků tohoto typu laseru je nízký budicí výkon. Při kontinuálním režimu je schopen dosahat až 1 kW výstupního výkonu. Na chlazení Nd:YAG laseru se používá voda. Nevýhodou je podobnost s laserem s neodymovým sklem, které se špatně za provozu chladí z důvodu špatné tepelné vodivosti skel.

1.5 Kapalinové lasery

Jako aktivní médium u kapalinových laserů se používají roztoky organických barviv nebo kapaliny s přísadkou vzácných zemin. Aktivní prostředí kapalinových laserů jsou rozpouštědla např. voda, etylalkohol, metylalkohol, benzen, toluen, aceton, cyklohexan, glycerin atd. Nejpožívanější z kapalinových laserů je laser s aktivním prostředím z Rhodaminu 6G. Tento prvek patří ke skupině xantinových barviv. Kapalinové lasery jsou buzeny opticky koherentním nebo nekoherentním světlem. Používá se pulsní nebo kontinuální buzení, příčné nebo podélné. Při použití koherentního buzení je aktivní prostředí ozařováno zářením pomocného laseru. Účinnost kapalinových laserů je v rozmezí několika desítek procent. Účinnost nekoherentně buzených laserů je maximálně 10%.

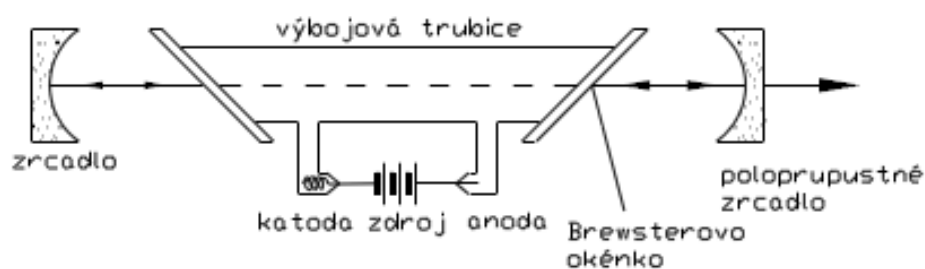
1.6 Plynové lasery

Plynové lasery se převážně používají v kontinuálním režimu. Jsou schopny generovat široký rozsah vlnových délek. V převážné většině je zdrojem budicí energie stejnosměrný vysokofrekvenční generátor, který slouží k zapálení elektrického výboje v trubici s plynem. Též se používají pulsní nebo kontinuální výbojky. Aktivní prostředí u této skupiny laserů jsou plyny uzavřené ve skelné trubici. Z tohoto důvodu bývají problémy s nastavením zrcadel. Potíže se řeší pomocí Brewsterova jevu.

1.6.1 Helium-neonový laser

Nejpoužívanější kontinuální laser. Dělíme je do tří základních skupin dle výkonů:

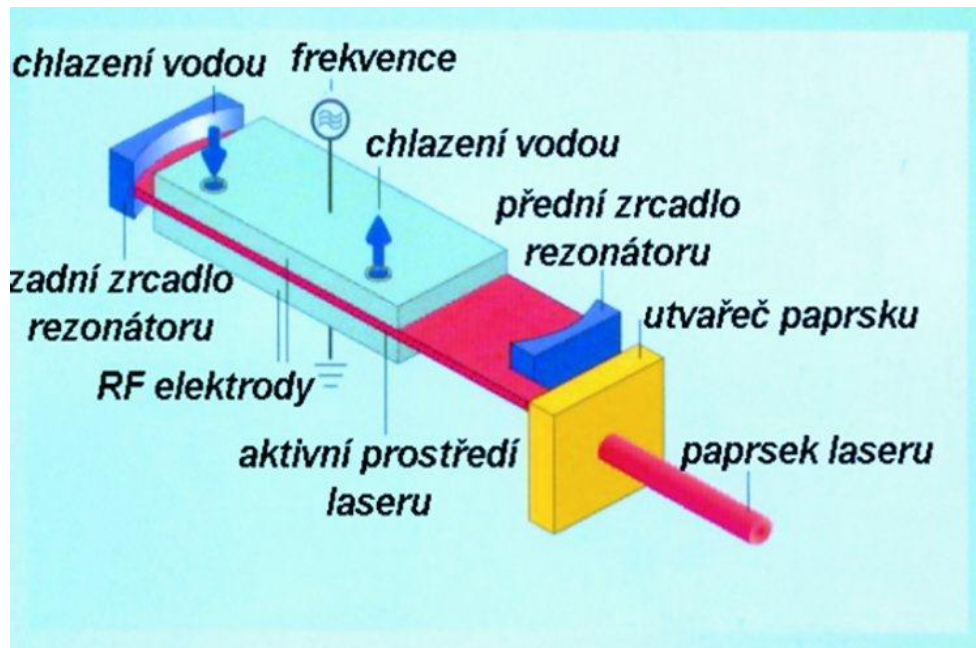
- Malý výkon ($0,1 \div 2$ mW), vlnová délka $0,633$ μm
- Střední výkon ($2,5 \div 15$ mW), vlnové délky $0,633 \div 1,15$ μm
- Vysoký výkon ($20 \div 60$ mW), vlnové délky $0,63; 1,15; 3,39$ μm



Obr. 12 Schéma He-Ne laseru [5]

1.6.2 CO₂ laser

Nejvýkonnější z plynových laserů. Tento laser generuje záření na vlnové délce o $10,6$ μm . Podle velikosti trubice dosahujeme různých výkonů, přičemž maximální hodnoty se pohybují okolo 100 kW. Aktivní prostředí se neskládá z čistého CO₂, ale skládá se z více plynů (CO₂, N₂, He). Jejich poměr je přibližně následující 1:2:8. Tlak v trubici dosahuje několika kPa. Výstupní výkon závisí na rychlosti odvodu tepla z trubice, které je realizováno pomocí hélia, které se sráží s trubicí nebo pomocí vzduchu. Chlazení pomocí vzduchu snižuje účinnost laseru. Výhodou je získání vysoce monochromatického světla.



Obr. 13 Konstrukce CO2 laseru [16]

Parametry:

- vlnová délka 10,6 nebo 9,6 μm
- střední výkon $10^{-4} \div 10^5 \text{ W}$
- účinnost 20 \div 40 %

Optimální pro obrábění plastů je CO₂ laser optimální při kontinuálním provozu a výkonem do 2,5 kW.

1.6.3 Dusíkový laser

Aktivní prostředí zde tvoří molekulární dusík, ale ke generaci postačí i vzduch, kde koncentrace dusíku je 80%. Tento typ laseru je založen na stejných principech jako pevnolátkové lasery. Není zde budící dutina a ani vnější výbojka. To má za výhodu jejich nízkou cenu, spolehlivost a jsou výkonnější. Může pracovat v kontinuálním režimu.

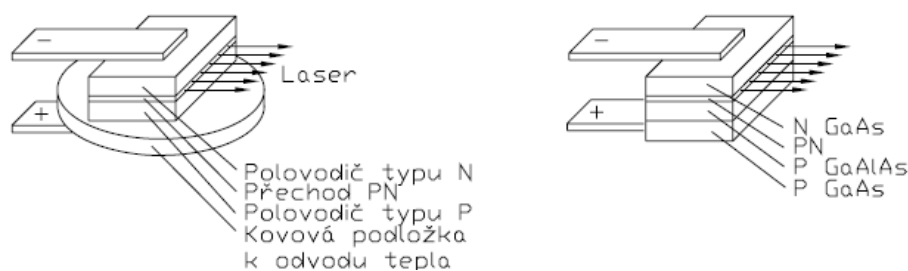
1.6.4 Excimerové lasery

Jako aktivní prostředí se u tohoto typu laseru používá epimerů, což jsou zvláštní druhy molekul vzácných plynů. Tyto molekuly jsou vysoce nestabilní a vyskytují se např. v plynovém výboji ve vysoce excitovaných stavech. Když se tyto molekuly rozpadnou, vzniká ultrafialové záření. Buzení aktivního prostředí je prováděno elektrickým výbojem. Výhodou těchto laserů je velmi

krátká vlnová délka 157 μm . Výkon těchto laserů je maximálně několik stovek wattů a účinnost je okolo 10%.

1.7 Polovodičové lasery

Stimulované záření u polovodičových laserů je založeno na kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu a na existenci zářivé rekombinace nosičů náboje. Polovodičový materiál je aktivním prostředím, aktivní částice jsou nerovnovážné elektrony a díry, což jsou volné nosiče náboje. Mezi buzené materiály patří galium arsenidový (GaAs), kadmium sulfidový CdS a kadmium selenidový CdSe. Pracují jak v pulzním, tak v kontinuálním režimu. Velkou výhodou polovodičových laserů je jejich kompaktnost, vysoká účinnost a možnost ladění spektrálního pásma. Pomocí volby aktivního prostředí je možná změna vlnových délek od 0,8 \div 0,9 μm . Velkou nevýhodou je závislost parametrů na teplotě polovodiče a vysoká rozbíhavost generovaného paprsku. Polovodičový laser dosahuje účinnosti okolo 20% při výkonu 1,5 kW (GaAs).



Obr. 14 Polovodičové lasery –injekční a s heterostrukturou [6]

1.8 Vláknové lasery

Elias Snitzer navrhl a záhy realizoval laser, ve kterém jako aktivní, zesilující prostředí použil skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem. Tento vláknový laser generoval záření na vlnové délce 1,06 mikrometru a byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno obtočené ve spirále.

Je vskutku obdivuhodné, jak jsou vláknové lasery univerzální. Některé nabízejí eleganci - široce laditelný výstup s úzkou šířkou paprsku nebo femtosekundové pulzy. Jiné zas nabízejí hrubou sílu - výstupní výkon řádu stovek Wattů z několika desítek metrů vlákna, a to bez nutnosti drahého a rozměrného vodního chlazení. Vláknový laser je vlastně koherentní optický vláknový zesilovač se zpětnou vazbou.[8]

2 VLIV LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁLY

Při dopadu laserového paprsku na obráběný materiál dochází ke vzájemnému ovlivnění. Každý obráběný materiál se při styku s laserovým paprskem chová jinak. Záleží to na vlastnostech materiálu. Základní vlastnosti pro obrábění laserovým paprskem jsou:

- odpařování materiálu
- tepelná vodivost
- tavení povrchové vrstvy
- absorpce
- odrazivost

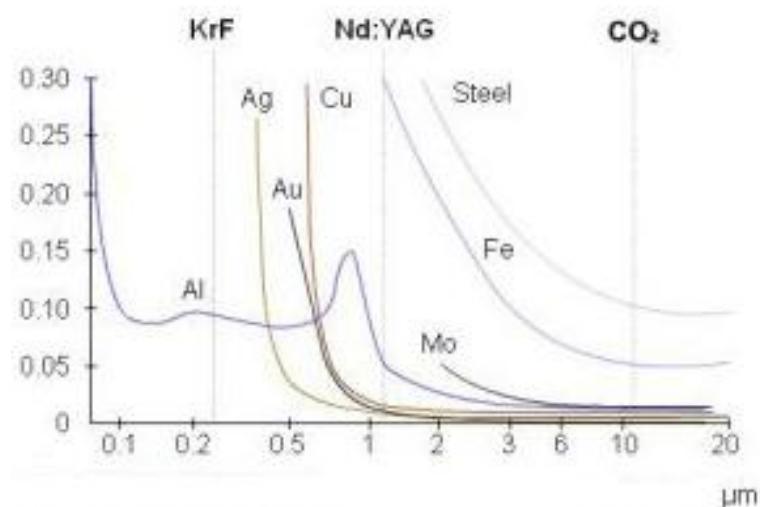
Při dopadu laserového paprsku se jeho energie rozdělí do tří základních skupin. Část energie se odrazí, druhou část absorbuje materiál a poslední část energie projde materiálem. Pro obrábění laserem je primární především část energie absorbovaná materiálem. Tato energie obráběný materiál ohřívá, což vede k natavení a posléze k jeho odpaření.

Odrazivost R [%] a absorpce A [%] dávají dohromady 100% energie vyzářené laserem. Odraz od kovových povrchů je velmi vysoký, obecně se dá říci, že čím je větší drsnost povrchu, tím je menší odrazivost.

Materiál	Al	Cu	Mo	N	Ocel	Pt	Ag	Ta	Ti	Au
Nd ³⁺ :YAG (1,06μm)	98.4	90.1	60	72	63.1	72.9	97	80	60	98
CO ₂ (10,6μm)	99	98.4	96	95.4	92.9	96.4	98.7	95	92	98

Obr. 15 Odrazivost laserového paprsku od vybraných materiálů [3]

Další metodou pro zmenšení odrazivosti kovových materiálů je ohřev na teplotu blízkou teplotě tavení. Absorpce laserových paprsků závisí na teplotním gradientu a klesá s rostoucí drsností povrchu.



Obr. 16 Absorpce paprsku laserů pro různé materiály [3]

Zbytkové napětí v povrchové vrstvě materiálu také snižuje schopnost absorpce laserového paprsku. Absorpce a následný ohřev materiálů závisí na tepelné vodivosti materiálů. Za předpokladu, že obráběný materiál je izotropní, může přestup tepla popsat Fourier-Kirchhoffovou rovnicí:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot T \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (11)$$

Tepelný proces je popsán Fourier-Kirchhoffův diferenciální rovnicí. V tepelné bilanci je nejdůležitější složkou teplo předávané do obrobku, což souvisí jednak s distribucí a intenzitou jednotlivých zdrojů tepla a s prakticky nulovou vodivostí materiálu nástroje. V řezu je teplotní pole obecně nestacionární. Teoreticky je možné definovat distribuci tepla řešením obecné diferenciální rovnice vedení tepla v pevných látkách. Ta je vzhledem k času a prostoru omezena velikostí obrobku a umožňuje různá řešení pro různé okrajové podmínky.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

Hustota tepelného toku φ směřuje od zóny řezání na povrch obrobku, jejíž práce se rovná:

$$\varphi = \frac{Q \cdot q_w \cdot 10^4}{A_D} = \frac{C}{f_a^{0,47} \cdot a_e^{0,47}} \cdot v_b \cdot q_w \cdot 10^4 \quad (13)$$

Výsledky řezání laserovým paprskem jsou ovlivněny mnoha technologickými podmínkami, jsou specifikovány do několika bodů:

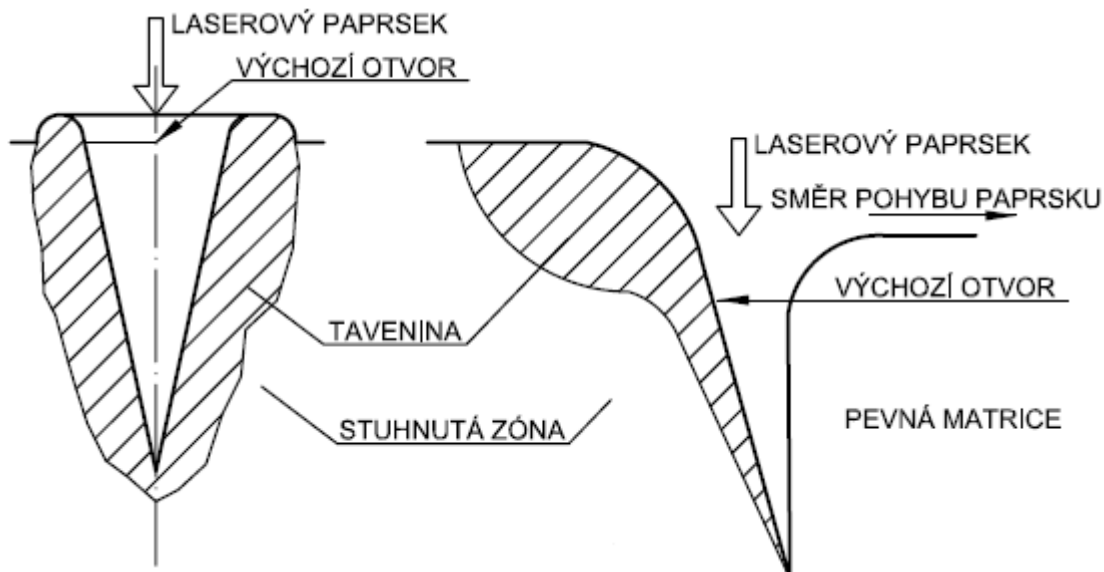
1. Laserový paprsek, který je určen: rychlostí posuvu, polohou (sklon laserového paprsku)
2. Aktivní plyn, který je určen: chemickým složením, tlakem a teplotou
3. Fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů a jejich chemické složení: (odrazivosti, tepelná vodivost, tepelná kapacita, měrné teplo, viskozita taveniny, tlak par, entalpie, atd.).
4. Struska: (chemické složení, stav, viskozita, povrchové napětí, atd).

Výsledkem těchto efektů je laserově obrobený povrch, který je specifikován takto:

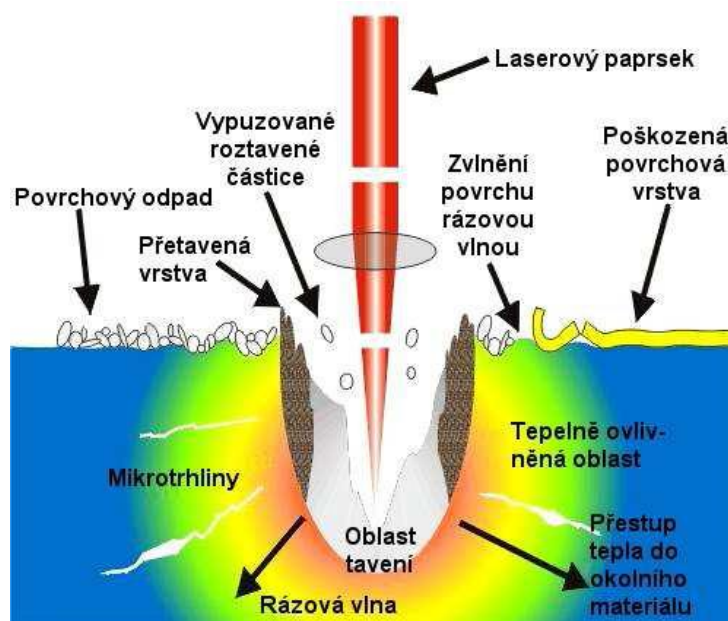
- hloubka řezu nebo opracovaná tloušťka plechu
- kvalita povrchu v podélném i příčném směru a velikost tepelně ovlivněné zóny
- šířka

Výkon, posuv, sklon paprsku a aktivní plyny jsou veličiny, které by měl technolog ovládat.

Působením laserového paprsku na materiál dochází k jeho natavení. To je způsobeno vysokou intenzitou energie soustředěné na malou plochu. Absorbované paprsky lokálně zahřívají částice obráběného materiálu, které se následně odpařují. V natavené zóně vznikají dosti vysoké tlaky a tavenina je vytlačována tlakem par do vzniklého prostoru. Vznikne tepelně ovlivněná zóna HAZ (heat affected zone), která je dle druhu obrábění dvoj nebo trojrozměrná. Obecně platí, že čím vyšší rychlost pohybu laserového paprsku, tím je menší velikost tepelně ovlivněné zóny.



Obr. 17 Chování materiálu při dopadu laserového paprsku [8]



Obr. 18 Účinek laserového paprsku při dopadu na obráběný materiál [5]

Tab. 4 Údaje o HAZ

Materiál	tloušťka [mm]	rychlost [m/min]	HAZ [mm]	výkon [kW]
papír	jako noviny	>600	0,13	0,4
sklotextil	1,5	3	0,25	0,4
sklotextil	12,7	4,6	0,63	20

nástrojová ocel	3	1,7	0,2	0,4
Titan	1	7,5	0,5	0,6

2.1 Nekovové materiály

Řezání nekovových materiálů (keramika, plasty a kompozitní materiály) zahrnuje tři základní mechanismy:

- Kombinace tavení a smyku nebo stříhu (melt sparring). Velmi výkonný způsob dělení termoplastů z důvodů vysoké rychlosti řezání a vysoké kvality řezu. Používá se též pro keramické materiály.
- Odpařování (vaporisation). Natavením v místě řezu vzniká velmi kvalitní řez. To je způsobeno teplotou řezu, která je nad teplotou tavení. Výsledná plocha vypadá jako leštěná. Tento mechanismus je typický pro PMMA, polyacetát a acryl.
- Chemickou degradací, která je důsledkem vysoké teploty v místě řezu, kdy dojde k porušení chemických vazeb a integrity materiálu. Obrobené plochy jsou pokryty vrstvičkou uhlíku vzniklou jako důsledek řezání. Tento mechanismus je typický pro dřevo, kompozitní materiály a pro některé plasty např. PVC, PU.

Tepelná vodivost je u termoplastů 100-1000 krát menší než u kovů. Tato skutečnost způsobí, že plasty si udržují vysoké rozdíly teplot mezi vnější a vnitřní stranou vrstvy. Fyzikální vlastnosti termoplastů se výrazně mění v teplotním intervalu. Hodnoty λ , ρ , c_p bývají zapsány jako funkce.

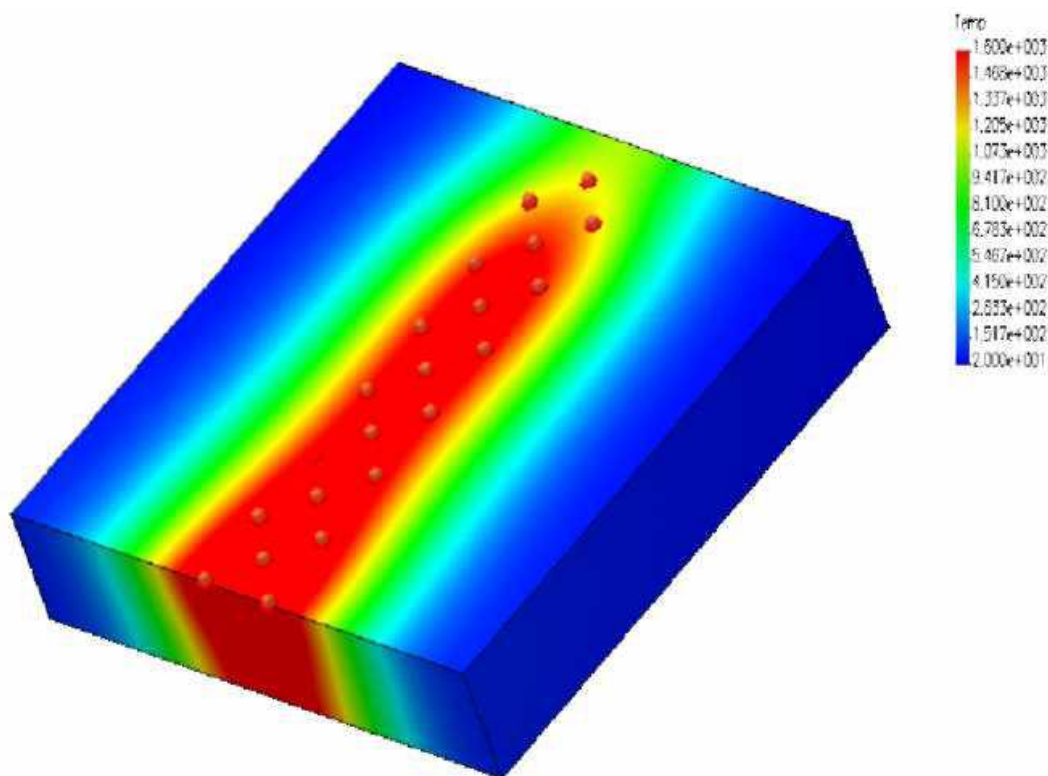
Energetická bilance při laserovém obrábění polymerních materiálů

Energetická bilance při laserovém obrábění polymerů je popsána následující rovnicí:

$$E_A + H_r = E_{S \rightarrow m} + \Delta H_m + E_{l \rightarrow v} + \Delta H_v + E_C + E_{rad} \quad (14)$$

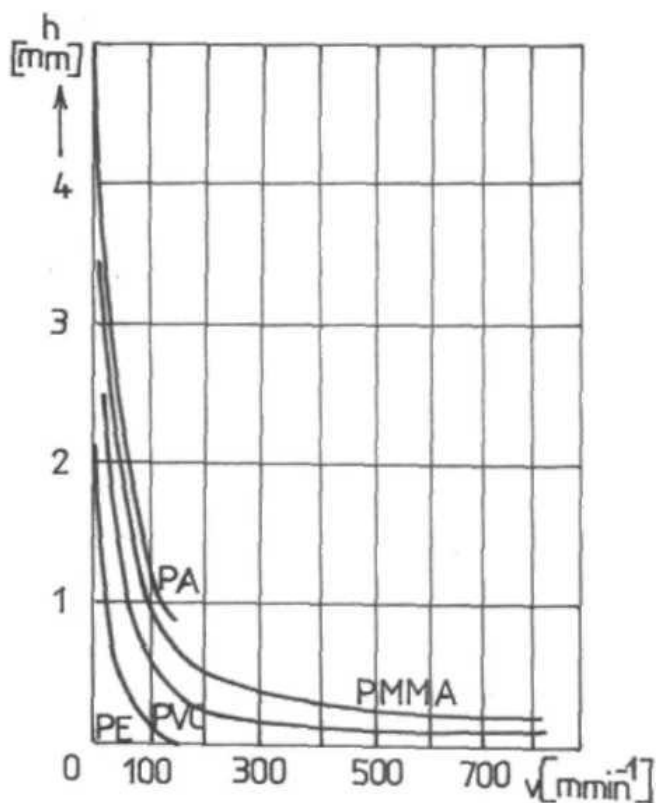
Výsledky experimentů ukazují velmi dobrou relativní zpracovatelnost materiálů a kompozitů, jejichž částice nemají tendenci oddělovat se během řezného procesu. Pokud technologické podmínky (rychlost pohybu laserové hlavy, výkon, režim parametrů optiky) jsou optimalizovány, může být dosaženo dobré kvality řezu jak kovů, tak i u plastů. V případě polymerů (plastů a pryže) jsou výsledné povrchy zcela rozlišné. Během expozice polymerních materiálů (PP, PS, PE, PC, PVC, PA) jsou vzorky vystaveny koncentrované energii, degradují povrchové vrstvy a

pevnost vzorků se mění, povětšinou se pevnost vzorků zmenšuje. Na druhou stranu PMMA a kov jsou ovlivňovány jiným způsobem. Při výstupu paprsku se teplota zvyšuje a kovový materiál se na povrchu zakalí. Výsledkem je kalení povrchové vrstvy kovu a zlepšení pevnosti vzorků.[7]



Obr. 19 HAZ pro PMMA [5]

Účinek laserového paprsku na PMMA je velmi zajímavý. Vzhledem ke struktuře vrstev stoupá tvrdost povrchu modifikací vad a záhybů, které se působením laserového paprsku odstraní a jako výsledek tohoto jevu se zvyšuje pevnost. Vzhledem k vysoké aktivitě koncentrované energie a vysoké teploty, dochází u PMMA k depolymerizaci a zvýšení počtu radikálů na koncích řetězce polymeru. Díky většímu množství radikálů a menšímu množství monomeru stoupá čistota struktury v místě řezu, a tak se zvyšuje pevnost vrstvy. Vrstva tepelně ovlivněné zóny závisí na době působení laserového paprsku. Čím delší čas je laserový paprsek v kontaktu s obráběným materiálem, tím lepší je pevnost a tvrdost. Tento jev je typický pro plasty a to může být užitečné při výrobě speciálních nástrojů.



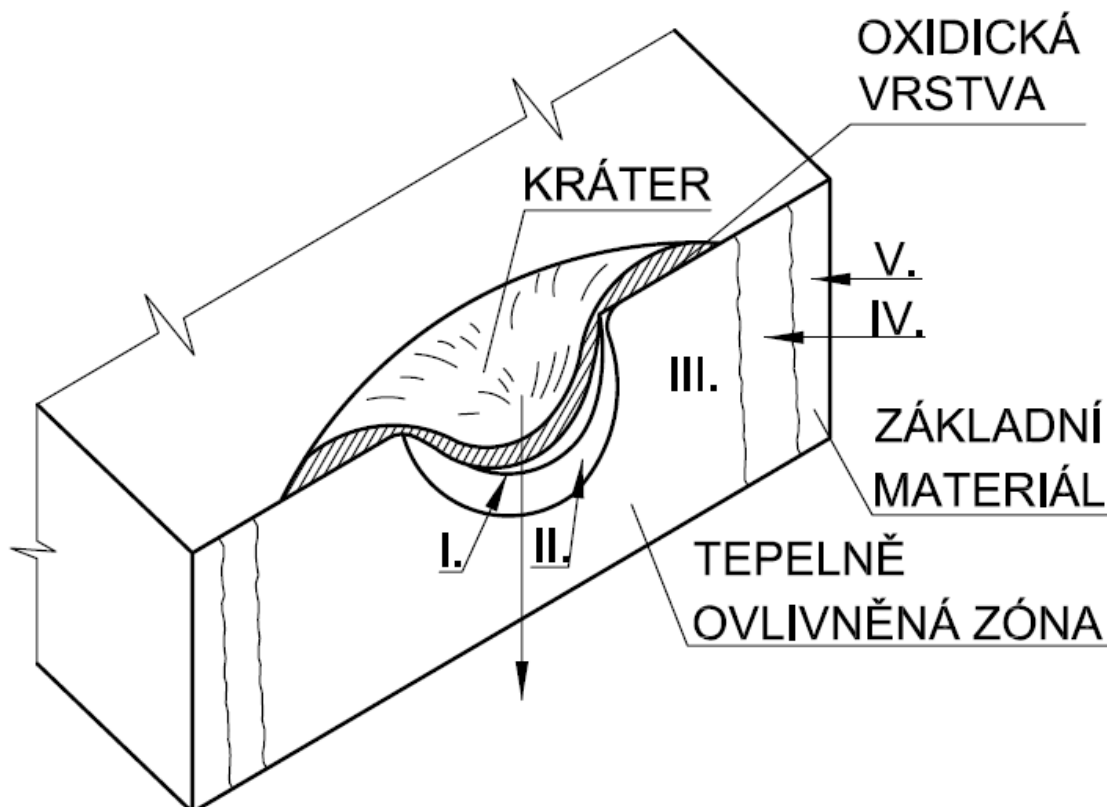
Obr. 20 Vliv rychlosti řezání na hloubku řezu u polymerů [5]

Při řezání kompozitních materiálů se doporučuje výkon laseru volit s ohledem na vlastnosti použitých vláken (skleněné, uhlíkové, aramidové ...), ne na vlastnosti matrice. Vysoký výkon potřebný pro řezání vláken chemicky degraduje hlavně polymerové matrice. Matrice a vlákna mají rozdílné teploty odpařování a tedy i časy natavení materiálu. Tepelná vodivost kompozitních materiálů je anizotropní. Laserový paprsek způsobuje poškození kompozitních materiálů tavením matrice, tepelnou roztažností uhlíkových vláken (pro CFC kompozity), vznikem kráterů na povrchu řezné dráhy, delaminací vláken a jejich lomem. Po řezání vzniká rýhovaný povrch. Při porovnávání účinku Nd–YAG a excimerového laseru na degradaci povrchu se ukazuje, že excimerový laser má nižší tepelné destruktivní účinky než Nd–YAG laser.[6]

2.2 Kovy

Při dopadu laserového paprsku na kovový materiál se vytvoří malý kráter. Velikost kráteru se postupně zvětšuje v závislosti na délce působení laserového paprsku na materiál. Dle provedených analýz od pana Taniguchi, který zjistil, že se tyto krátery skládají ze čtyř částí a oxidické vrstvy o tloušťce okolo 0,1 mm:

- I. vrstva: skládá se z martenzitu a austenitu o tloušťce 30 μm a tvrdosti 700 \div 800 HV
- II. vrstva: skládá se z Fe- α a má tvrdost 350 \div 550 HV
- III. vrstva: lehce lepitelná zóna, která má tvrdost 850 \div 950 HV a vyznačuje se převážně zpevněnou martenzitickou strukturou



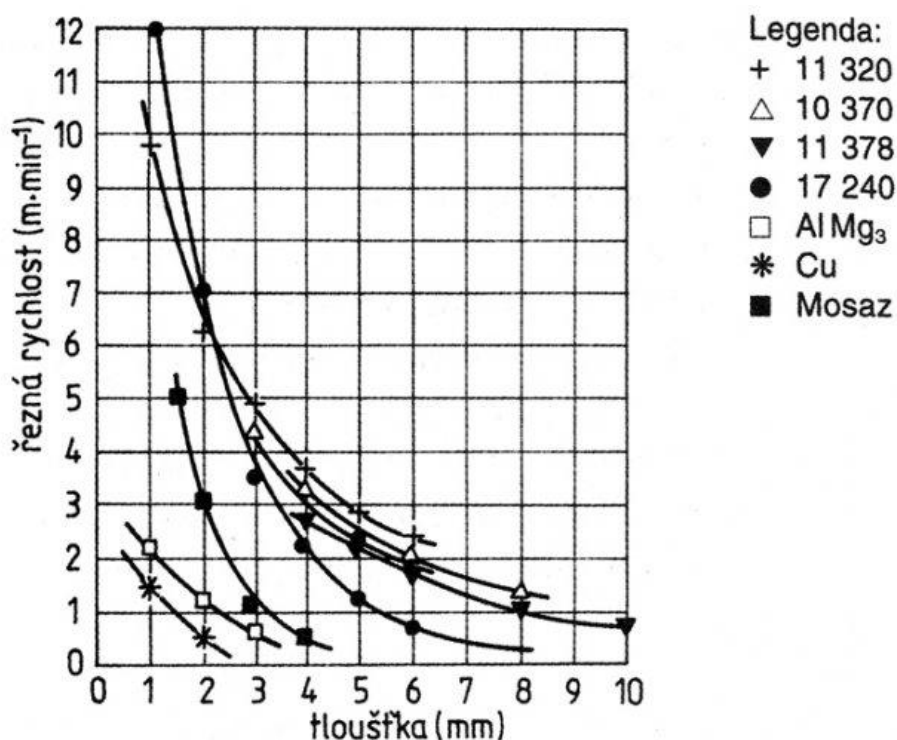
Obr. 21 Znárodnění tepelně ovlivněných zón [8]

Tyto analýzy byly provedeny na oceli s obsahem 1% C a při použití CO₂ laseru o výkonu 150 W.

Experimentální řezání ukazuje na skutečnost, že je výhodnější obrábět i jinak tepelně zpracovávat (tepelně legovat, kalit atd.) kovové materiály, které mají vyšší procento legúr. Lepší laserová obrobiteľnosť těchto materiálů je dána horším odvodem tepla z místa řezu a tím intenzivnějším odpařováním materiálů a chemickým složením, tj. obsahem atomů pohlcující záření o této vlnové délce.

Zvláště dobrá a velmi zajímavá je laserová obrobiteľnosť titanu a jeho slitin, tj. materiálu určeného pro zvláště namáhané součásti s nízkou hmotností (letecký, raketový, automobilový průmysl, části technologických zařízení s vysokou rychlostí otáčení). Dobrá relativní obrobiteľnosť

je zřejmě dána relativně nízkou tepelnou vodivostí, přítomností oxidů a relativně nízkou vypařovací teplotou a latentním teplem. [1]



Obr. 22 Závislost hloubky řezu na rychlosti posuvu pro kovové materiály. [4]

2.3 Pomocné (asistenční) plyny

- Asistenční plyny slouží k odstraňování taveniny, oxidů a výparů, plyny jsou foukány do místa řezu tryskou, jejímž středem zároveň prochází zaostřený laserový svazek.
- Plynná ochranná atmosféra se používá buďto pro ochranu zpracovávaného materiálu před okolní atmosférou (dusík) nebo i pro oxidační reakci na podporu spalování (kyslík).
- Asistenčních plynů se u mnohých typů průmyslových CO₂ laserů používá také k ochraně a chlazení optického systému a řezací hlavy.

U materiálů řezatelných kyslíkem většina energie pochází z exotermické reakce - spalování materiálu přehřátého na zápalnou teplotu kyslíkem. Nevýhodou řezání vysokolegovaných materiálů a hliníkových slitin kyslíkem je vytváření těžko odstranitelné strusky a oxidů na řezných hranách. Proto se pro tyto materiály nejčastěji používá jako asistenční plyn dusík, což způsobuje ve srovnání s kyslíkem výrazné snížení rychlosti řezání a maximální řezatelné

tloušťky. U dělení materiálů dusíkem slouží asistenční plyn jen na ochranu materiálu před vlivem okolního prostředí, zaostřovací optiku před rozstříkem a dynamickým účinkem proudu a vyfukuje roztavený kov a strusku z řezné spáry. Tak veškerá energie použitá pro řezání pochází pouze z laserového paprsku. Snížení řezné tloušťky, resp. řezné rychlosti, je částečně možné kompenzovat zvýšeným tlakem asistenčního plynu (dusíku) nebo využitím možnosti zvýšení parametrů použitím systému Bifocal pracujícím na základě speciální patentované dvouohniskové optiky. Spočívá v nahrazení standardních čoček (ZnSe) speciální dvouohniskovou optikou, která vytváří dlouhou oblast s vysokou hustotou energie nezasahující pouze povrch, ale i hloubku materiálu.[10]

Řezání slitin hliníku kyslíkem přináší o cca 25 – 30 % vyšší rychlost než řezání dusíkem, naproti tomu ovšem stojí snížená kvalita řezu (oxidy na hraně řezu, vysoká drsnost, snížená svařitelnost, zhoršení mechanických vlastností, ...). Pro řezání vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku je tedy vhodné nasazení dusíku. Oproti kyslíku je snížena rychlost řezání a maximální řezatelná tloušťka, což ale lze kompenzovat zvýšením tlaku asistenčního plynu. Řezné hrany jsou čisté, prosté oxidů a strusky a kovově lesklé. [11]

Tab. 5 Přehled asistenčních plynů

Médium	Čistota [%]	Použití	Výstupní tlak [bar]
Kyslík	99,5 ÷ 99,95	řezání uhlík. ocelí	200
Dusík	99,998 ÷ 99,9992	řezání korozivzdorných ocelí, Al slitin a nekovových materiálů	300
Argon	99,998 ÷ 99,999	řezání reaktivních materiálů (Ti), svařování	300
Helium	99,996	svařování kovů	300

[12]



Obr. 23 Princip Bifocal [11]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsem se zaměřil na ovlivnění povrchu polymethylmetakrylátu, dále jen PMMA, laserovým paprskem. Případné ovlivnění povrchu laserovým paprskem jsem sledoval a porovnal pomocí trhací zkoušky. Trhací tyčinky byly vyřezány laserovým paprskem z PMMA desky, tím bylo zaručeno případné ovlivnění povrchu. Takto připravené trhací tyčinky jsem porovnával s tyčinkami připravenými technologií vstřikování. Tyto tyčinky měly neovlivněný povrch. Další trhací tyčinky byly po povrchu frézované a broušené, těmito technologiemi byla dodána do povrchu energie, podobně jako při řezání laserem.

Pro vyhodnocení dodané energie do PMMA při broušení a frézování jsem použil dynamometr a pro vyhodnocení řezných sil jsem použil software Conmes Spider.

Veškeré naměřené hodnoty z dynamometru a trhací zkoušky jsou přiloženy v elektronické podobě na CD. Hodnoty modulu pružnosti E nejsou přesné z důvodu nepoužívání tenzometru, protože trhání tyčinek o délce A a B se nevešli mezi upínací čelisti.

3.1 Použité měřidla a přístroje

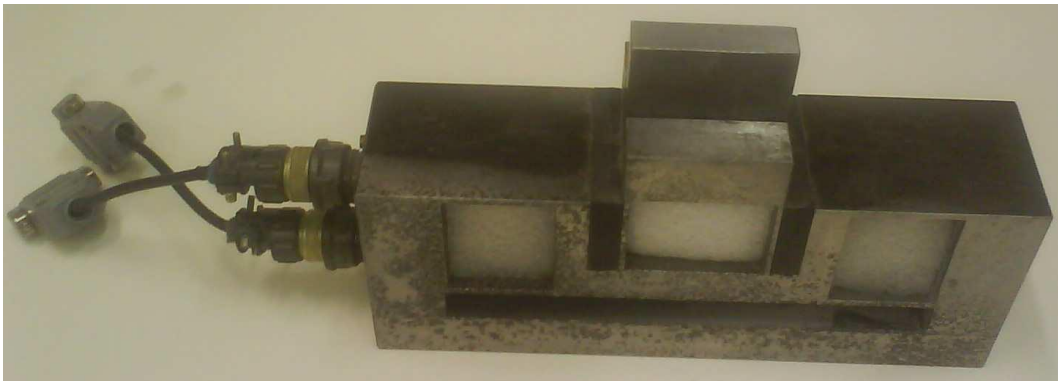
3.1.1 Laser

Trhací tyčinky byly vyřezány z desek PMMA na stroji Trumatic 3000 mimo laboratoře ÚVI v externí firmě. Posuvová rychlost byla 750 mm/min, 1,5 bodový řez a různé výkony pro různé tloušťky desek.



Obr. 24 Trumatic 3000 [17]

3.1.2 Dynamometr s tenzometrickými členy



Obr. 25 Dynamometr s tenzometrickými členy

Vyroben v laboratořích univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Maximální možné zatížení:

$$F_f = 440 \text{ N}$$

$$F_p = 1478,48 \text{ N}$$

Rok výroby: 2007

3.1.3 Bruska

Pro broušení jsem použil rovinnou brusku BRH 20.03F

Výrobce: VOJUS Povážská Bystrica SR

Otáčky: 2550 min^{-1}

3.1.4 Frézka



Obr. 26 Frézka FHV – 50 PD

Univerzální vertikální frézka FHV – 50 PD s digitálním odměřováním. Regulace otáček vřetene 80 až 1750 min⁻¹ umožňuje použít stroj na všechny frézovací nebo vyvrtávací operace.

3.2 Broušení PMMA

Při výpočtu energie dodané při broušení PMMA jsem využil následujících vzorců:

Řezná rychlost je vyjádřena rovnicí 15, výkon řezání je vyjádřen rovnicí 16:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/s]} \quad (15)$$

$$P = F_{\max} \cdot v_c \text{ [W]} \quad (16)$$

3.2.1 Broušení kostek z PMMA

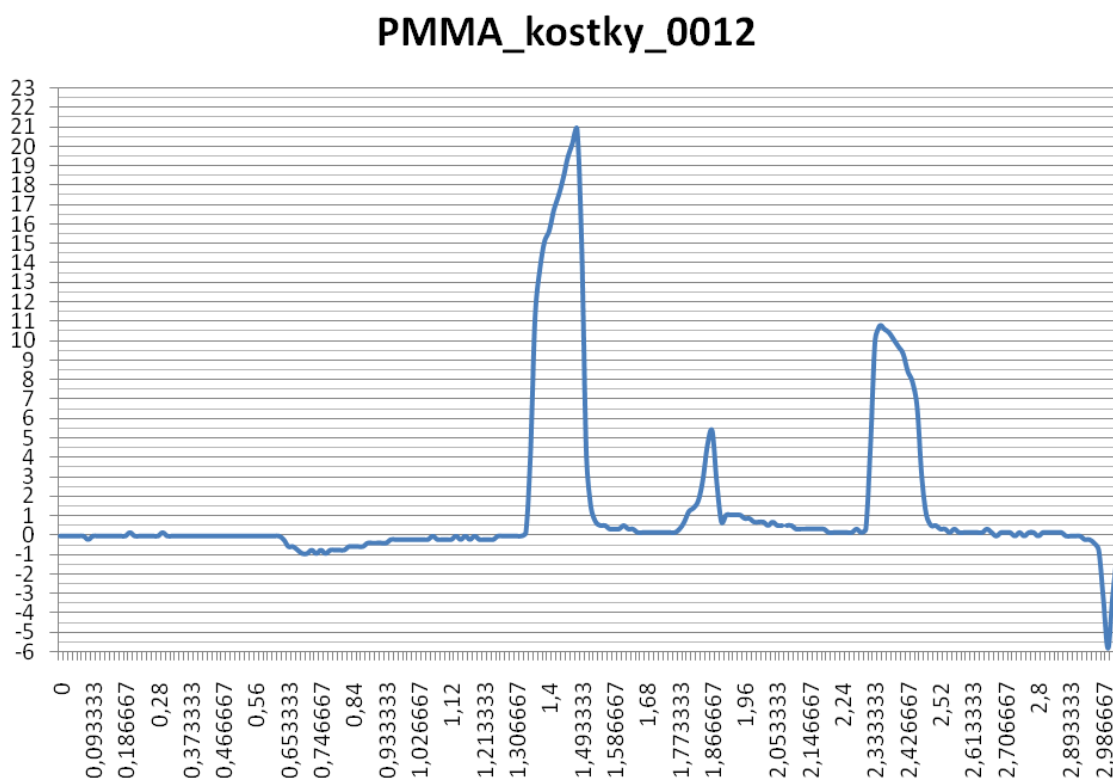
Pro stanovení optimálních řezných podmínek a pro zjištění dodané energie jsem na PMMA kostkách provedl 16 měření pokaždé s jinými parametry uvedenými v následující tabulce:

Tab. 6 Řezné podmínky při broušení

		ae[mm]			
		0,01	0,02	0,04	0,1
vf [m/min]	7	0001	0002	0003	0004
	14	0005	0006	0007	0008
	21	0009	0010	0011	0012
	23	0013	0014	0015	0016

Po porovnání výsledků broušení jsem stanovil pro broušení zkušebních tyčinek posuvovou rychlost $v_f = 14$ m/min a hloubku řezu $a_e = 0,05$ mm. Tuto rychlost jsem volil z důvodu co nejvyšší dodané energie do materiálu, ale zároveň aby nedocházelo k nalepování třísek na obrobeknou plochu jako u posuvové rychlosti $v_f = 21$ m/min.

Na Obr. 34 jsou vidět dvě extrémní hodnoty řezné síly. První extrém náleží prvnímu dotyku brusného kotouče s materiálem o maximální hodnotě řezné síly okolo 21 N. Druhý extrém náleží dotyku kotouče s materiálem při zpětném chodu.



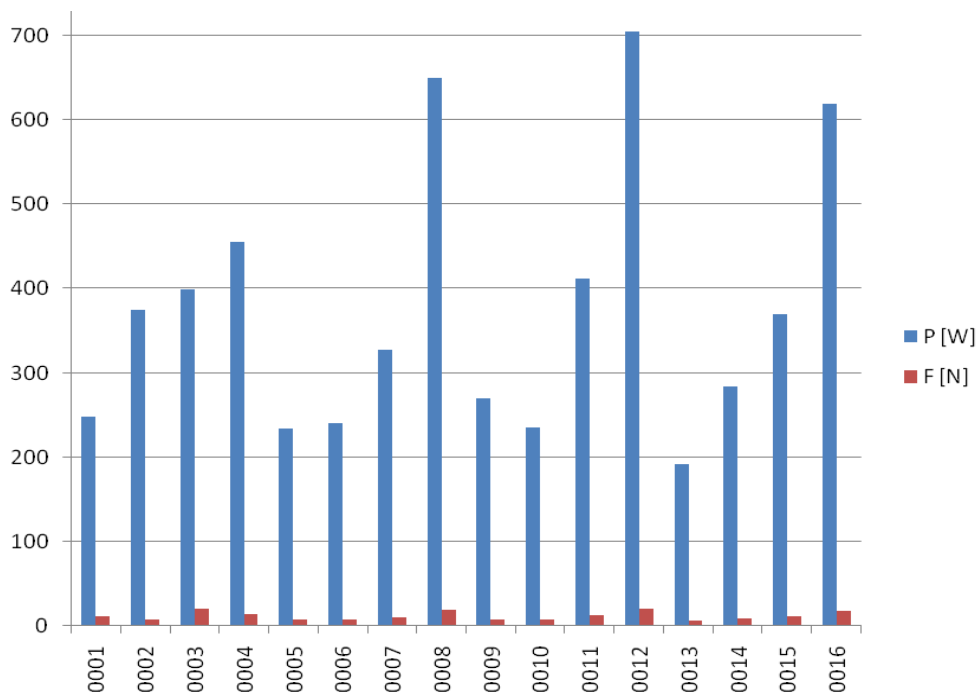
Obr. 27 Průběh řezné síly pro broušení kostky č. 0012

Přehled naměřených a vypočtených hodnot je uveden v Tab.7. Hodnoty Ra a Rz jsou pouze orientační, jelikož bylo provedeno pouze jedno měření drsnosti na jednom místě dané plochy.

Tab. 7 Přehled naměřených hodnot pro broušení kostek

měření	P_c [W]	F [N]	Ra [μm]	Rz [μm]
0001	247,912	11,133	1,12	8,71
0002	374,2108	8,157	2,78	15,95
0003	398,954	20,796	1,39	10,1
0004	455,0207	13,477	3,02	19,81
0005	234,0372	6,987	1,01	8,32
0006	240,9362	7,168	1,33	8,95
0007	326,8718	9,691	1,88	11,82
0008	649,7642	19,245	3,79	23,32
0009	270,2799	8,069	1,72	13,78
0010	234,8523	6,987	1,21	7,71
0011	412,0049	12,215	1,49	11,87
0012	704,5274	20,867	3,49	25,65
0013	191,7651	5,725	2,74	18,22
0014	283,3219	8,429	2,69	19,13
0015	369,4384	10,953	2,91	20,63
0016	619,344	18,344	4,29	33,64

Na Obr. 28 je vidět rostoucí řezná síla a tedy i výkon při zvyšování řezné rychlosti a hloubky řezu.



Obr. 28 Souhrn výkonů a řezných sil pro broušení kostek

3.2.2 Broušení zkušebních tyčinek

Pro broušení zkušebních tyčinek jsem zvolil posuvovou rychlost $v_f = 14$ m/min a hloubku řezu $a_e = 0,05$ mm. Brousil jsem brousícím kotoučem 250x20x76 AG212V80I se zaoblením, aby na zkušebních tyčinkách nevnikali vruby, kde by se koncentrovalo napětí při tahové zkoušce. Tyto vruby velmi zkreslují výsledky tahové zkoušky a výsledky nelze použít pro další práci. Zkušební tyčinky jsem brousil vždy po 5 ks, nejprve jednu stranu a poté druhou.

Maximální hodnoty řezné síly jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 8 Naměřené hodnoty pro broušení tyčinek

Měření	a	b	c	d
F_{\max} [N]	25,734	37,812	62,147	39,074

Pro výpočet celkové dodané energie do materiálu jsem použil průměr řezných sil ze všech měření. Výslednou řeznou sílu jsem stanovil $F_{\max} = 41,192$ N.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot 60} = \frac{\pi \cdot 250 \text{ mm} \cdot 2550 \text{ min}^{-1}}{1000 \cdot 60} = 33,379 \text{ m/s} \quad (17)$$

$$P = F_{\max} \cdot v_c = 41,192 \text{ N} \cdot 33,379 \text{ m/s} = 1375 \text{ W} \quad (18)$$

Výpočtem ze vzorců rov. 17 a 18 jsem stanovil energii dodanou do materiálu při **broušení** zkušebních tyčinek na **1375 W**.

3.3 Frézování PMMA

Pro frézování zkušebních tyčinek jsem volil hloubku řezu $a_e = 0,2$ mm a posuvovou rychlost $v_f = 720$ m/min. Pro frézování jsem použil 4-břitou frézu o $D = 24$ mm se zaobleným ostřím na rádius $R = 2$ mm. Zaoblení břitu frézy bylo nutné z důvodu zamezení vrubu na zkušebních tyčinkách, který by negativně zkreslil výsledky tahové zkoušky. Zkušební tyčinky jsem frézoval vždy po 5 ks, nejprve jednu stranu a poté druhou. Pro výpočet dodané energie dodané do materiálu jsem použil rovnice 19 a 20.

$$M_k = F_{\max} \cdot \frac{D}{2} \text{ [Nmm]} \quad (19)$$

$$P = M_k \cdot \omega = M_k \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ [W]} \quad (20)$$

Maximální hodnoty řezné síly jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 9 Naměřené hodnoty pro frézování tyčinek

měření	a	b	c	d
F _{max} [N]	7,317	8,087	8,472	6,162

Pro výpočet celkové dodané energie do materiálu jsem použil průměr řezných sil ze všech měření. Výslednou řeznou sílu jsem stanovil $F_{\max} = 7,510$ N.

$$M_k = F_{\max} \cdot \frac{D}{2} = 7,510 \text{ N} \cdot \frac{0,024 \text{ m}}{2} = 0,36 \text{ Nm} \quad (21)$$

$$P = M_k \cdot \omega = 0,36 \text{ Nm} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 1750 \text{ min}^{-1}}{60} = 66,06 \text{ W} \quad (22)$$

Výpočtem ze vzorců rov. 21 a 22 jsem stanovil energii dodanou do materiálu při **frézování** zkušebních tyčinek na **66,06 W**.

3.4 Tahová zkouška

Základními mechanickými vlastnostmi konstrukčních materiálu jsou: statická pevnost, mez kluzu, modul pružnosti, houževnatost a křehkost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a jiné. Mechanické zatěžování materiálu má za následek jeho deformaci. Podle stavu ke kterému dojde po

odlehčení, jsou deformace v zásadě pružné (elastické) či trvalé (plastické). Při nepřiměřeně vysokém namáhání dojde obvykle k nepřipustným deformacím, případně k porušení celistvosti (lomu). Působení síly na těleso se vyjadřuje mechanickým napětím, tedy zatížením na jednotku plochy průřezu tělesa. Pokud síla působí kolmo na daný průřez, jedná se o normálové napětí, vyjádřené:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (23)$$

Statickou zkoušku tahem lze dokumentovat pracovním tahovým diagramem, ve kterém je zachycena závislost deformace na napětí. Zvyšování napětí ve vzorku má za následek prodlužování zkušebního vzorku, které je definováno poměrným prodloužením takto:

$$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} \quad (24)$$

Maximální napětí dosažené při tahové zkoušce se nazývá mez pevnosti v tahu R_m :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (25)$$

Po dosažení této hodnoty dochází k místní kontrakci vzorku a napětí (a sním i zatěžovací síla) potřebné pro další deformaci klesá. Je nutno připomenout, že napětí je vztaženo na původní průřez S_0 a skutečné napětí, vztažené na okamžitý průřez, naopak roste. V materiálu probíhají procesy, které vedou ke konečné fázi tahové zkoušky k lomu. Označíme-li délku vzorku po přetržení l_u lze stanovit tažnost A :

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 [\%] \quad (26)$$

Hodnoty tažnosti A slouží k přibližnému posouzení houževnatosti a tvárnosti materiálu. [14]

Metodu zkoušky tahem kovových materiálů při teplotě okolí předepisuje ČSN EN 10002-1 (nahrazuje ČSN 42 0310 z r.1978). [15]

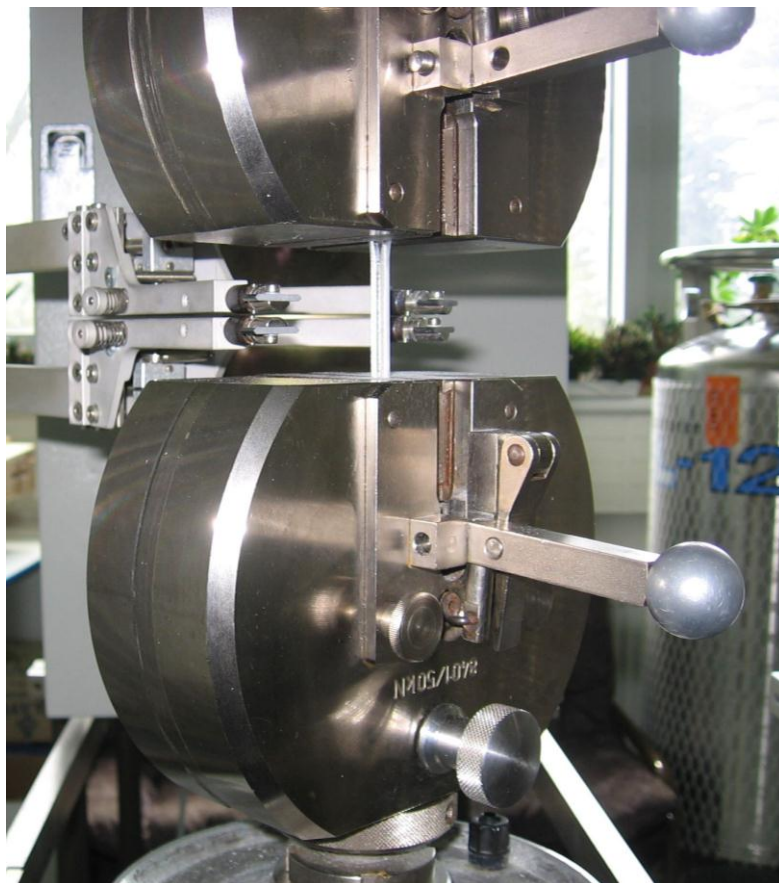
3.4.1 Měřicí zařízení

Měření pevnosti trhacích tyčinek ovlivněných laserem a technologiemi frézováním a broušením jsem prováděl na trhacím stroji ZWICK 1456 v laboratořích ÚVI. Trhací stroj byl vybaven čelistmi pro upnutí trhacích tyčinek. Tenzometry jsem nepoužíval z důvodů nedostatku místa me-

zi čelistmi především u vzorků délek A, B a C. Z tohoto důvodu nejsou věrohodné naměřené hodnoty modulu pružnosti. Ve výsledcích jsem žádné závěry pomocí modulu pružnosti nevyvozoval. Počet trhacích tyčinek jsem stanovil na 10 kusů pro každou délku a tloušťku.



Obr. 29 Trhací stroj ZWICK 1456 [15]



Obr. 30 Upínací čelisti trhacího stroje ZWICK 1456

3.4.2 Postup trhací zkoušky

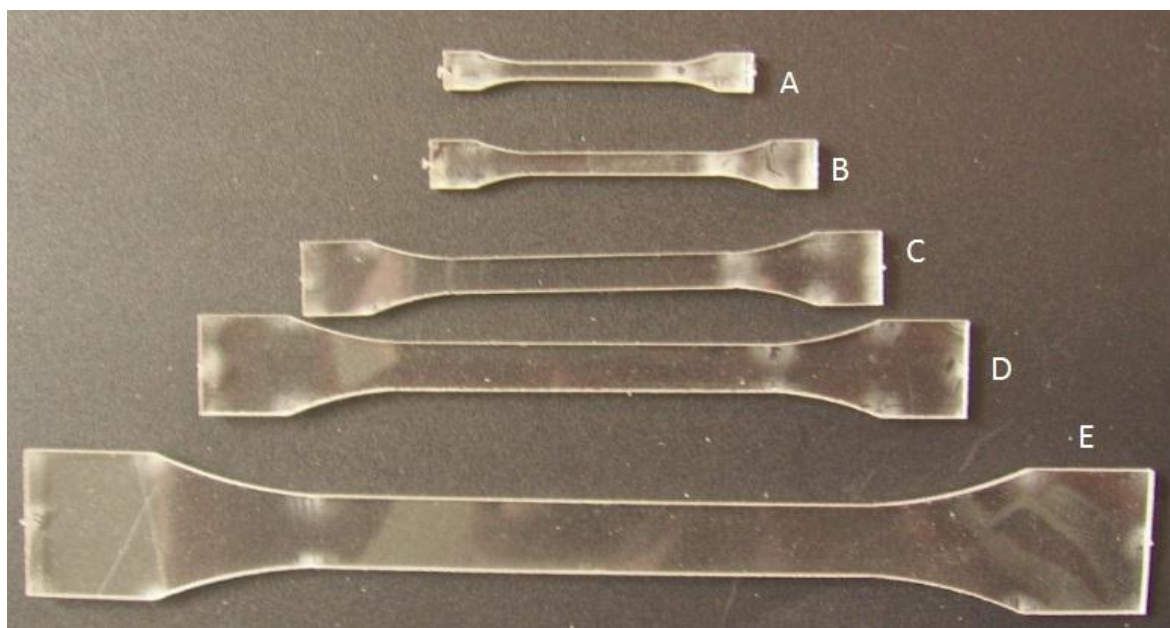
Nejprve jsem zapnul počítač napojený na trhací stroj ZWICK 1456, který zapisoval a vyhodnocoval výsledky tahové zkoušky. Následně jsem zapnul program TestXpert a poté jsem teprve zapnul samotný trhací stroj. Rychlost zkoušky jsem nastavil na 10 mm/min pro všechny trhací tyčinky, vzdálenost upínacích čelistí jsem měnil podle rozměrů trhacích tyčinek. Do programu jsem dále zadával už jen průřez samotných trhacích tyčinek, který se s různými velikostmi trhacích tyčinek měnil. Hodnocené výsledky jsou průměry 10 naměřených hodnot pro každou zkušební tyčinku, výsledky jednotlivých trhacích tyčinek jsou přiloženy na CD v elektrické podobě.

3.4.3 Zkušební tyčinky

Trhací tyčinky byli řezány rychlostí 750 mm/min, tj. 0,0125 m/s. Byl zvolen 1,5 bodový řez, který má šířku řezu 0,6 mm. Trhací tyčinky jsem měl v 5 délkách a 5 tloušťkách. Pro lepší přehlednost měření jsem označil délku tyčinky L_0 písmeny od A až po E. Jednotlivé písmena připadají vždy jedné délce dle tabulky:

Tab. 10 Označení délek tyčinek

	A	B	C	D	E
L_0 [mm]	20	25	35	50	70



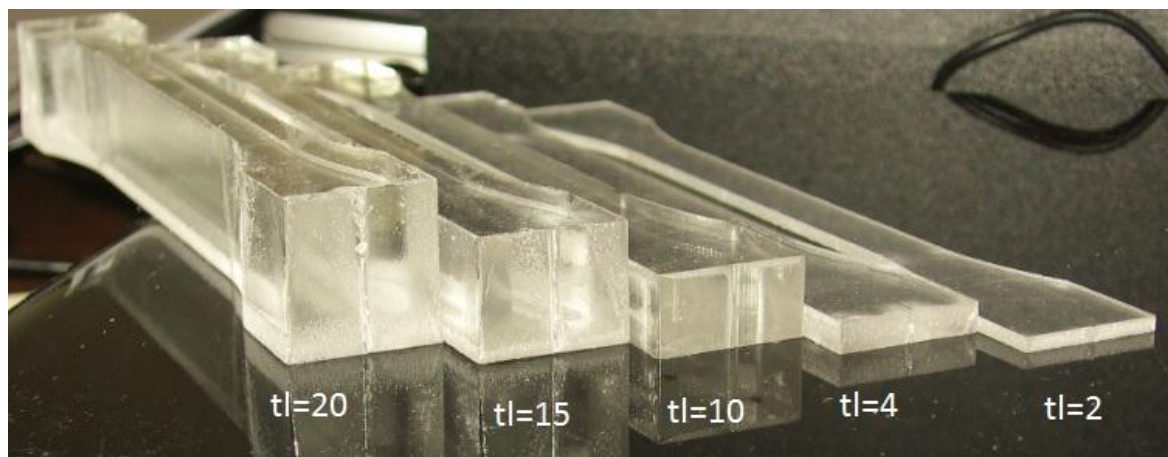
Obr. 31 Délky zkušebních tyčinek

Tloušťky jednotlivých trhacích tyčinek jsou 2, 4, 10, 15 a 20 mm. Jednotlivé tloušťky nebyly řezány na laseru jednotným výkonem v Tab. 10 jsou uvedeny výkony pro jednotlivé tloušťky. Pro další použití bude označení jednotlivých trhacích tyčinek následující, písmeno bude značit délku tyčinky, číslo tloušťku a číslice za podtržítkem označuje pořadové číslo tyčinky. Např.: E4_9; délka tyčinky 70 mm o tloušťce 4 mm a pořadové číslo tyčinky je 9.

Tab. 11 Použitý výkon při řezání laserem

tloušťka [mm]	2	4	10	15	20
výkon [W]	350	425	500	500	500

U trhací zkoušky má výsledky nezanedbatelný vliv vrubový součinitel, který značně ovlivňuje přesnost měření. U trhacích tyčinek řezaných laserem byl vrub na přechodu mezi krčkem a normalizovanou zkušební částí. V tomto místě praskly téměř všechny zkušební tyčinky.



Obr. 32 Tloušťky zkušebních tyčinek

3.5 Stanovení vlivu laserového paprsku na změnu mechanických charakteristik materiálů

3.5.1 Vliv výkonu na mez pevnost při řezání laserem

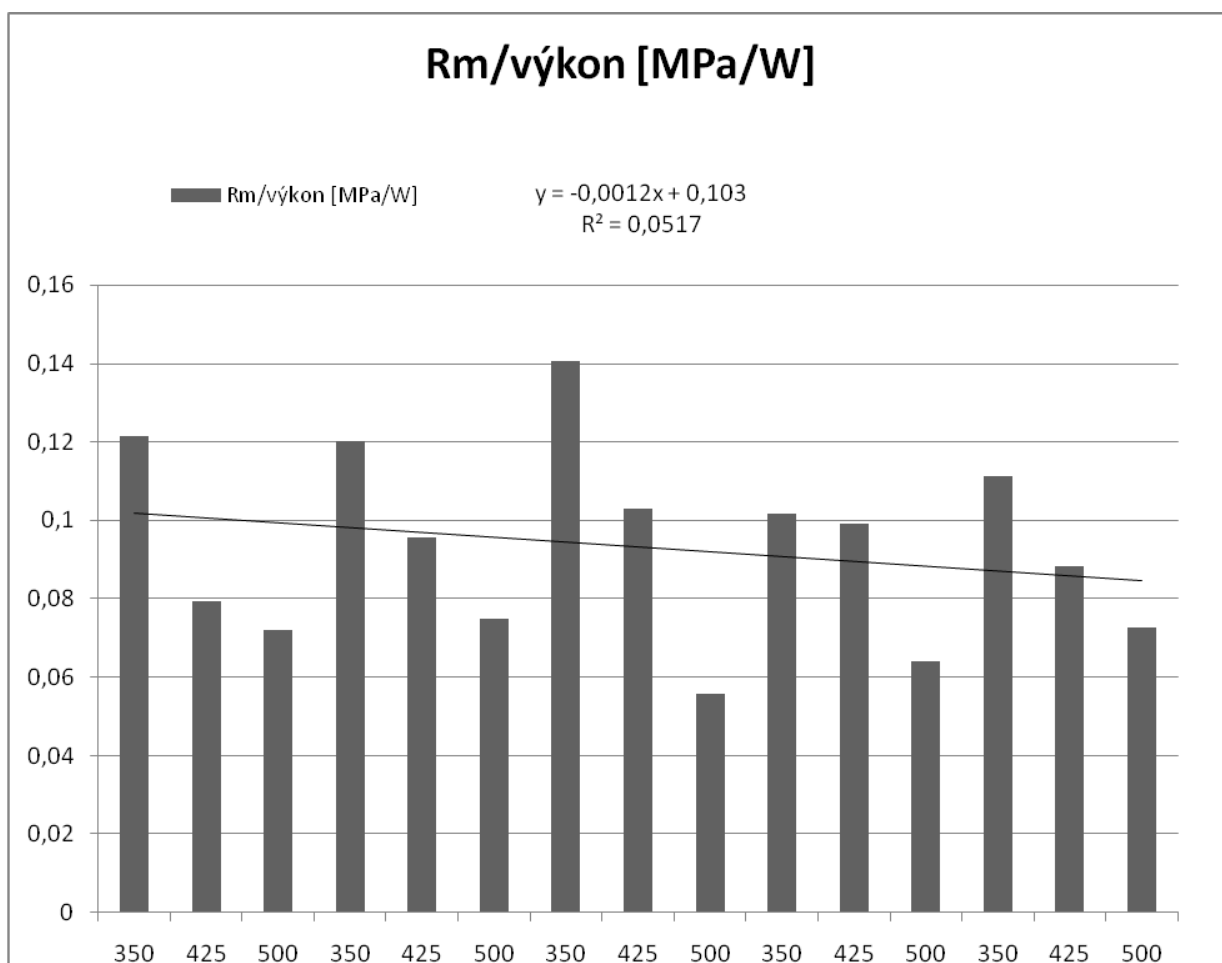
Pro výpočet této závislosti byli použity trhací tyčinky o tloušťkách 2, 4 a 10 mm o všech délkách a to z důvodu řezání trhacích tyčinek odlišnými výkony. Trhací tyčinky o tloušťce 2 mm byli vyřezány laserovým paprskem o výkonu 350W. Trhací tyčinky o tloušťce 4 mm byli vyřezány laserovým paprskem o výkonu 425 W a tloušťka 10 mm byla řezána výkonem 500 W.

Tab. 12 Vliv výkonu na mez pevnosti

	A2	A4	A10	B2	B4	B10	C2	C4	C10
Rm [MPa]	42,550	33,720	36,080	42,060	40,600	37,420	49,240	43,760	27,850
výkon [W]	350,00	425,00	500,00	350,00	425,00	500,00	350,00	425,00	500,000
Rm/výkon	0,122	0,079	0,072	0,120	0,096	0,075	0,141	0,103	0,056
	D2	D4	D10	E2	E4	E10	neo- vliv.	fréz.	brouš.
Rm [MPa]	35,540	42,140	31,980	38,910	37,470	36,300	78,380	48,030	76,400
výkon [W]	350,00	425,00	500,00	350,00	425,00	500,00	1,000	66,060	1375,00
Rm/výkon	0,102	0,099	0,064	0,111	0,088	0,073	78,380	0,727	0,056
Průměr	0,093								
Směrod.odchylka	0,023								

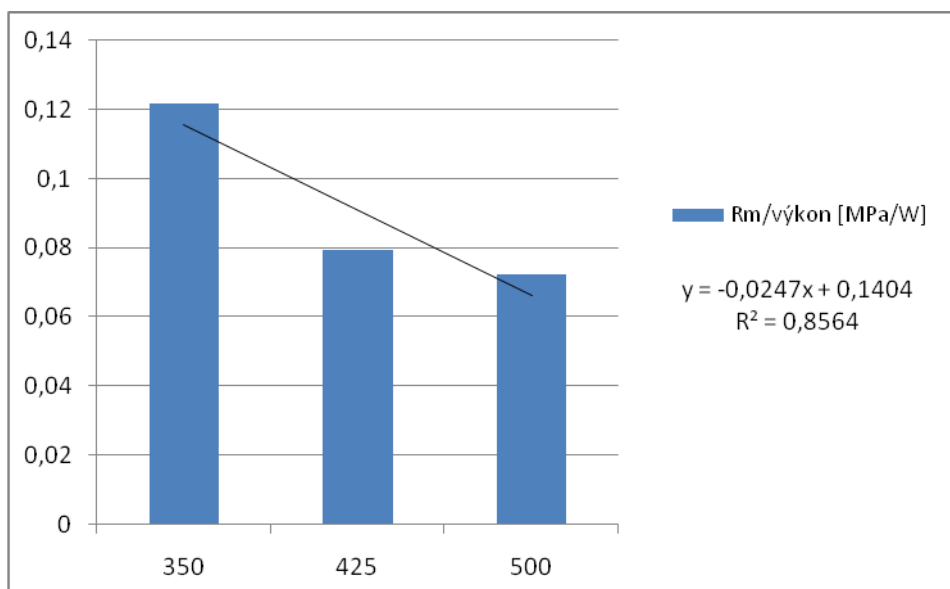
Průměrná hodnota poměru Rm/výkonu pro laserem ovlivněné plochy je **0,093±0,023 MPa/W**.

Vypočtené hodnoty poměru meze pevnosti a výkonu byli proloženy lineární spojnicí trendu a byla zobrazena hodnota spolehlivosti R^2 , pro všechny zkoušené velikosti trhacích tyčinek.

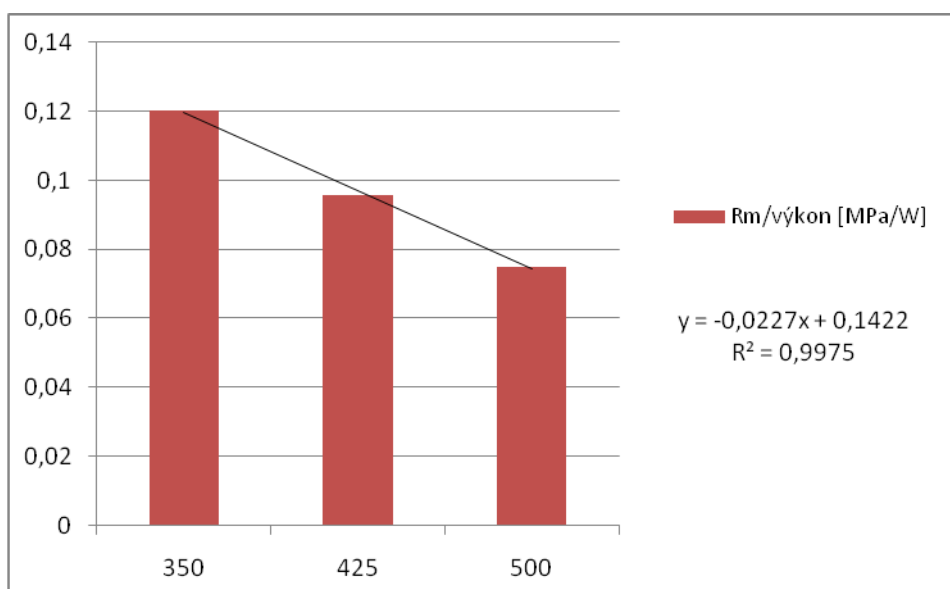


Obr. 33 Vliv výkonu na mez pevnosti

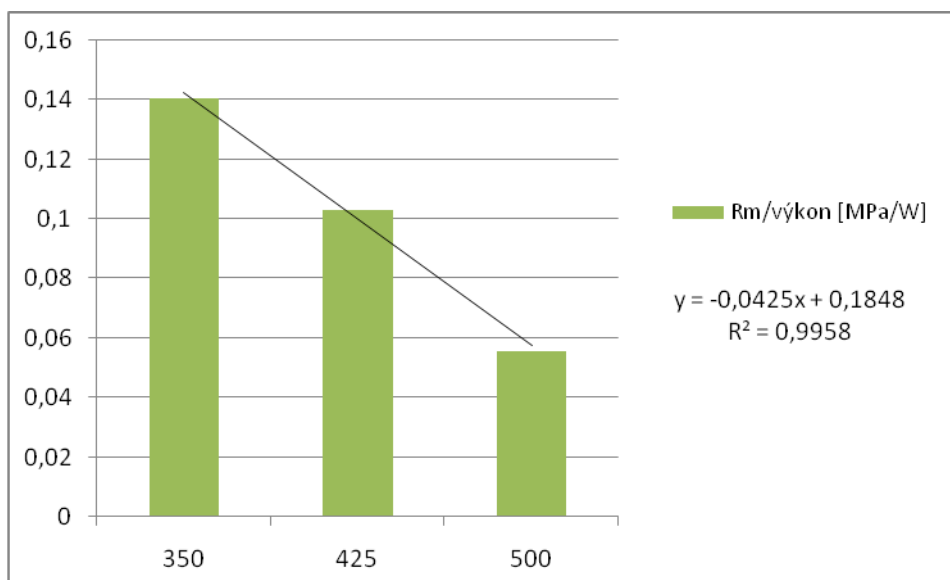
Z grafu na Obr. 33 pozorujeme, že závislost meze pevnosti na výkonu pro různé tloušťky zkušebních tyčinek je klesající. Čím je větší výkon laserového paprsku, tím menší je mez pevnosti zkoušeného materiálu. Můžeme tedy říci, že dle této závislosti materiál s rostoucím výkonem dodaným do něj během obrábění degraduje.



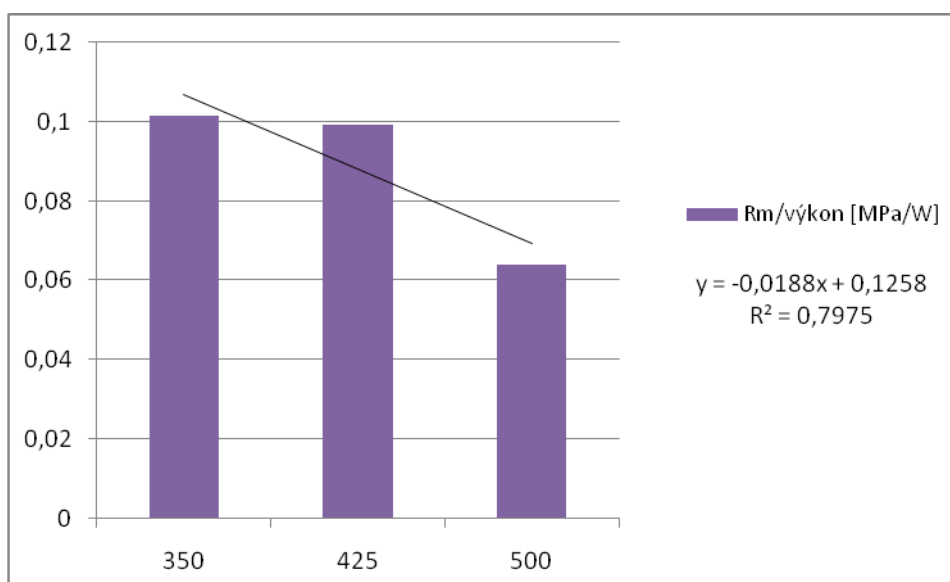
Obr. 34 Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 20 mm



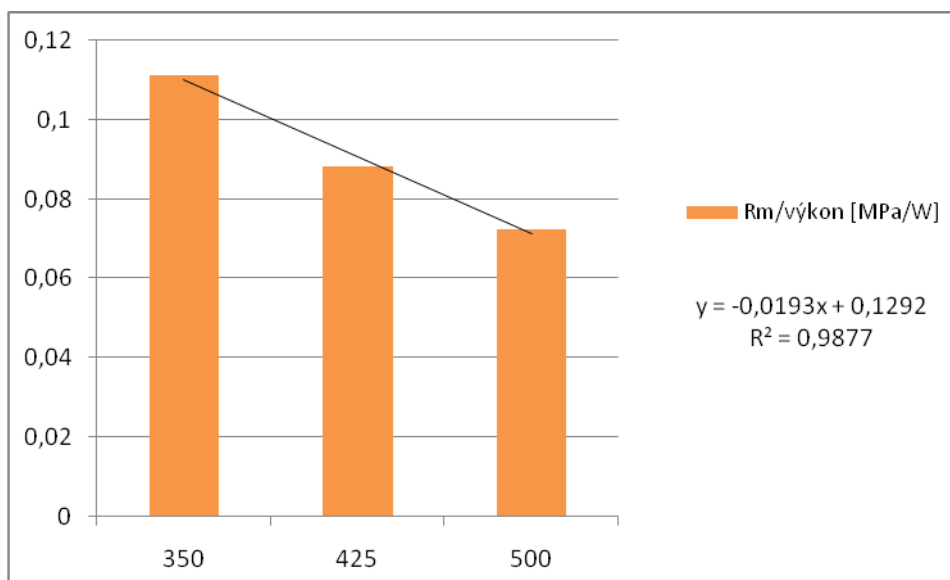
Obr. 35 Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 25 mm



Obr. 36 Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 30 mm



Obr. 37 Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 50 mm



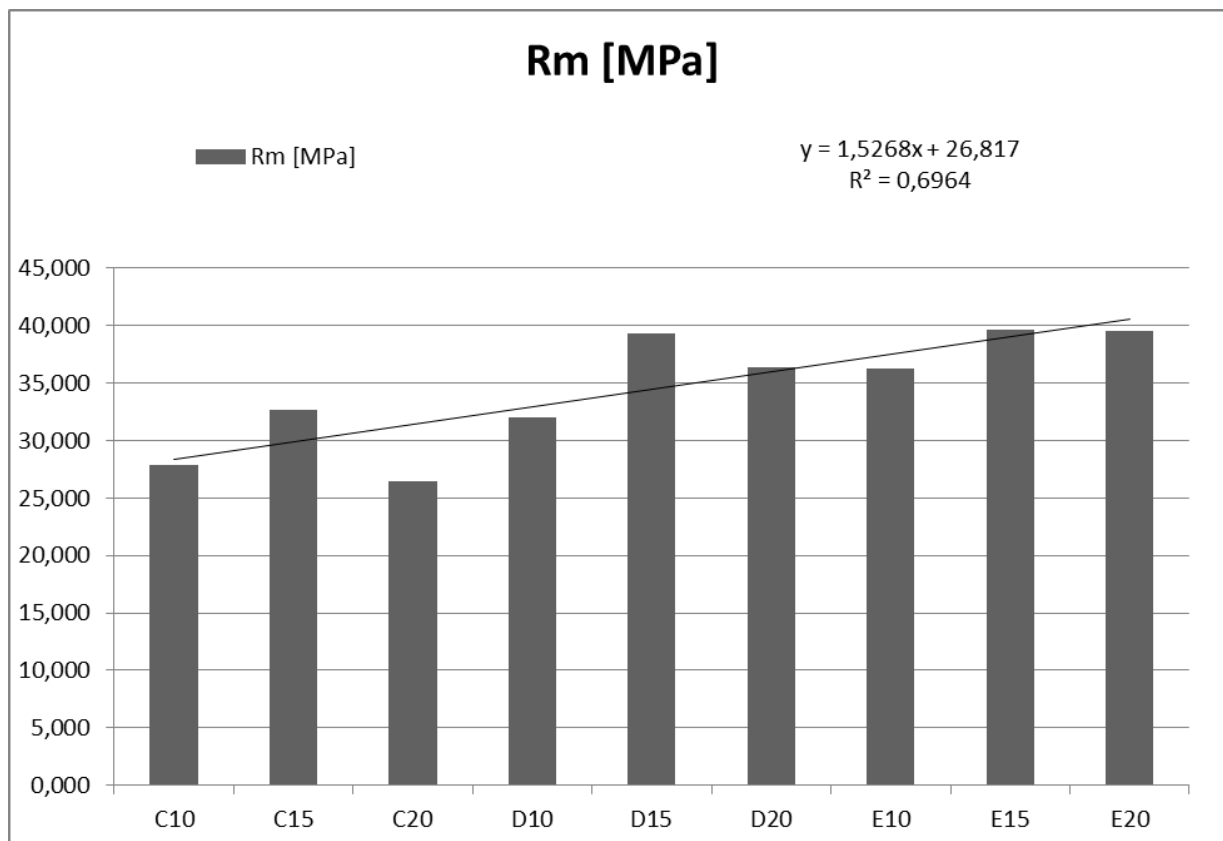
Obr. 38 Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 70 mm

3.5.2 Vliv tloušťky na mez pevnosti

Pro získání této závislosti byli použity trhací tyčinky o délkách C, D a E, z důvodu ovlivnění laserovým paprskem o stejném výkonu, tudíž může vyloučit nestejně ovlivnění jejich povrchu. Hodnoty meze pevnosti R_m byli proloženy lineární spojnici trendu a byla zobrazena hodnota spolehlivosti R^2 , pro všechny zkoušené velikosti trhacích tyčinek. Byl vypočítán aritmetický průměr hodnot meze pevnosti R_m a jejich směrodatná odchylka uvedené v Tab. 14.

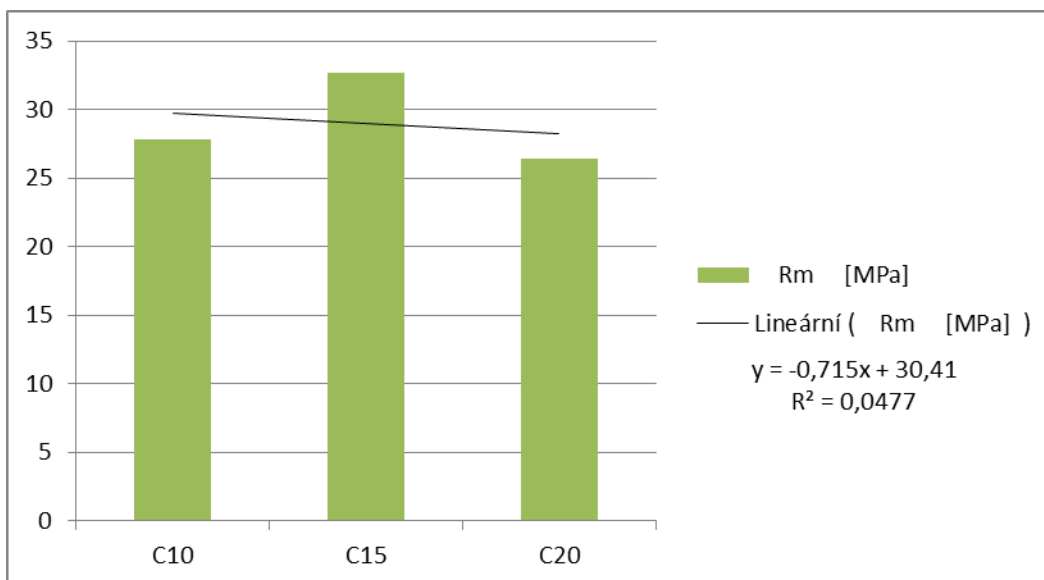
Tab. 13 Vliv tloušťky na mez pevnosti

	C10	C15	C20	D10	D15	D20	E10	E15	E20
Rm [MPa]	27,850	32,670	26,420	31,980	39,370	36,340	36,300	39,620	39,510
Průměr	34,451								
Směrodatná odchylka	4,724								

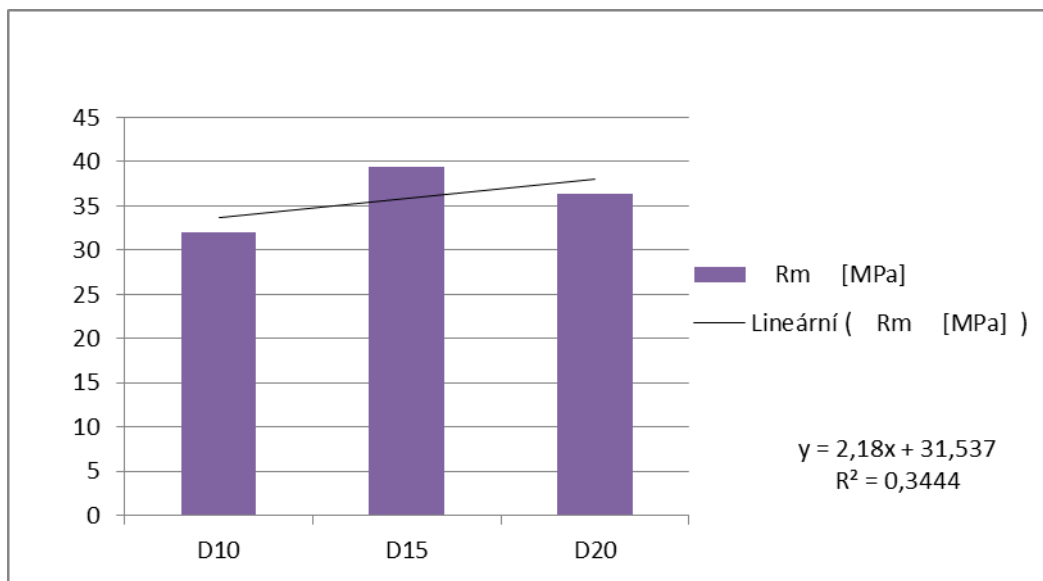


Obr. 39 Vliv tloušťky na mez pevnosti

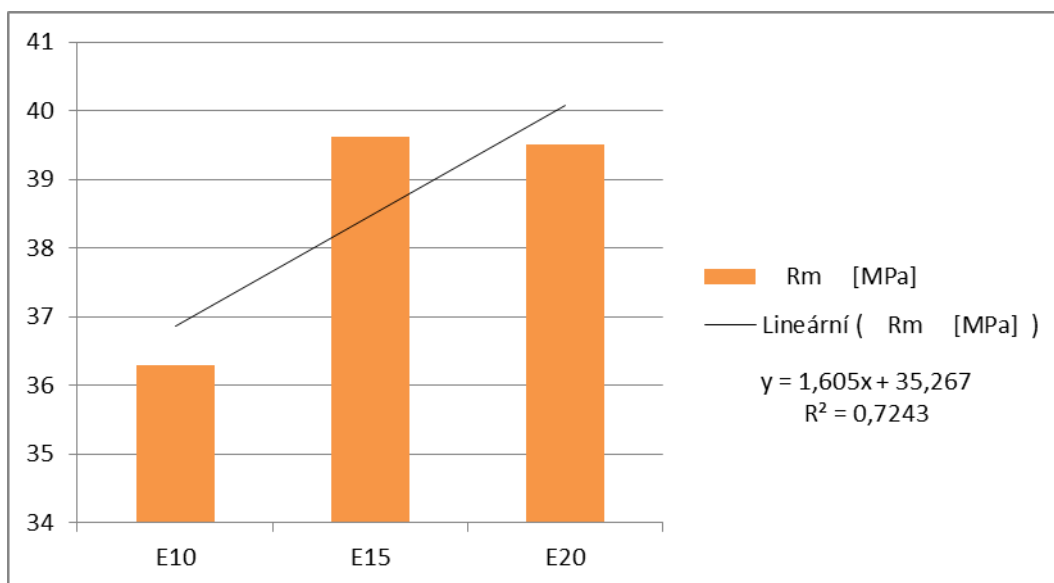
Vliv tloušťky na mez pevnosti je patrný z grafů na Obr. 38, 39 a 40. Z těchto grafů vyplývá skutečnost, že čím větší tloušťka trhací tyčinky, tím větší je mez pevnosti, takže nedochází k negativnímu ovlivnění zkoušeného materiálu laserovým paprskem.



Obr. 40 Vliv tloušťky na mez pevnosti pro délku tyčinek 35 mm



Obr. 41 Vliv tloušťky na mez pevnosti pro délku tyčinek 50 mm



Obr. 42 Vliv tloušťky na mez pevnosti pro délku tyčinek 70 mm

Průměr hodnot meze pevnosti R_m v závislosti na tloušťce je $R_m = 34,451 \pm 4,724$ MPa. Vysoká hodnota směrodatné odchylky je způsobena vrubovým součinitelem především u trhacích tyčinek délky C.

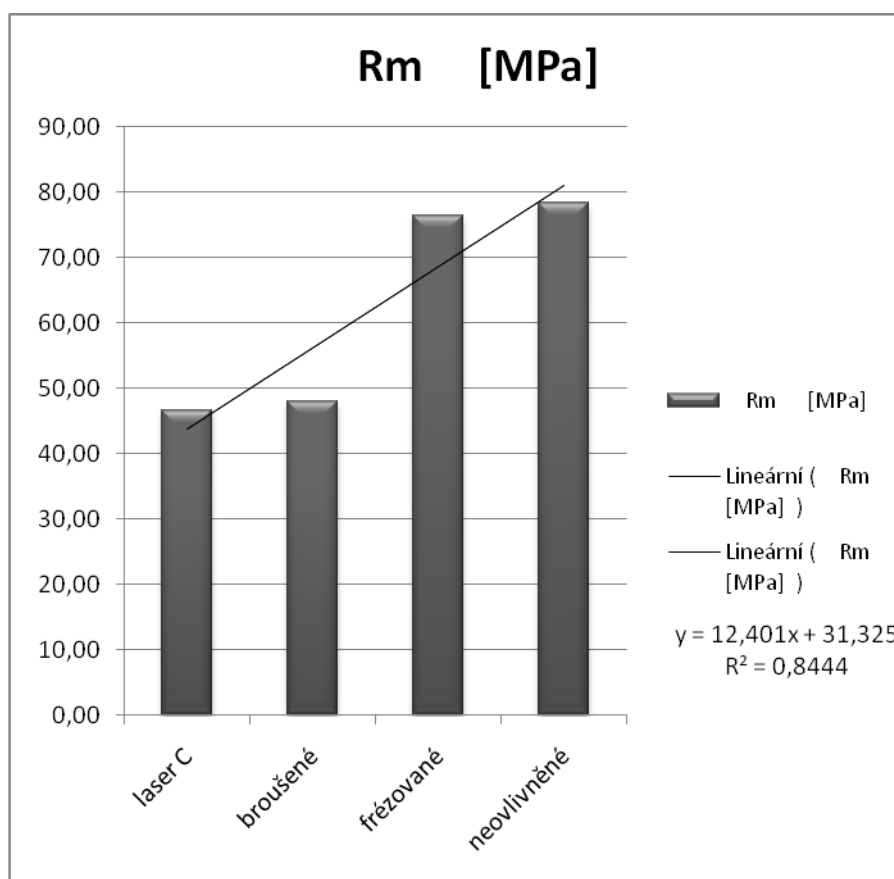
3.5.3 Porovnání technologií

Pro srovnání jednotlivých technologií byli zvoleny tyčinky o délce 35 mm, z důvodů srovnatelných rozměrů pro všechny použité technologie. Tyčinky jsou ovlivněny laserovým řezáním,

broušením, frézováním a porovnány s neovlivněnými tyčinkami zhotovenými vstřikováním. Hodnoty meze pevnosti R_m byli proloženy lineární spojnicí trendu a byla zobrazena hodnota spolehlivosti R^2 , pro všechny zkoušené velikosti trhacích tyčinek.

Tab. 14 Porovnání jednotlivých technologií

	a_0	b_0	S_0	R_m	R_B	E	Strain- R_m	ϵR_m	ϵ Break	ϵ Fmax.	ϵ Break	R_m	výkon
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[N]	[W]
laser C	2,91	4,53	13,18	46,50	46,29	3504,84	1,83	1,44	1,44	0,15	0,15	600,42	387,50
neovlivněné	3,05	5,19	15,82	78,38	76,91	3416,25	4,46	5,49	7,35	1,10	1,47	1240,59	0,00
broušené	3,05	4,50	13,71	48,03	48,03	3421,04	1,96	1,56	1,56	0,31	0,31	652,46	1375,0
frézované	3,05	4,53	13,82	76,40	76,40	3418,65	3,31	3,35	3,35	0,67	0,67	1055,34	66,06



Obr. 43 Porovnání jednotlivých technologií

Z grafu na obrázku Obr. 43 je vidět, že čím více výkonu dodáme do materiálu, tím se zhoršuje jeho pevnost. Tomuto tvrzení se vymykají pouze frézované tyčinky do kterých byla dodán energie 66,06 W. Je to způsobeno vrubovým součinitelem u broušených a laserem řezaných trhacích tyčinek, i přes snahu tento vrubový součinitel u broušení eliminovat zaoblením hran brousícího kotouče.

3.5.4 Součinitel velikosti

Při tomto porovnání by se neměla hodnota meze pevnosti R_m výrazně měnit. Jsou srovnávány stejné tloušťky a tudíž i stejné průřezy jednotlivých trhacích tyčinek, mění se pouze jejich délka a naopak. Z následujících grafů je patrné potvrzení neměnicí se meze pevnosti. Vysoká směrodatná odchylka je opět způsobena značnou citlivostí materiálu na vruby.

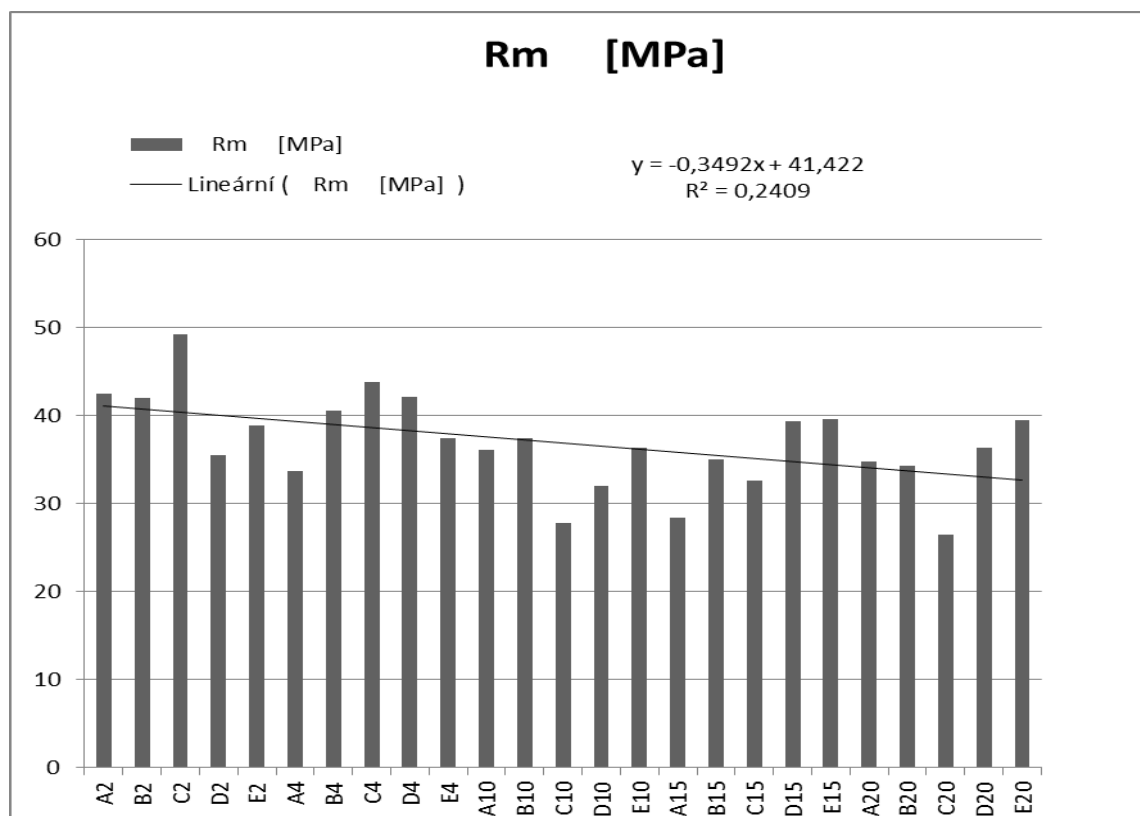
Tab. 15 Součinitel velikosti

	R_m		R_m		R_m		R_m		R_m
A2	42,55	B2	42,06	C2	49,24	D2	35,54	E2	38,91
A4	33,72	B4	40,6	C4	43,76	D4	42,14	E4	37,47
A10	36,08	B10	37,42	C10	27,85	D10	31,98	E10	36,3
A15	28,4	B15	35,04	C15	32,67	D15	39,37	E15	39,62
A20	34,73	B20	34,34	C20	26,42	D20	36,34	E20	39,51
Průměr					36,882				
Směrodatná odchylka					5,131				

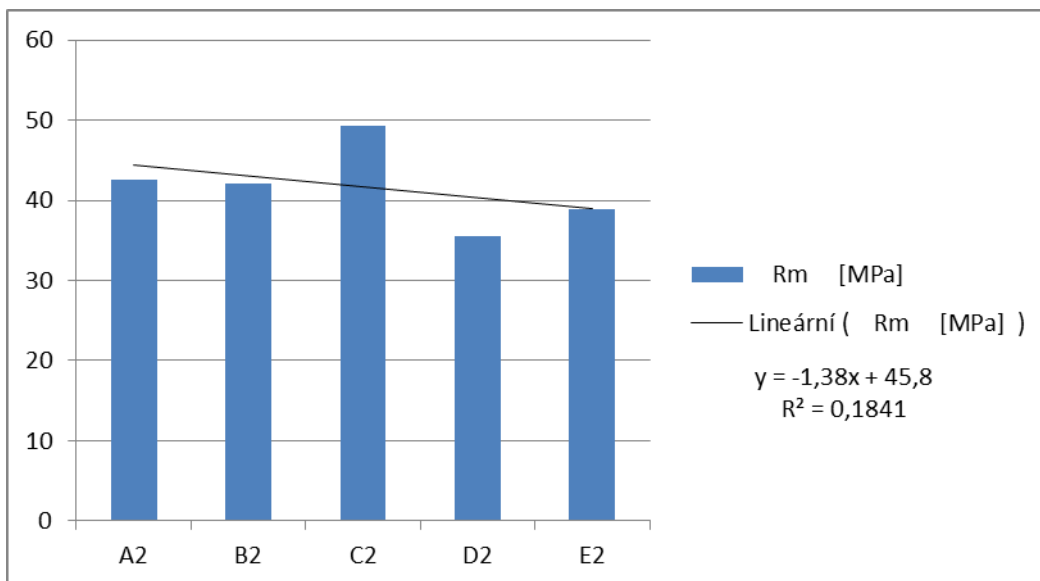
Průměr hodnot meze pevnosti $R_m = 36,882 \pm 5,131$ MPa.

Stejná tloušťka jiná délka:

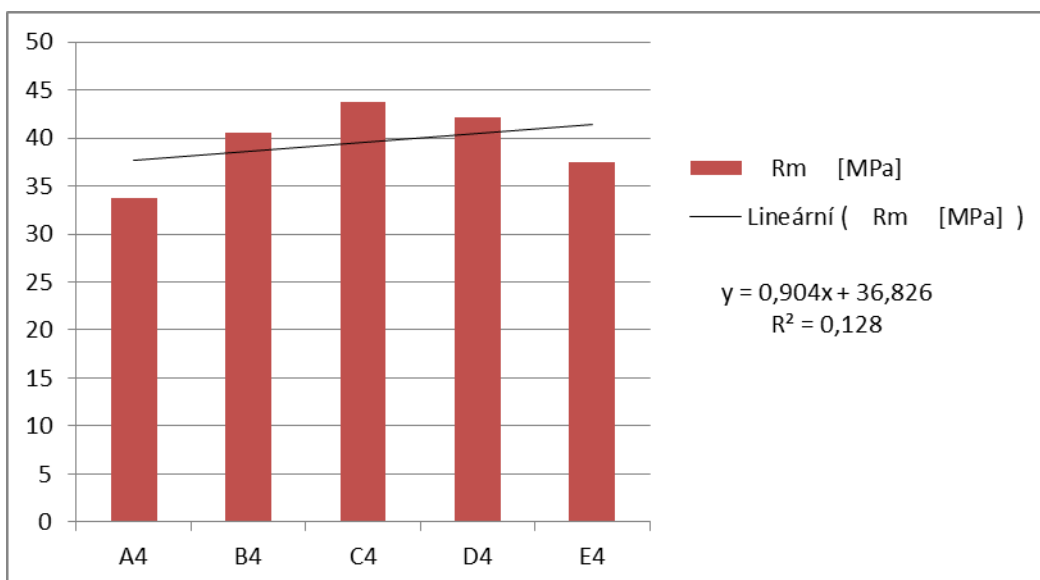
Z grafu na Obr. 44 je patrné, že se zvyšující se délkou nepatrně klesá mez pevnosti R_m .



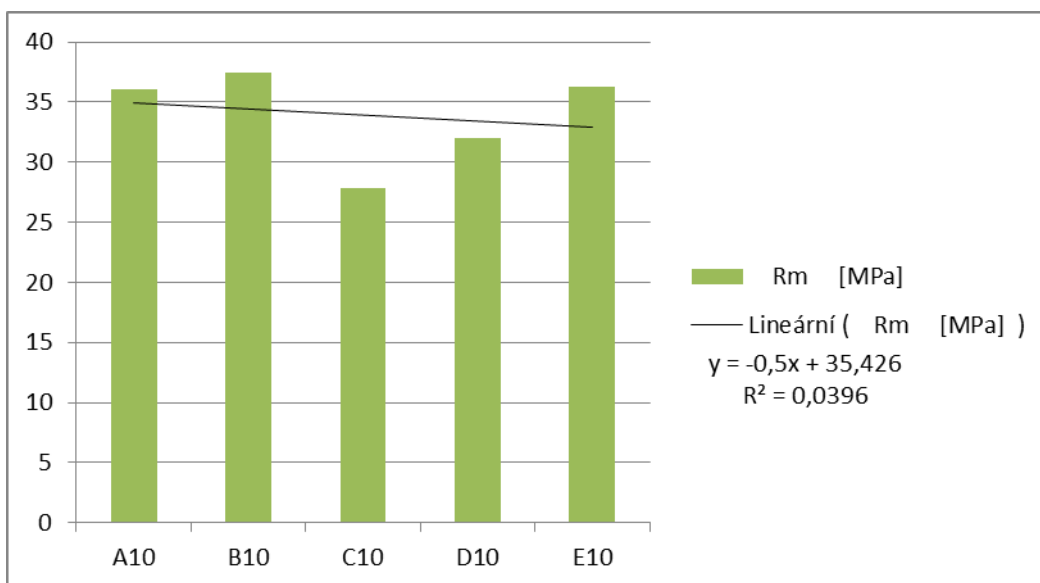
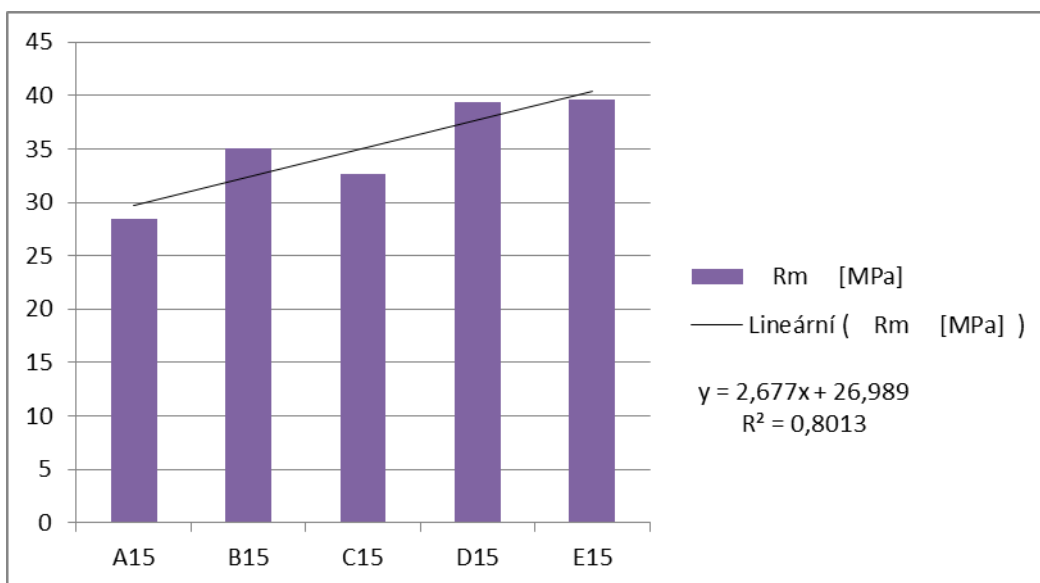
Obr. 44 Vliv délky na R_m při stejné tloušťce

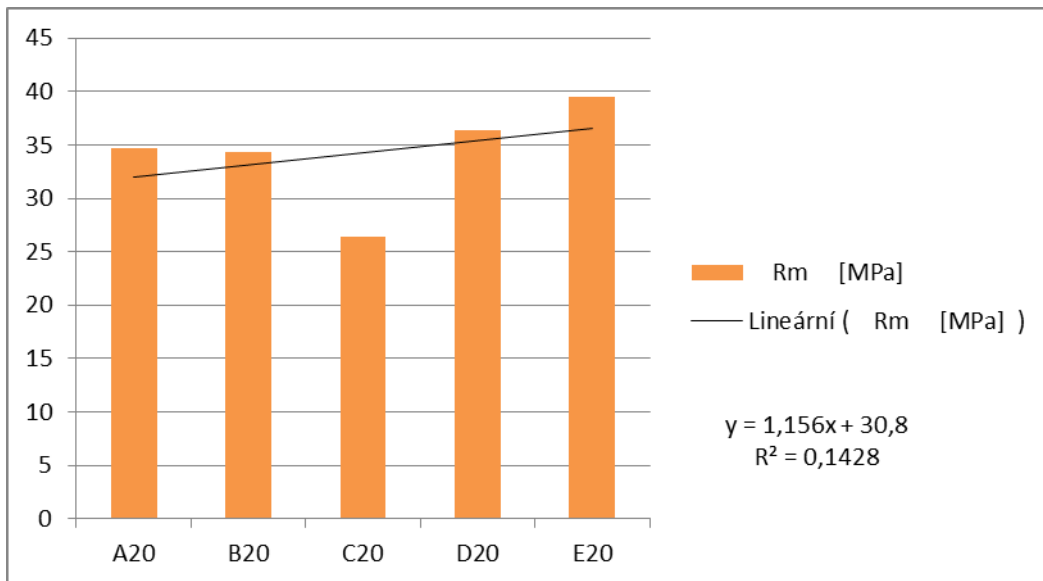


Obr. 45 Vliv délky na Rm při stejné tloušťce 2 mm



Obr. 46 Vliv délky na Rm při stejné tloušťce 4 mm

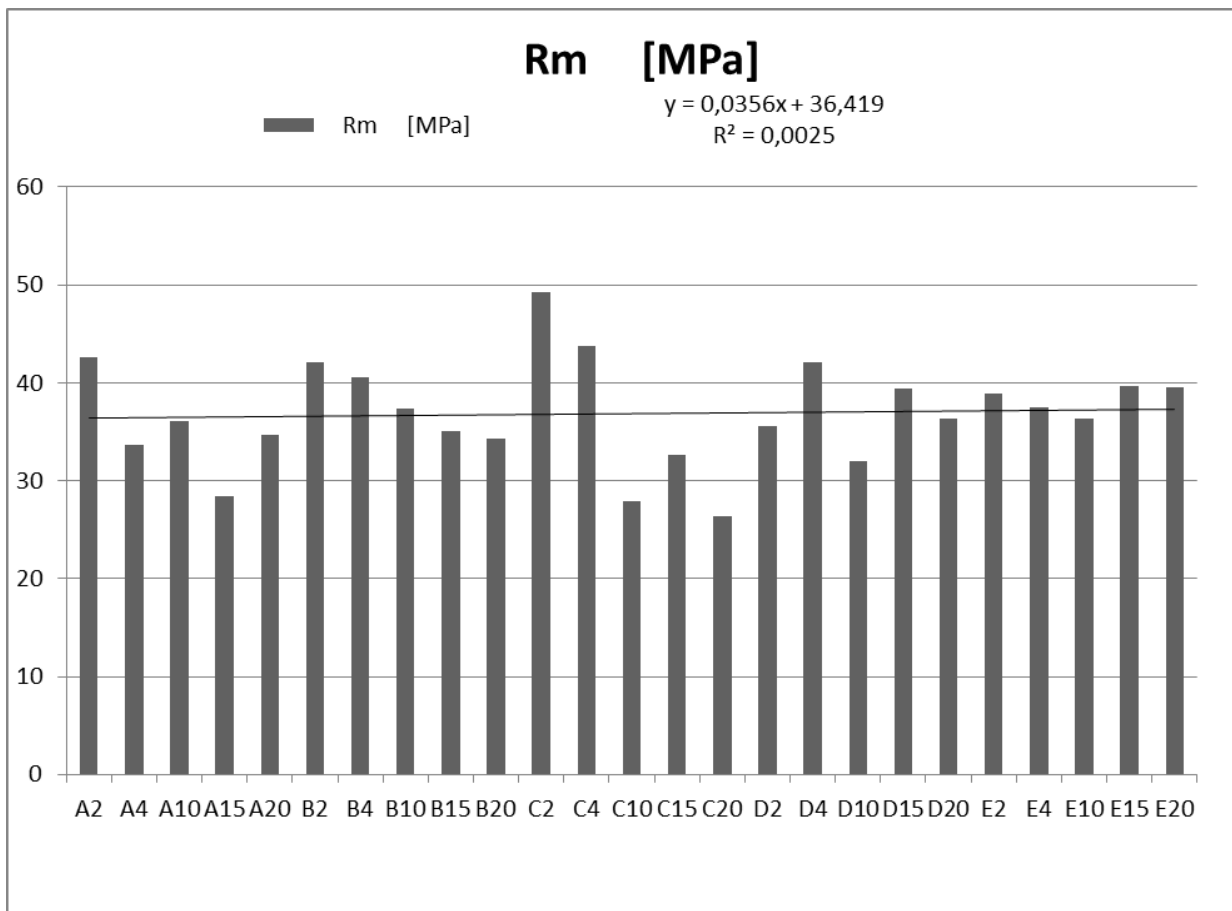
Obr. 47 Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 10 mmObr. 48 Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 15 mm



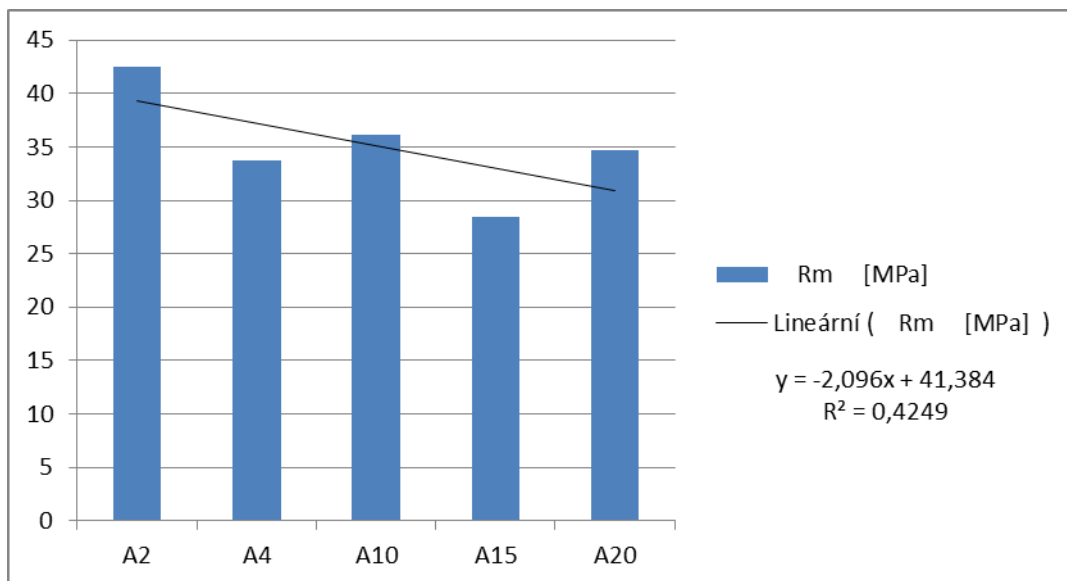
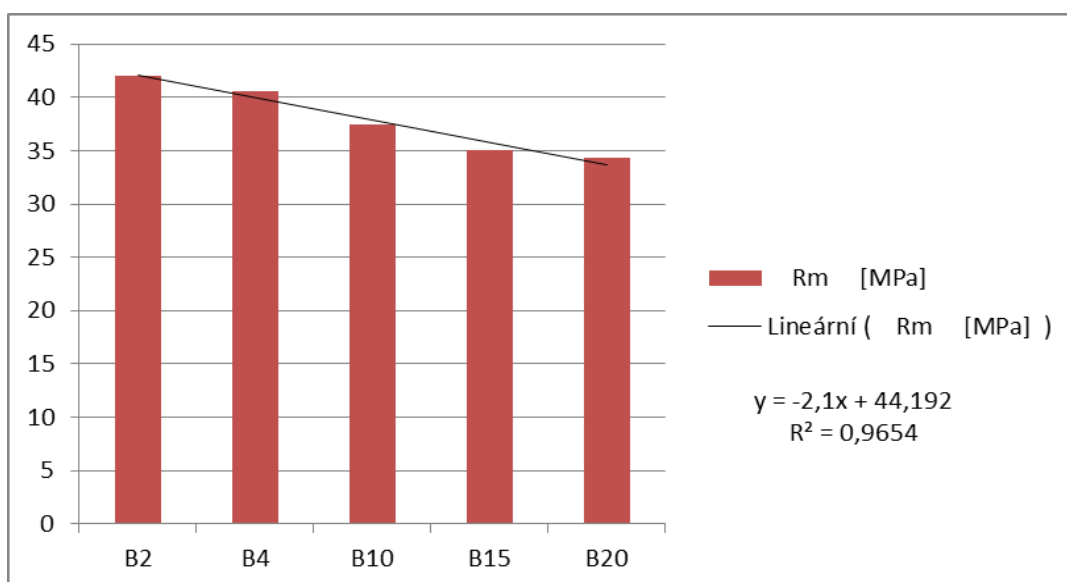
Obr. 49 Vliv délky na Rm při stejné tloušťce 20 mm

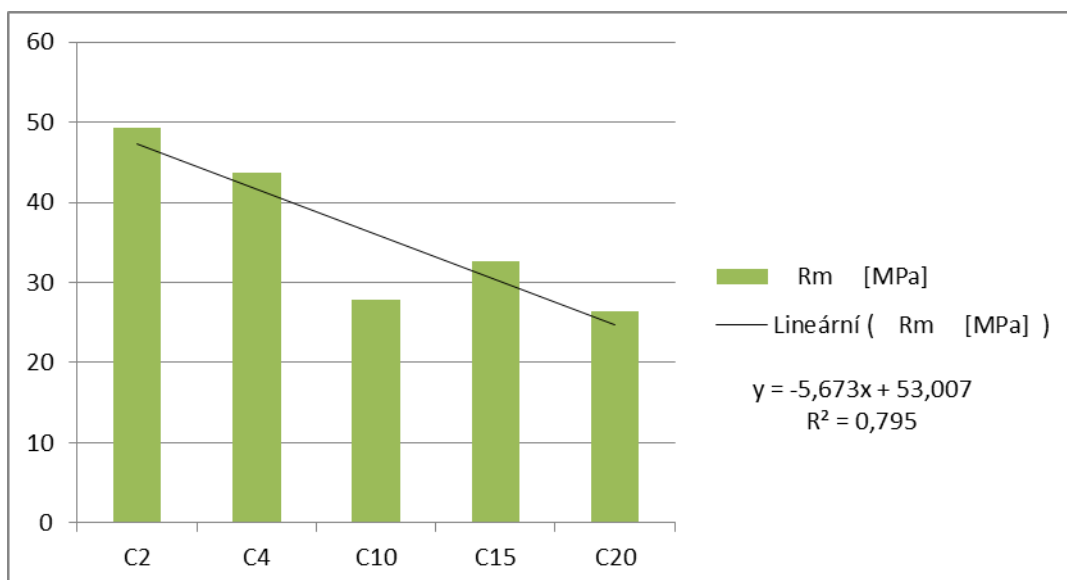
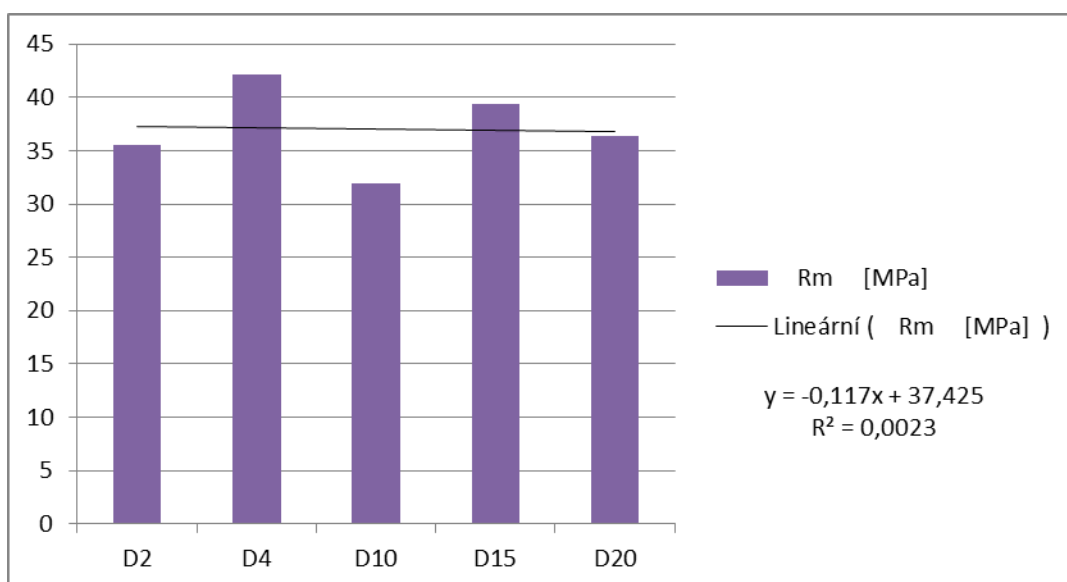
Stejná délka jiná tloušťka:

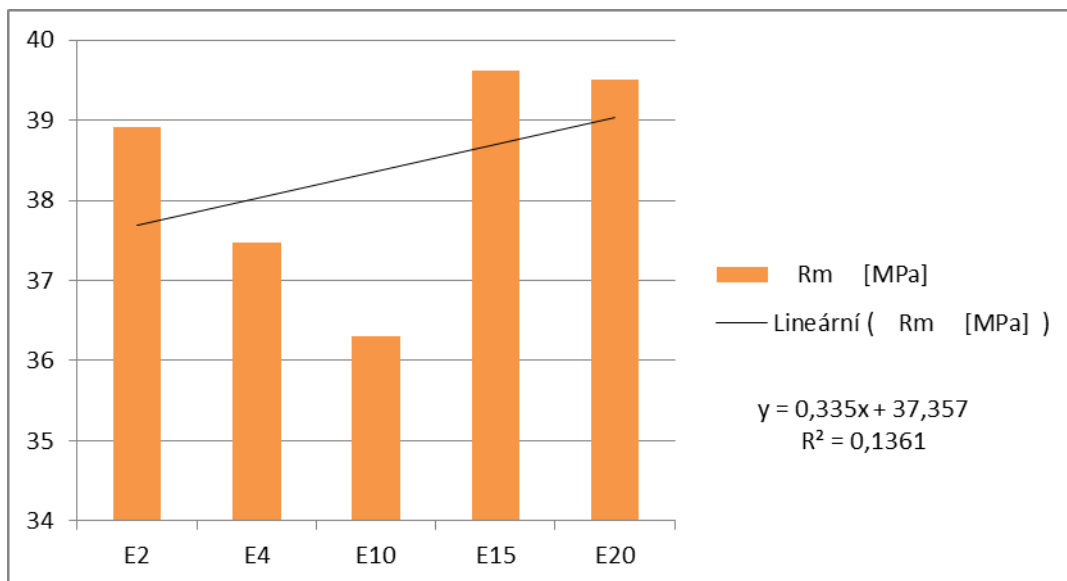
Z grafu na Obr. 50 je patrné, že se zvyšující se délkou nepatrně stoupá mez pevnosti Rm.



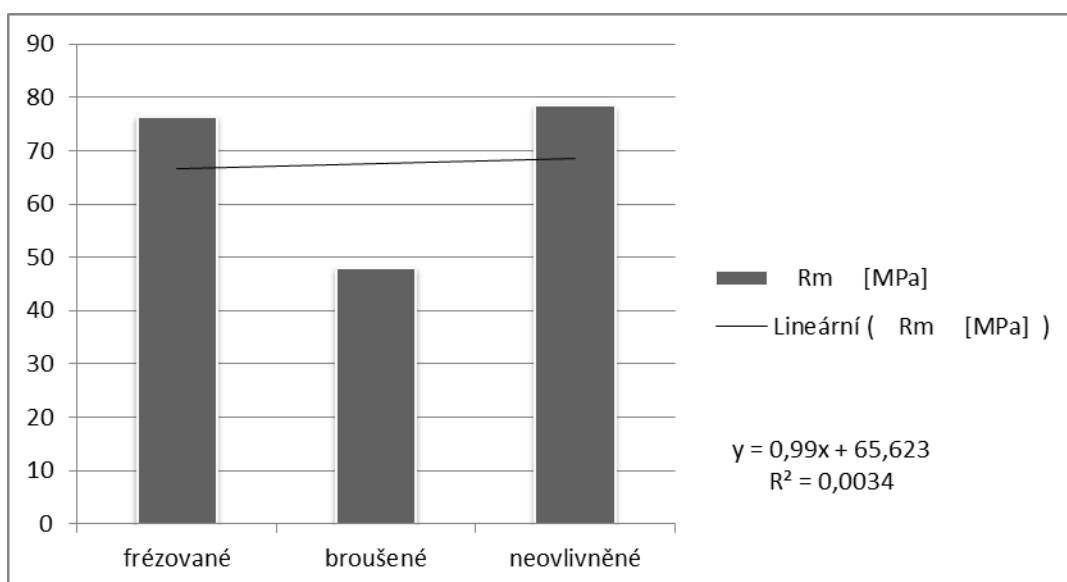
Obr. 50 Vliv tloušťky na Rm při stejné délce

Obr. 51 Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 20 mmObr. 52 Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 25 mm

Obr. 53 Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 35 mmObr. 54 Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 50 mm



Obr. 55 Vliv tloušťky na Rm při stejné délce 70 mm



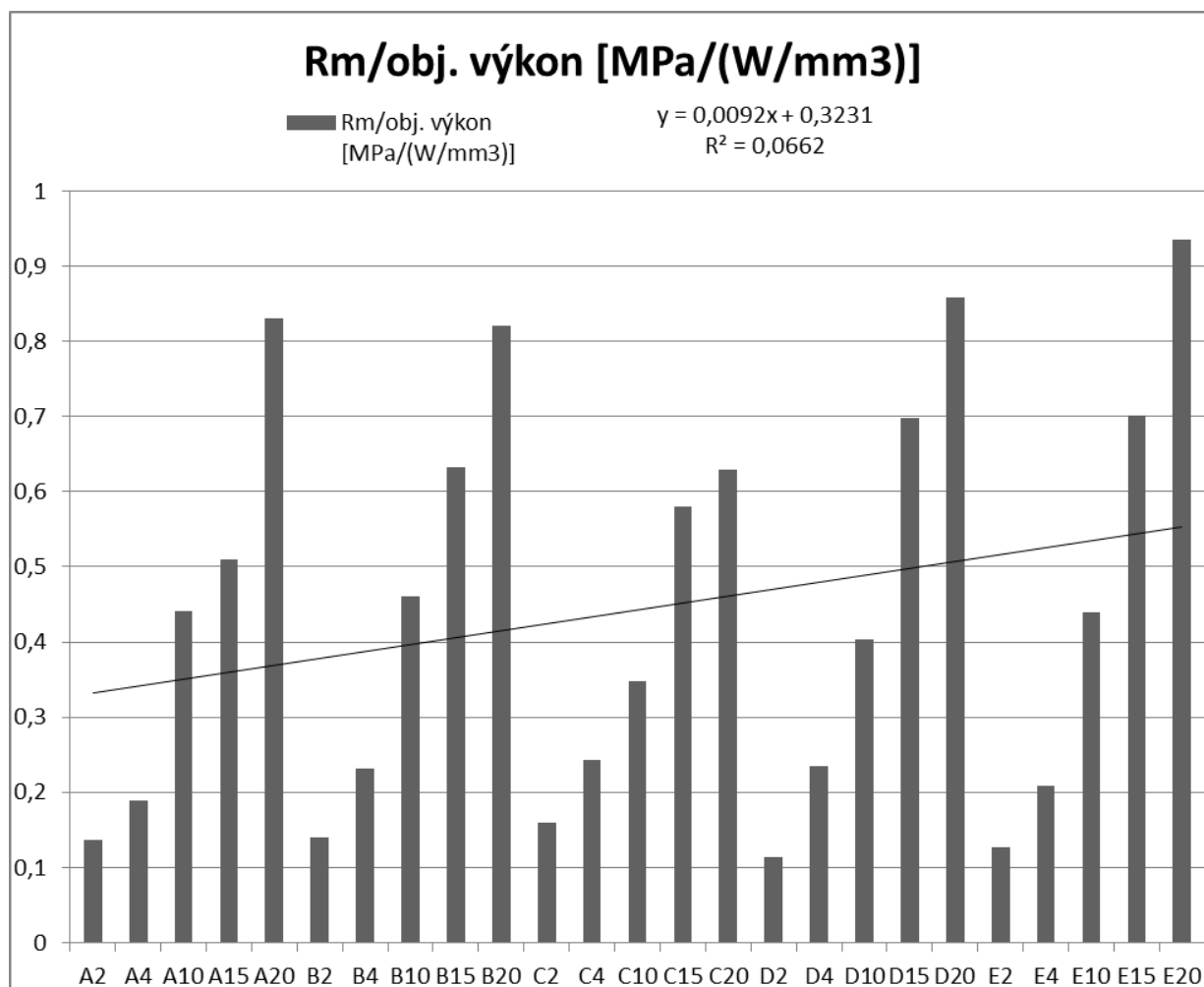
Obr. 56 Vliv tloušťky na Rm při stejné délce 20 mm

Velikostní součinitel nemá ve výsledku na mez pevnosti téměř žádný vliv. Nerovnoměrné meze pevnosti pro různé tloušťky a délky trhacích tyčinek jsou způsobeny vruby na trhacích tyčinkách, jimiž bylo měření zkresleno.

3.6 Vliv technologických podmínek na proces laserového obrábění

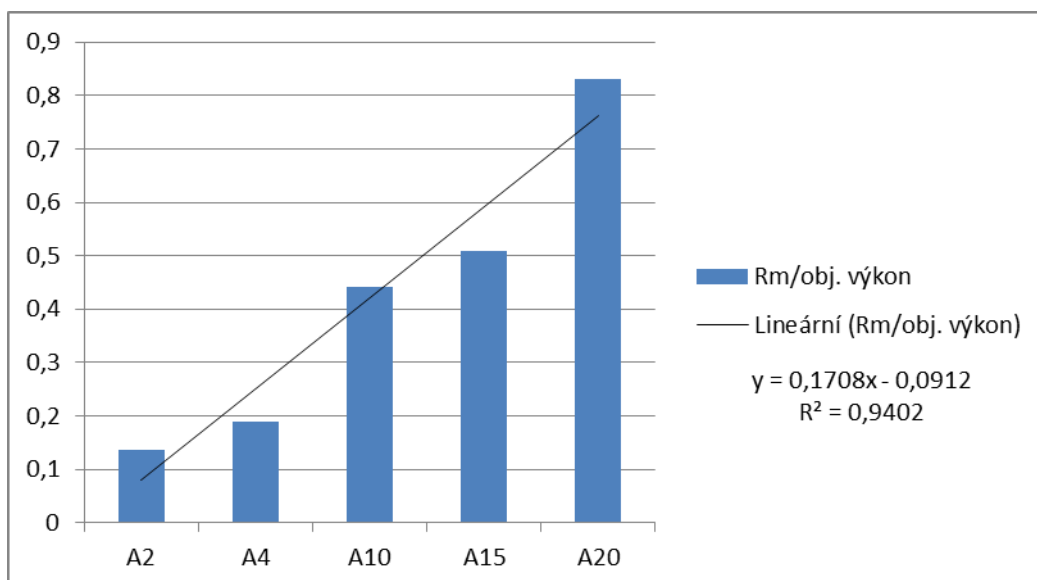
3.6.1 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu

Pro získání této závislosti byl nejprve spočítán jednotkový objem odebraného materiálu V [mm^3]. Poté byl určen objemový výkon [W/mm^3], aby bylo zahrnuto kolik energie připadá na objemovou jednotku odebraného materiálu. V následujícím kroku už byla stanovena závislost meze pevnosti na objemovém výkonu [$\text{Rm}/(\text{W}/\text{mm}^3)$]. Pro trhací tyčinky obráběné broušením byla odebrána tříska o velikosti 0,05 mm. U frézování byla velikost třísky 0,5 mm. Tloušťka řezu laserového paprsku byla 0,6 mm (ekvivalent třísky). Kompletní výsledky jsou přiloženy v příloze PII.

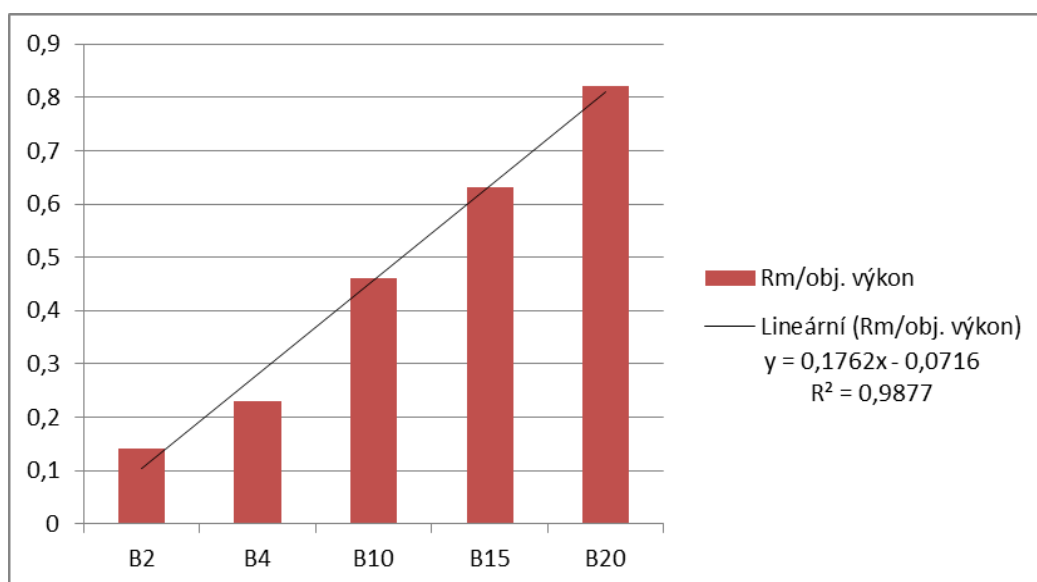


Obr. 57 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu

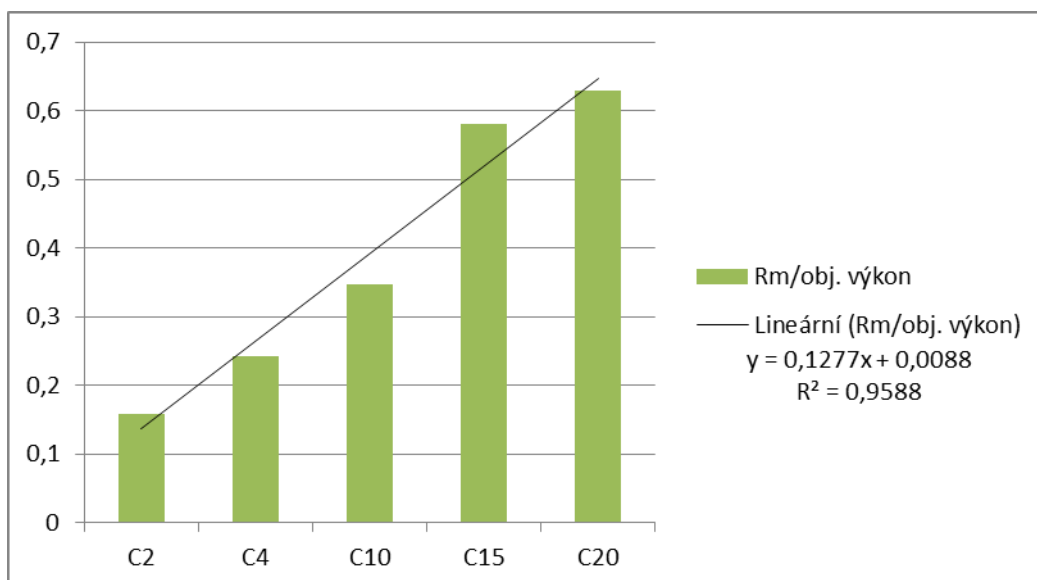
Z následujících grafů je patrné, že se mez pevnosti materiálu s rostoucím výkonem, prudce zvyšuje, tím se výrazně lepší jeho mechanické vlastnosti.



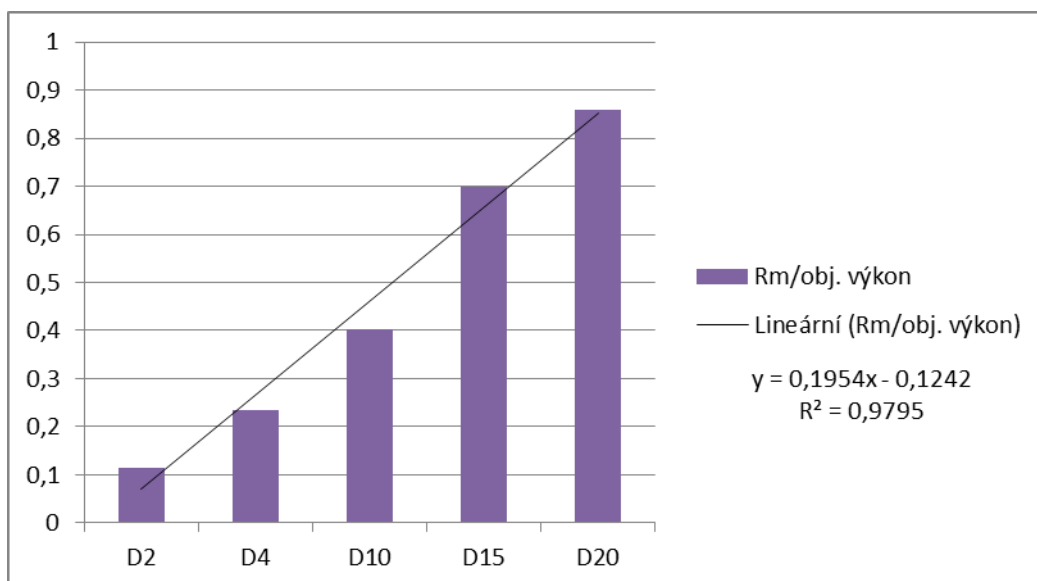
Obr. 58 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu A



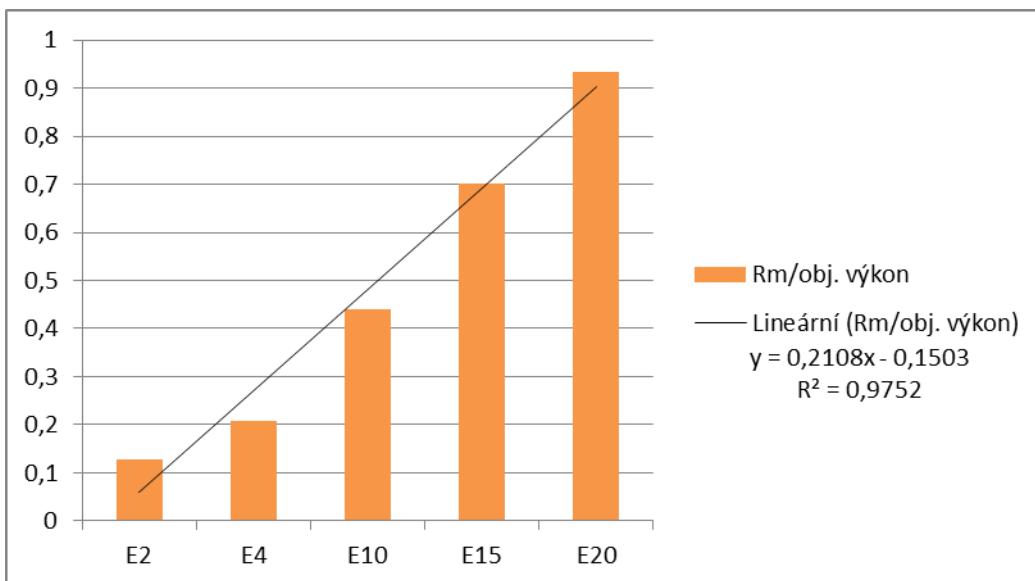
Obr. 59 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu B



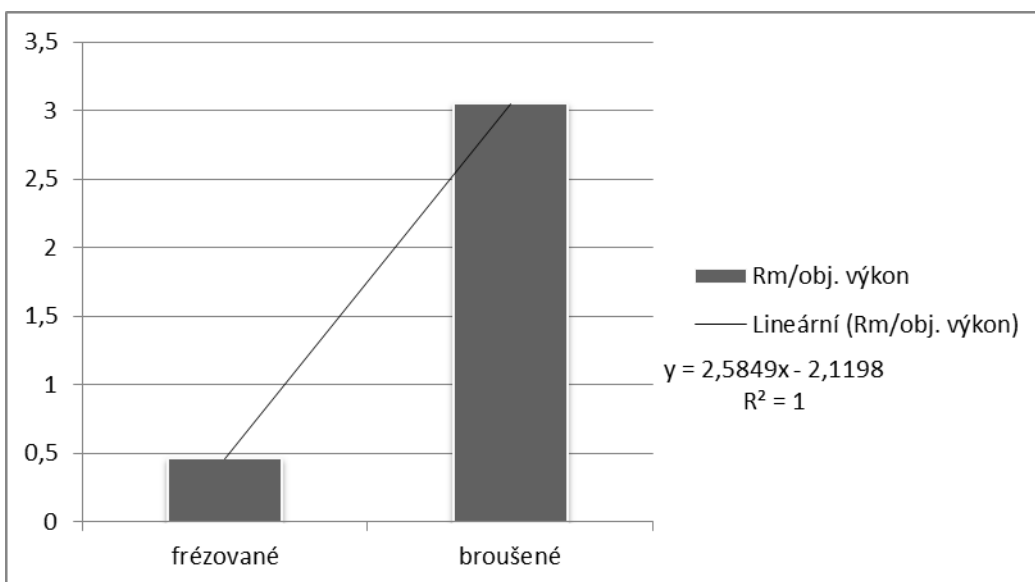
Obr. 60 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu C



Obr. 61 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu D



Obr. 62 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu E



Obr. 63 Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu

Z grafů na Obr. 53 až 58 je patrné, že s rostoucím výkonem dodaným při obrábění do materiálu roste jeho pevnost.

ZÁVĚR

V této diplomové práci je zkoumán vliv laserového paprsku na materiál PMMA. Ovlivnění materiálu z PMMA laserovým paprskem je porovnáváno s ovlivněním stejného materiálu technologiemi frézováním a broušením. Pro každou technologii byl stanoven výkon, který byl při obrábění dodán do materiálu a následně byly technologie vzájemně porovnávány s neovlivněným PMMA.

Vzájemné porovnání bylo provedeno pomocí trhací zkoušky, kterou jsem prováděl pomocí trhacího stroje ZWICK 1456 v laboratořích ÚVI. Software pro trhací zkoušku jsem použil TestXpert. Rychlost zkoušky byla nastavena na 10 mm/min a vzdálenost upínacích čelistí jsem měnil v závislosti na délce trhacích tyčinek. Z trhací zkoušky byla získána mez pevnosti, která byla hlavní veličinou pro vzájemné porovnávání jednotlivých technologií.

Z trhací zkoušky vyplynulo, že vliv výkonu na mez pevnosti je negativní. Čím je větší výkon, tím menší je vzájemný poměr meze pevnosti a výkonu. V podstatě můžeme říci, že s rostoucím výkonem PMMA degraduje. Průměrná hodnota poměru meze pevnosti a výkonu pro laserem ovlivněné plochy činí $0,093 \pm 0,023$ MPa/W.

Při zkoumání vlivu tloušťky na pevnost vyšla vzrůstající závislost. Zkoumány byly tyčinky o tloušťkách 10 mm, 15 mm a 20 mm z důvodu stejného výkonu laserového paprsku. Při stejném výkonu laserového paprsku můžeme vyloučit vliv laseru na mez pevnosti. Čím je větší tloušťka, tím větší je mez pevnosti. Průměr hodnot meze pevnosti v závislosti na tloušťce je $R = 34,451 \pm 4,724$ MPa. V této části je viditelný vliv vrubu na trhacích tyčinkách, kdy všechny trhací tyčinky o tloušťce 20 mm vykazují menší mez pevnosti než tyčinky o tloušťce 15 mm.

Při porovnání jednotlivých technologií je jasně patrné, že čím více výkonu dodáme do materiálu, tím více klesá mez pevnosti.

Velikostní součinitel byl porovnáván v závislosti jak tloušťky, tak délky. Při stejné tloušťce a jiné délce trhacích tyčinek je mez pevnosti nepatrně klesající, naopak při stejné délce a jiné tloušťce je mez pevnosti nepatrně vzrůstající. Průměr hodnot meze pevnosti $R_m = 36,882 \pm 5,131$ MPa. Velikostní součinitel nemá ve výsledku na mez pevnosti téměř žádný vliv.

Když zvážíme vliv technologických podmínek laserového obrábění na pevnost, situace se obrací ve prospěch laserového obrábění. V závislosti meze pevnosti na výkonu jsme neuvažovali,

kolik energie připadne na objemovou jednotku odebraného materiálu. Proto jsme v tomto bodě nejprve stanovili objem odebraného materiálu při obrábění. Poté jsme stanovili objemový výkon, aby bylo zahrnuto, kolik energie připadá na objemovou jednotku odebraného materiálu. Následně jsme už stanovili závislost meze pevnosti na tomto objemovém výkonu. Při tomto způsobu výpočtu se závislost meze pevnosti na výkonu prudce zvyšuje s rostoucím výkonem.

Můžeme tedy tvrdit, že s rostoucím výkonem dodaným do PMMA při obrábění se výrazně lepší jeho mechanické vlastnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresivné technológie. Košice : Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] LUKOVICS, Imrich , et al. Výzkum vlivu technologických podmínek při laserovém řezání kovových a polymerních materiálů. Zlín : VUT v Brně, 1991. 72 s.
- [3] HUGEL, Helmut. Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart : B. G. Teubner, 1992. 357 s.
- [4] LUKOVICS, Imrich; SÝKOROVÁ, Libuše Laser technology and possibility of its applications. In MTeM 2005. [s.l.] : [s.n.], 2005. s. 4. ISBN 9973-9087-83-3.
- [5] VÁVRA, Josef. Vliv změny technologických parametrů na kvalitu. [s.l.], 2007. 97 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [6] SUKUP, Marek. Mikroobrábění polymerních materiálů na CO2 laseru- Mechanika Prostějov. Zlín, 2006. 85 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [7] BRIMUS, Jan. Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály. Zlín, 2007. 197 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [8] HORÁČEK, Lukáš. VYUŽITÍ NEKONVENČNÍCH PAPERKOVÝCH TECHNOLOGIÍ (LASER/VODNÍ PAPERSEK) VE STROJÍRENSTVÍ. Brno, 2008. 68 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] PETERKA, Pavel. Wwww.ufe.cz [online]. 2006-04-04 [cit. 2010-12-26]. Vláknové lasery. Dostupné WWW:<<http://www.ufe.cz/~peterka/novehrady/vlaknovelasery.pdf>>.
- [10] CHUDÍK, Ivan. Možnosti zvýšení výkonu laserového dělení materiálů. MM : Průmyslové spektrum [online]. 2010-09-01, 2010, 9, [cit. 2010-11-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moznosti-zvyseni-vykonu-laseroveho-deleni-materialu>>.
- [11] ROUBÍČEK, Martin. www.airliquide.cz [online]. c2007 [cit. 2010-12-24]. KRITÉRIA VOLBY METODY A TRENDY TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ. Dostupné z WWW: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>>.
- [12] Svařování a tepelné dělení- AIR PRODUCTS [online]. 2011 [cit. 2011-01-20]. Dostupné z WWW: <http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/lasery_asistencniPlyny.htm>.

- [13] DUNOVSKÝ, Jiří; KOLAŘÍK, Ladislav. Fsid.cvut.cz [online]. 2008 [cit. 2010-12-13]. Laserové technologie. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz>>.
- [14] BRUCHANOV, Martin. Bruxy.regnet.cz [online]. 14.4.2003 [cit. 2011-03-30]. Pevnost v tahu. Dostupné z WWW: <http://bruxy.regnet.cz/fel/12MT/pevnost_v_tahu.pdf>.
- [15] DĚDEK, Hynek. Vlastnosti lepených spojů - kovy. Zlín, 2009. 72 s. Bakalářská práce. UTB Zlín.
- [16] ZAJÍČEK, Ondřej. Vliv technologických parametrů na kvalitu řezné [online]. Zlín : UTB Zlín fakulta technologická, 2010. 66 s. Bakalářská práce. UTB Zlín. Dostupné z WWW: <http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/13246/zaj%c3%ad%c4%8dek_2010_bp.pdf?sequence=1>.
- [17] *LASER CUTTING-TRUMATIC 3000* [online]. 2010 [cit. 2011-05-05]. A&l Sheet metal. Dostupné z WWW: <http://www.aandlsheetmetal.com/trumatic_3000.html>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E1,E2	energetické hladiny.
TEM	módová struktura.
n	index lomu světla.
λ_m	vlnová délka laseru
λ	tepelná vodivost [W/m/K]
ρ	hustota materiálu [kg/m ³]
c_p	měrná tepelná kapacita [J/kg/K]
Q	množství tepla působící na povrch [J/s]
q_w	množství tepla přeneseného na povrch [%]
AD	plocha [mm ²]
f_a	příčný posuv [mm/ot]
ae	Odebraná tříška [mm]
vb	rychlost paprsku [m/s]
HAZ	tepelně ovlivněná zóna (heat affected zone)
EA	energie absorbovaná materiálem [J]
Hr	energie vzniklá chemickými reakcemi [J]
E _{sm}	energie potřebná k ohřátí na teplotu tavení [J]
ΔH_m	energie potřebná pro změnu na taveninu [J]
E _{l→v}	energie potřebná pro zahřátí taveniny na teplotu varu (vypařování) [J]
ΔH_v	energie potřebná pro vypaření veškeré taveniny [J]
E _c	tepelné ztráty kondukcí (vedením) [J]
E _{rad}	tepelné ztráty radiací (sáláním do okolí) [J]
D	průměr nástroje [mm]
n	otáčky nástroje [min ⁻¹]

v_f řezná rychlost

F_{max} maximální řezná síla [N]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Skokové změny hodnot energie [6]	12
Obr. 2 Přehled technologických laserů [6].....	13
Obr. 3 Elektromagnetické spektrum [8].....	14
Obr. 4 Módové struktury laseru [6]	15
Obr. 5 Ukázky módů TEM [4].....	15
Obr. 6 Ukázky módů TEM [4].....	16
Obr. 7 Módové struktury ve 3D [4]	16
Obr. 8 Konstrukce laseru [5].....	17
Obr. 9 Optická rozbíhavost laserového paprsku [8]	19
Obr. 10 Druhy provozního režimu [5]	19
Obr. 11 Rubínový laser [5]	22
Obr. 13 Schéma He-Ne laseru [5].....	24
Obr. 13 Konstrukce CO2 laseru [16]	25
Obr. 14 Polovodičové lasery –injekční a s heterostrukturou [6].....	26
Obr. 15 Odrazivost laserového paprsku od vybraných materiálů [3]	27
Obr. 16 Absorpce paprsku laserů pro různé materiály [3]	28
Obr. 17 Chování materiálu při dopadu laserového paprsku [8].....	30
Obr. 18 Účinek laserového paprsku při dopadu na obráběný materiál [5]	30
Obr. 19 HAZ pro PMMA [5]	32
Obr. 20 Vliv rychlosti řezání na hloubku řezu u polymerů [5].....	33
Obr. 21 Znázornění tepelně ovlivněných zón [8]	34
Obr. 22 Závislost hloubky řezu na rychlosti posuvu pro kovové materiály. [4].....	35
Obr. 23 Princip Bifocal [11]	37
Obr. 24 Trumatic 3000 [17]	38
Obr. 25 Dynamometr s tenzometrickými členy	39
Obr. 26 Frézka FHV – 50 PD	40
Obr. 27 Průběh řezné síly pro broušení kostky č. 0012	41
Obr. 28 Souhrn výkonů a řezných sil pro broušení kostek	43
Obr. 29 Trhací stroj ZWICK 1456 [15]	46
Obr. 30 Upínací čelisti trhacího stroje ZWICK 1456	47
Obr. 31 Délky zkušebních tyčinek	48

Obr. 32	Tloušťky zkušebních tyčinek	49
Obr. 33	Vliv výkonu na mez pevnosti	50
Obr. 34	Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 20 mm	51
Obr. 35	Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 25 mm	51
Obr. 36	Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 30 mm	52
Obr. 37	Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 50 mm	52
Obr. 38	Vliv výkonu na mez pevnosti pro délku tyčinek 70 mm	53
Obr. 39	Vliv tloušťky na mez pevnosti	54
Obr. 40	Vliv tloušťky na mez pevnosti pro délku tyčinek 35 mm	54
Obr. 41	Vliv tloušťky na mez pevnosti pro délku tyčinek 50 mm	55
Obr. 42	Vliv tloušťky na mez pevnosti pro délku tyčinek 70 mm	55
Obr. 43	Porovnání jednotlivých technologií	56
Obr. 44	Vliv délky na R_m při stejné tloušťce	57
Obr. 45	Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 2 mm	58
Obr. 46	Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 4 mm	58
Obr. 47	Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 10 mm	59
Obr. 48	Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 15 mm	59
Obr. 49	Vliv délky na R_m při stejné tloušťce 20 mm	60
Obr. 50	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce	60
Obr. 51	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 20 mm	61
Obr. 52	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 25 mm	61
Obr. 53	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 35 mm	62
Obr. 54	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 50 mm	62
Obr. 55	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 70 mm	63
Obr. 56	Vliv tloušťky na R_m při stejné délce 20 mm	63
Obr. 57	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu	64
Obr. 58	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu A	65
Obr. 59	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu B	65
Obr. 60	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu C	66
Obr. 61	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu D	66
Obr. 62	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu E	67
Obr. 63	Závislost meze pevnosti na objemovém výkonu	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hustoty výkonu energetických zdrojů	17
Tab. 2 DIN 8580	20
Tab. 3 Přehled laserů [1].....	21
Tab. 4 Údaje o HAZ.....	30
Tab. 5 Přehled asistenčních plynů.....	36
Tab. 6 Řezné podmínky při broušení	41
Tab. 7 Přehled naměřených hodnot pro broušení kostek	42
Tab. 8 Naměřené hodnoty pro broušení tyčinek	43
Tab. 9 Naměřené hodnoty pro frézování tyčinek	44
Tab. 10 Označení délek tyčinek	48
Tab. 11 Použitý výkon při řezání laserem.....	48
Tab. 12 Vliv výkonu na mez pevnosti	49
Tab. 14 Vliv tloušťky na mez pevnosti	53
Tab. 15 Porovnání jednotlivých technologií	56
Tab. 16 Součinitel velikosti	57

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Souhrn naměřených hodnot

Příloha P II: Rm/Objemový výkon

PŘÍLOHA P I: SOUHRN NAMĚŘENÝCH HODNOT

		a_0 [mm]	b_0 [mm]	Rm [MPa]	RB [MPa]	E [MPa]	Nominal strain-Rm [mm]	ϵ Rm [%]	ϵ Break [%]	ϵ Fmax. [mm]	ϵ Break [mm]	Rm [N]
1												
2												
3	A2	1,865	2,207	42,55	42,55	917,6	1,07	5,36	5,36	1,08	1,08	175
4	A4	3,984	2,205	33,72	33,72	448,49	1,39	6,94	6,94	1,38	1,38	297
5	A10	10,19	2,2	36,08	36,08	246,72	2,16	10,81	10,81	2,16	2,16	809
6	20 mm	14,96	2,178	28,4	28,36	126,52	2,27	11,34	11,34	2,26	2,27	936
7	A20	19,92	2,152	34,73	34,56	115,36	2,56	12,79	12,79	2,56	2,56	1491
8	B2	1,944	2,85	42,06	41,97	1072,94	1,39	4,21	4,21	1,4	1,4	257
9	B4	4,031	2,913	40,6	40,6	555,43	1,95	5,92	5,92	1,95	1,95	476
10	B10	10,26	2,87	37,42	37,35	251,8	2,61	10,44	10,44	2,61	2,61	1105
11	25 mm	15,04	2,852	35,04	35,04	144	3,07	12,27	12,27	3,07	3,07	1495
12	B20	19,91	2,817	34,34	34,09	116,56	3,13	12,53	12,55	3,13	3,13	1927
13	C2	1,884	4,54	49,24	48,98	3517,66	1,67	1,5	1,51	0,15	0,15	422
14	C4	3,94	4,521	43,76	43,6	3492,02	1,98	1,37	1,37	0,14	0,14	779
15	C10	10,39	4,526	27,85	27,85	4374,49	3,15	0,67	0,67	0,07	0,07	1310
16	35 mm	14,81	4,507	32,67	32,67	3478,74	3,89	0,73	0,73	0,11	0,11	2180
17	C20	19,83	4,496	26,42	26,42	136,19	3,89	7,07	7,07	3,89	3,89	2352
18	D2	1,873	6,162	35,54	35,29	1140,99	1,83	2,62	2,62	1,86	1,86	410
19	D4	3,944	6,179	42,14	42,14	945,08	2,29	3,28	3,28	2,31	2,31	1029
20	D10	10,52	6,184	31,98	31,92	344,67	2,98	4,93	4,95	2,99	2,99	2084
21	50 mm	14,79	6,153	39,37	39,2	212,91	4,32	7,2	7,2	4,32	4,32	3587
22	D20	19,7	6,161	36,34	36,31	174,81	4,26	7,11	7,11	4,26	4,26	4411
23	E2	1,906	9,45	38,91	38,75	1028,59	2,81	2,56	2,56	2,85	2,85	663
24	E4	3,939	9,531	37,47	37,18	833,08	2,86	2,6	2,6	2,89	2,89	1406
25	E10	10,07	9,494	36,3	36,22	615,03	3,38	4,22	4,23	3,38	3,39	3470
26	70 mm	14,76	9,458	39,62	39,43	401,68	4	5	5,01	4	4,01	5527
27	E20	19,71	9,468	39,51	39,51	304,86	4,38	5,47	5,47	4,38	4,38	7375
28	frézované	3,05	4,53	76,4	76,4	3418,645	3,31	3,35	3,35	0,67	0,67	1055
29	broušené	3,05	4,496	48,03	48,03	3421,04	1,96	1,56	1,56	0,31	0,31	652
30	neovlivně	3,05	5,186	78,38	76,91	3416,25	4,46	5,49	7,35	1,1	1,47	1241

PŘÍLOHA P II: RM/OBJEMOVÝ VÝKON

	a0	b0	Rm	RB	E	Nominal ϵ Rm	ϵ Break	ϵ Fmax.	ϵ Break	Rm	výkon	V	obj. výkon	Rm/obj. výkon
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[N]	[W]	[mm ³]	[W/mm ³]	
7														
8														
9	A2	1,865	2,207	42,55	917,6	1,07	5,36	1,08	5,36	175,35	350	1,119	312,77927	0,136038429
10	A4	3,984	2,205	33,72	448,49	1,39	6,94	1,38	6,94	297,32	425	2,3904	177,79451	0,189657148
11	20 mm	10,19	2,2	36,08	246,72	2,16	10,81	2,16	10,81	808,99	500	6,114	81,779522	0,441186624
12	A15	14,96	2,178	28,4	126,52	2,27	11,34	2,26	11,34	935,91	500	8,976	55,7041	0,5098368
13	A20	19,92	2,152	34,73	115,36	2,56	12,79	2,56	12,79	1491,03	500	11,952	41,834003	0,83018592
14	B2	1,944	2,85	42,06	1072,94	1,39	4,21	1,4	4,21	257,29	350	1,1664	300,06859	0,140167954
15	B4	4,031	2,913	40,6	555,43	1,95	5,92	1,95	5,92	475,55	425	2,4186	175,72149	0,231047435
16	25 mm	10,26	2,87	37,42	251,8	2,61	10,44	2,61	10,44	1104,68	500	6,156	81,221572	0,46071504
17	B15	15,04	2,852	35,04	144	3,07	12,27	3,07	12,27	1495,36	500	9,024	55,407801	0,63240192
18	B20	19,91	2,817	34,34	116,56	3,13	12,53	3,13	12,53	1927,35	500	11,946	41,855014	0,82045128
19	C2	1,884	4,54	49,24	3517,66	1,67	1,5	0,15	1,51	421,6	350	1,1304	309,62491	0,159031131
20	C4	3,94	4,521	43,76	3492,02	1,98	1,37	0,14	1,37	779,24	425	2,364	179,78003	0,243408565
21	35 mm	10,39	4,526	27,85	4374,49	3,15	0,67	0,07	0,67	1309,98	500	6,234	80,205326	0,3472338
22	C15	14,81	4,507	32,67	3478,74	3,89	0,73	0,11	0,73	2180,35	500	8,886	56,268287	0,58061124
23	C20	19,83	4,496	26,42	136,19	3,89	7,07	3,89	7,07	2351,51	500	11,898	42,02387	0,62869032
24	D2	1,873	6,162	35,54	1140,99	1,83	2,62	1,86	2,62	409,89	350	1,1238	311,44332	0,114113863
25	D4	3,944	6,179	42,14	945,08	2,29	3,28	2,31	3,28	1028,8	425	2,3664	179,5977	0,23463552
26	50 mm	10,52	6,184	31,92	344,67	2,98	4,93	2,99	4,95	2083,74	500	6,312	79,214195	0,40371552
27	D15	14,79	6,153	39,2	212,91	4,32	7,2	4,32	7,2	3587,06	500	8,874	56,344377	0,69873876
28	D20	19,7	6,161	36,34	174,81	4,26	7,11	4,26	7,11	4411,3	500	11,82	42,301184	0,8590776
29	E2	1,906	9,45	38,91	1028,59	2,81	2,56	2,85	2,56	662,68	350	1,1436	306,05107	0,127135646
30	E4	3,939	9,531	37,47	833,08	2,86	2,6	2,89	2,6	1406,49	425	2,3634	179,82567	0,208368466
31	70 mm	10,07	9,494	36,3	615,03	3,38	4,23	3,38	4,23	3469,96	500	6,042	82,754055	0,4386492
32	E15	14,76	9,458	39,62	401,68	4	5	4	5	5527,08	500	8,856	56,458898	0,70174944
33	E20	19,71	9,468	39,51	304,86	4,38	5,47	4,38	5,47	7374,62	500	11,826	42,279723	0,93449052
34	frézované	3,05	4,53	76,4	3418,65	3,31	3,35	0,67	3,35	1055,34	66,06	1,525	43,318033	1,763699667
35	broušené	3,05	4,496	48,03	3421,04	1,96	1,56	0,31	1,56	652,46	1375	0,1525	9016,3934	0,005326964
36	neovlivně	3,05	5,186	78,38	3416,25	4,46	5,49	1,1	7,35	1240,59	1	1	1	78,38