

Vliv vysokoenergetického paprsku na vlastnosti polymerů

Bc. Tomáš Horák

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Horák**
Osobní číslo: **T14530**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv vysokoenergetického paprsku na vlastnosti polymerů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Vytvořte vzorky z různých materiálů na laserovém zařízení pro experiment
3. Provedte experiment
4. Provedte vyhodnocení experimentu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Knedlová

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

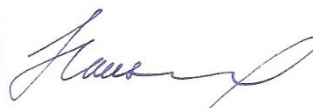
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno:

Obor:

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

.....

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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato diplomová práce porovnává vliv laserového a vodního paprsku na vlastnosti polymerů. Je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické.

Teoretická část popisuje polymery, jejich strukturu, vlastnosti a rozdělení. Je zde popsána jakost povrchu a základní parametry drsnosti povrchu. Podrobněji je popsán laser a vodní paprsek, jejich princip, rozdělení a použití.

Praktická část se zabývá vlivem vysokoenergetického paprsku na vlastnosti vybraných polymerů. Porovnává se šířka řezu, rozměry vyrobených vzorků, tvrdost a drsnost.

Klíčová slova: vodní paprsek, laser, polymery, drsnost, tvrdost, vlastnosti polymerů, řezání

ABSTRACT

This diploma thesis compares the influence of a laser and a water jet on polymer properties. It is divided into two parts, theoretical and practical.

The theoretical part describes polymers, their structure, properties and categorises them. It studies the surface quality and other parameters of the surface roughness. This part also deals with the laser and the water jet, principles of their function, categorisation and use.

The practical part examines effects of a high energy beam on the properties of selected polymers. It compares widths of the cuts, dimensions of produced samples and their hardness and roughness.

Keywords: water jet, laser, polymers, roughness, hardness, polymer properties, cutting

Chtěl bych poděkovat mé vedoucí diplomové práce Ing. Janě Knedlové za odborné vedení, poskytnuté rady a pomoc při řešení diplomové práce. Poděkování patří také firmě MRB Sazovice s.r.o. za výrobu vzorků a Ing. Mileně Kubišové a Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za pomoc v experimentální části. Děkuji doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za pomoc s vyhodnocením naměřených dat.

Dále chci poděkovat rodičům a své přítelkyni za podporu ve studiu.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERY	11
1.1 STRUKTURA POLYMERU	11
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	11
2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	17
3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY POLYMERŮ	18
3.1 MĚŘENÍ TVRDOSTI POLYMERŮ	19
3.1.1 Zkouška tvrdosti vtiskem kuličky podle Brinella	19
3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	20
3.1.3 Zkouška tvrdosti metodou Shore	20
3.1.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	22
3.1.5 Zkouška tvrdosti podle Knoopu	22
3.1.6 Mikrotvrdost.....	23
4 JAKOST POVRCHU	24
4.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU	25
5 LASER	27
5.1 PRINCIP LASERU	27
5.2 ZÁKLADNÍ DRUHY LASERŮ	29
5.2.1 Pevnolátkové lasery	30
5.2.2 Kapalinové lasery	31
5.2.3 Plynové lasery	31
5.2.4 Polovodičové lasery	32
5.3 APLIKACE LASERŮ.....	32
5.3.1 Aplikace laserů v průmyslu.....	33
5.3.1.1 Řezání laserem.....	33
5.3.1.2 Laserové svařování kovů	35
5.3.1.3 Laserové gravírování a značení	36
5.3.1.4 Laserové vrtání	36
5.3.1.5 Laserové kalení	37
6 VODNÍ PAPERSEK	38
6.1 PRINCIP ŘEZÁNÍ MATERIÁLU	38
6.2 ZAŘÍZENÍ PRO DĚLENÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPERSEKEM.....	40
6.3 APLIKACE VODNÍHO PAPERSEKU	42
7 CÍLE PRÁCE	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	46
8 CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH POLYMERŮ	47
8.1 POLYPROPYLEN (PP).....	47
8.2 POLYMETHYLMETHAKRYLÁT (PMMA)	47
8.3 AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN (ABS)	48
8.4 POLYCARBONATE-AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN (PC-ABS)	49
9 VÝROBA VZORKŮ	50

10	MĚŘENÍ ŠÍŘKY ŘEZU	55
10.1	PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ ŠÍŘKY ŘEZU	55
10.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	57
11	MĚŘENÍ ROZMĚRŮ VZORKŮ	67
11.1	PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ ROZMĚRŮ	67
11.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	68
12	MĚŘENÍ TVRDOSTI	78
12.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	79
13	MĚŘENÍ DRSNOSTI	83
13.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	84
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK	96
	SEZNAM PŘÍLOH	97

ÚVOD

Polymery se v dnešní době řadí mezi nezastupitelnou součást každodenního života. Jejich neustálý vývoj vede v mnoha oborech k velkému rozvoji. Tyto materiály se vyznačují širokou použitelností jak v technických tak netechnických oblastech. Obecně lze o nich hovořit jako o plastech. Dnešní svět si bez plastů už ani nedokážeme představit a většina spotřebního zboží, které člověk využívá ve svém každodenním životě, se právě z těchto významných materiálů vyrábí.

V současné době má řada plastů velmi výhodné vlastnosti a lze je snadno zpracovávat. Jsou často velmi odolné vůči nejrůznějším vlivům. Vyznačují se dobrou chemickou a mechanickou odolností či odolností vůči stárnutí. Možnými způsoby, jak tyto plasty opracovávat, konkrétně je řezat, jsou laserové technologie a řezání vodním paprskem.

Laserové technologie a samotný objev laseru se řadí ke zcela důležitým událostem v minulém století. Tato technologie se odráží v mnoha oborech lidské činnosti a v dnešní době dochází stále k jeho prudkému rozvoji. Své uplatnění nachází například v oborech, jakými jsou věda, medicína, průmysl, biologie, chemie či energetika a v mnoha dalších. Mezi aplikací laseru, kterou se zabývá tato diplomová práce, se řadí i laserové obrábění.

Obrábění lze u materiálů řešit i aplikací vodního paprsku. Vodní paprsek v tomto případě využívá své abrazivní účinky k samotnému obrábění. Jeho historie se řadí též do minulého století a poprvé byl použit v roce 1970.

Tato práce se zabývá porovnáním dvou druhů technologií obrábění a to pomocí laseru a vodního paprsku. Jsou zde porovnávány vybrané druhy materiálů při obrábění pomocí obou zmíněných technologií.

I. TEORETICKÁ ČÁST

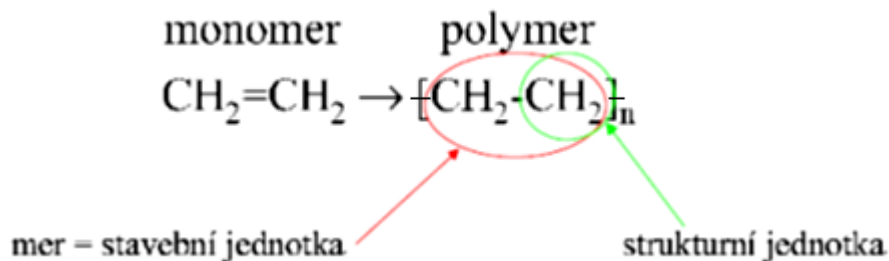
1 POLYMERY

Období rozvoje lidstva je zvykem označovat podle materiálu, který je pro tu danou dobu charakteristický. Mluvíme tedy o době kamenné, bronzové, železné a dnešní doba se může z tohoto hlediska označovat jako doba polymerní. [1]

Polymery patří k jedněm z nejmladších skupin konstrukčních materiálů. Jsou to chemické látky, které mají velmi různé vlastnosti a jejich velké molekuly obsahují většinou atomy uhlíku, kyslíku i dusíku, vodíku, chloru a jiných prvků. Polymerní výrobky jsou v tuhém stavu, ale při zpracování za vysoké teploty a tlaku, jsou kapalné, aby mohly zaujmout budoucí tvar výrobku. Vlastnosti lze upravit různými modifikacemi a příměsí. Obecně jsou plasty lehké, mají tepelné i elektrické izolační vlastnosti a nekorodují. [1, 2, 3]

1.1 Struktura polymeru

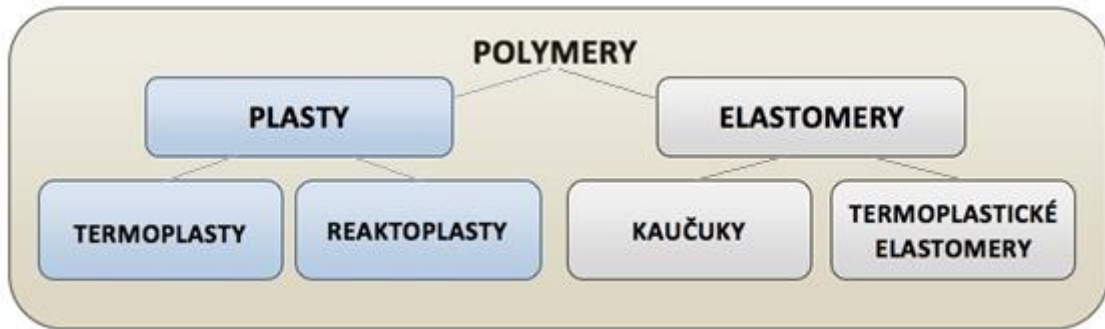
Polymer je makromolekulární látka, kterou tvoří řetězce makromolekul. Ty vznikají spojením stavební jednotky primárními kovalentními vazbami, a obsahují velké množství atomů. Základní stavební částí jsou nízkomolekulární látky, tzv. mery, které se v řetězci stále opakují. Základní část řetězce tvoří atom uhlíku, který je schopný se vzájemně vázat a vytvářet tak dlouhé řetězce. [3, 4, 5]



Obr. 1 Struktura polymeru [5]

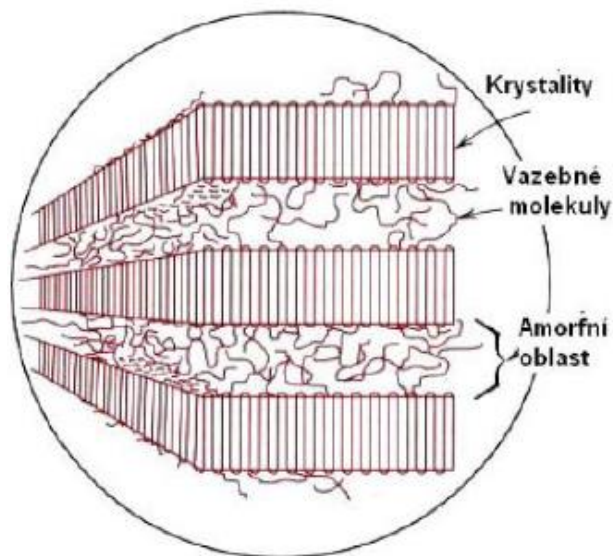
1.2 Rozdělení polymerů

Nejtradičnější členění polymerů je do dvou základních skupin. První skupinou jsou plasty a druhou skupinu tvoří elastomery. [1]



Obr. 2 Rozdělení polymerů

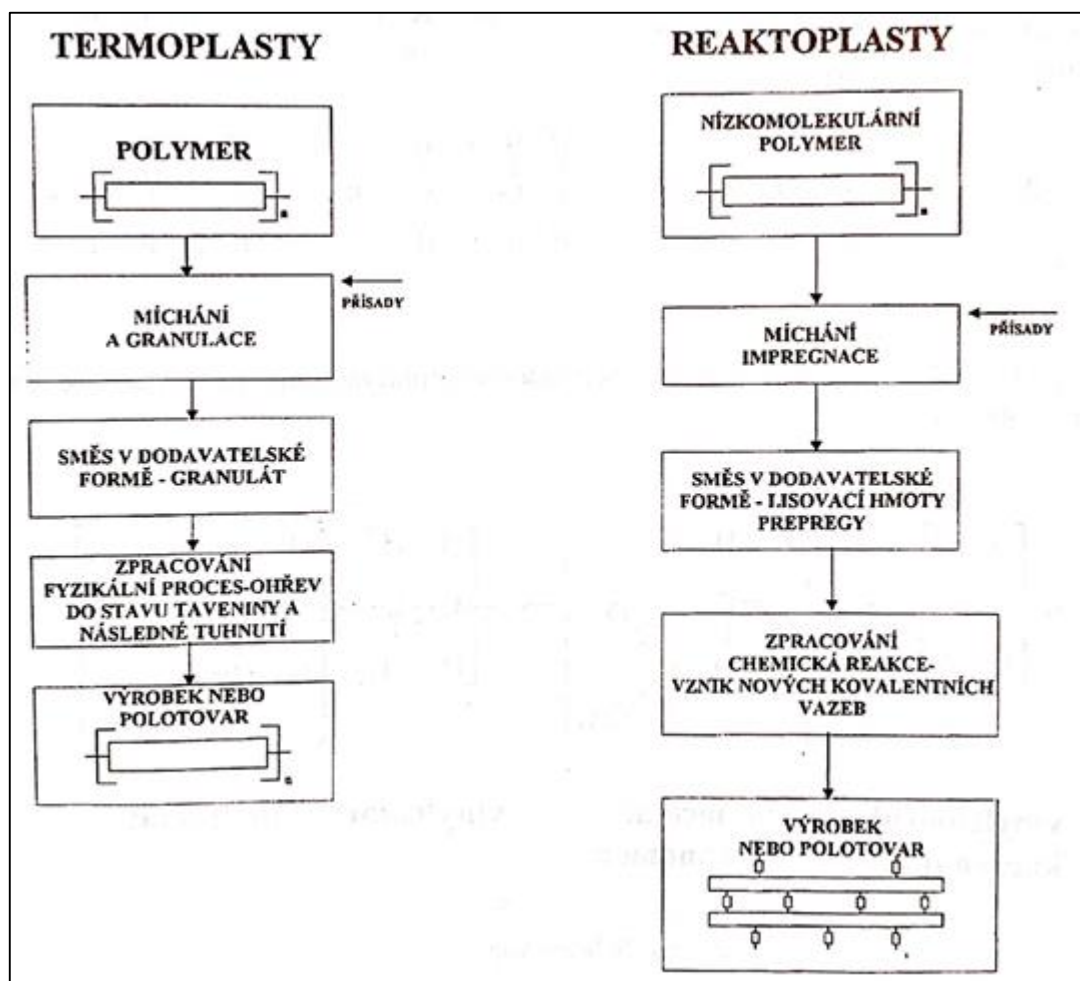
Plasty jsou polymery, které jsou při normálních podmínkách ve většině případů tvrdé, ale často i křehké. Se zvyšující se teplotou se stávají tvarovatelnými a plastickými (proto název plasty). Plasty se tradičně dělí na termoplasty a reaktoplasty. Termoplast je možné při opětovném ohřevu opakovaně převádět do stavu taveniny nebo viskózního toku. Ochlazením pod teplotu tání, která charakterizuje semikrystalické polymery, nebo pod teplotu tečení, která charakterizuje krystalické polymery, je možné nechat termoplasty ztuhnout při teplotách, které charakterizují daný typ termoplastu. Díky této schopnosti jsou termoplasty recyklovatelné, protože nedochází ke změně struktury. [1, 6, 7]



Obr. 3 Semikrystalický polymer

Amorfní polymery jsou průhledné, protože nemají krystaly a obsahují neuspořádané molekulární řetězce. Amorfní polymery při zahřívání od dostatečně nízké teploty prochází přes oblast sklovitou, kaučukovitou až k tečení. Semikrystalické polymery naopak obsahují uspořádané molekulární řetězce a každý z nich tak má určitou polohu v krystalické mřížce. Semikrystalický polymer při zahřívání od dostatečně nízké teploty prochází krystalickou fází až k tání. Submolekulární i molekulární struktura polymerů je na konci zpracovatelského procesu, teda v konečném plastovém výrobku stejná, jako u výchozího polymeru. [6, 7]

Na rozdíl od termoplastů v reaktoplastech probíhá při zpracovatelském procesu chemická reakce, a vlivem tepla, zářením nebo síťovacích činidel vznikají husté, prostorově zesíťované struktury, v nichž jsou původní molekuly vázány prostorovými vazbami. Tomuto procesu se říká vytvrzování, u kaučuků je to vulkanizace. Vytvrzený reaktoplast je netavitelný a nerozpustný. Z tohoto důvodu je recyklace reaktoplastů obtížnější, než u termoplastů a musí se volit jiné postupy. [6]

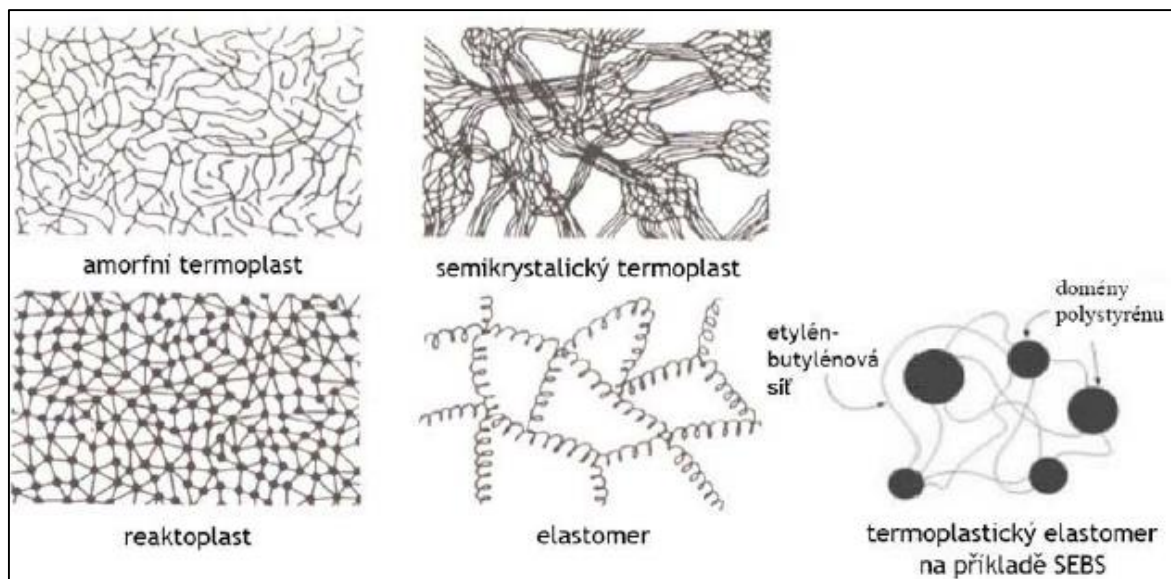


Obr. 4 Podstata a zpracování termoplastů a reaktoplastů [6]

Elastomery jsou vysoce elastické polymery, které se dají za běžných podmínek malou silou značně deformovat, aniž by se elastomer porušil, přičemž je deformace převážně vratná. Nejznámější a nejpočetnější podskupinu elastomerů tvoří kaučuky, z nichž se vulkanizací vyrábí pryž.

Vlastnosti polymerů ovlivňuje jejich fázový stav, molekulová hmotnost a chemické složení.

[8]



Obr. 5 Struktura polymerů

Rozdělení podle konfigurace makromolekulárního řetězce

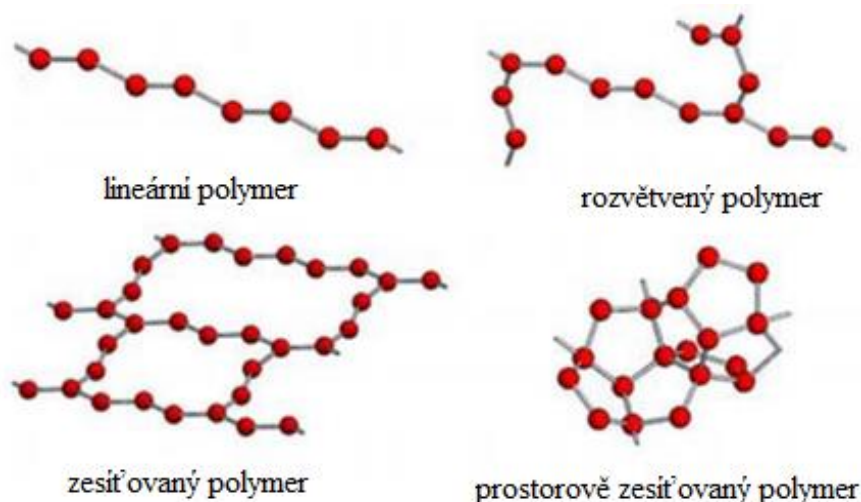
Podle druhu polymerních makromolekul mohou být řetězce prostorově zesíťované, zesíťované, rozvětvené a lineární.

Lineární řetězce vznikají z lineárních molekul. Lineární molekuly vzniknou, pokud mají dvě reakční místa v molekule, poté jsou schopné se chemicky vázat se sousedními molekulami. Řadí se tak jedna molekula vedle druhé a vzniká řetězec. Řetězce se k sobě mohou z prostorových důvodů přibližovat. Mezi jednotlivými pružnými řetězci slabě působí Van der Waalovy vazby. Tyto polymery mají dobrou pohyblivost makromolekul a tak i ve většině případů dobrou tavitelnost a rozpustnost. Většinu termoplastů lze pokládat za lineární. [6, 7, 8]

Rozvětvené řetězce mají na hlavním řetězci postranní větve, které brání přiblížení rozvětvených makromolekul, na rozdíl od lineárních. To má za následek nižší hustotu polymeru (LDPE). Postranní větve zhoršují pohyblivost makromolekul a s tím související i tekutost v roztaveném stavu. Boční řetězce zhoršují mechanické vlastnosti, protože oddalují sousední makromolekuly, čímž dochází k poklesu mezimolekulárních sil. [3, 7]

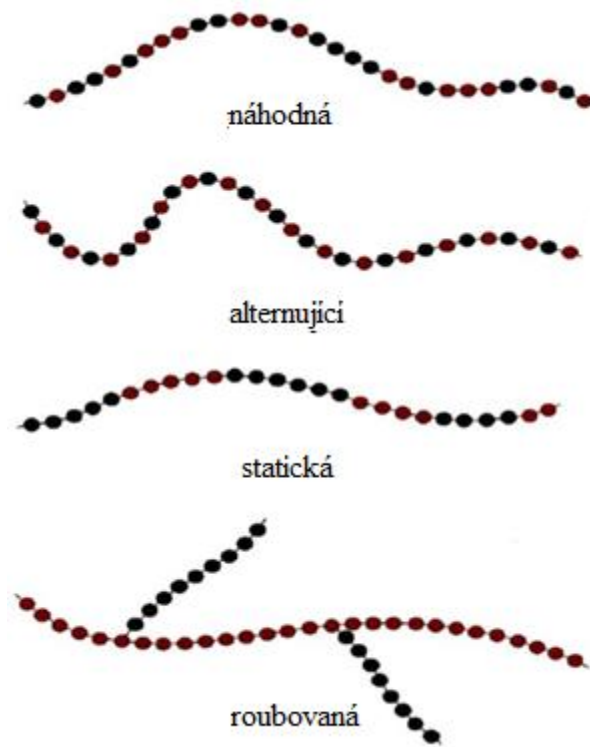
Zesíťovaný řetězec je tvořen několika přímými nebo rozvětvenými makromolekulárními řetězci, které jsou mezi sebou propojeny vazbami a vytváří tak téměř nekonečnou makromolekulu. Díky této síti je polymer nerozpustný a netavitelný, má velkou tuhost, tvrdost a je odolnější vůči zvýšeným teplotám, ale hůře odolává namáhání rázem. Elastické materiály mají řídkou síť a naopak hustou síť mají reaktoplasty.

Prostorově zesíťovaný řetězec je tvořen trojrozměrnými monomery se třemi aktivními kovalentními vazbami. Vzniká tak trojrozměrná síť. Polymery s těmito řetězci mají jedinečné vlastnosti a patří sem např. fenolformaldehydy a epoxidy. [3, 7]



Obr. 6 Tvar makromolekulárních řetězců [7]

Kopolymery jsou polymery, které vzniknou polymerací z více druhů monomerů. Struktura monomerů v řetězci může být náhodná, statická, alternující nebo roubovaná.



Obr. 7 Struktura kopolymeru [9]

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ

Mechanické vlastnosti vykazují polymery, na které působí vnější (mechanické) síly. Vlastnosti ovlivňuje fázový stav polymerů, čas, teplota, velikost a směr působení síly. Mechanické vlastnosti se zjišťují deformačními zkouškami, při kterých se sleduje vztah teploty, napětí, času a relativní deformace. [10]

Tuhost:

Tuhost je charakterizována silou, která musí být vynaložena, aby došlo k deformaci tělesa v pružné oblasti deformací. Mírou této síly je modul pružnosti ve smyku a v tahu.

Pevnost:

Pevnost je odolnost proti vnějším silám. Pevnost polymerů je dána jejich molekulární a nadmolekulární strukturou. Při tahové zkoušce záleží i na tom, jestli je polymer nad nebo pod teplotou skelného přechodu. Amorfnní polymery pod teplotou skelného přechodu se přetrhnou ihned za pružnou deformací. U semikrystalických polymerů může dojít po překonání meze kluzu ke zpevnění, což způsobí, že mez pevnosti může být větší než napětí na mezi kluzu. V praxi se využívá pouze oblast pružné deformace, takže jsou důležité hodnoty na mezi kluzu. [11]

Tvrlost:

Tvrlost je odpor materiálu vůči vnikání tvrdšího tělesa. Tvrlost je závislá na kvalitě povrchu a vnitřních vlastnostech polymeru (hustota sítě, přísady). Reaktoplasty mají tvrdost nejvyšší, naopak kaučuky mají nejnižší.

Houževnatost:

Houževnatost je charakterizována množstvím práce, které je nutné dodat, aby vznikl nový povrch. Velká houževnatost znamená menší pevnost v tahu, ale dobrou absorpci rázů. Houževnatost se zjišťuje při mechanických zkouškách, jako je vrubová houževnatost a rázová houževnatost. [11, 12]

3 MECHANICKÉ ZKOUŠKY POLYMERŮ

Zkoušení mechanických vlastností materiálů můžeme rozdělit do skupin, podle druhu namáhání, na:

Statické zkoušky

Při statických zkouškách se působící síla rovnoměrně pomalu zvětšuje do té doby, než dojde k porušení nebo úplnému zničení zkušebního tělíska. Tyto zkoušky tvoří základ mechanického zkoušení a podle směru působení síly můžeme zkoušet pevnost v tahu, tlaku, ohybu, stříhu nebo krutu.

Mezi dlouhodobé statické zkoušky patří **zkouška creepem**. Tato zkouška se nazývá i jako zkouška tečením. Materiál je zatížen v počátečním čase konstantní silou a vznikne tak jeho deformace, která odpovídá maximu deformačního napětí. Toto napětí poté pomalu klesá a je sledováno chování vzorku, který se vlivem napětí neustále prodlužuje. Deformace vzorku je závislá na čase a na zatížení. Tato zkouška v závislosti na materiálu bývá zdlouhavá, provádí se i několik měsíců.

Dynamické zkoušky

Při dynamických zkouškách může síla působit nárazově (pouze v jednom okamžiku a pak ustane), nebo cyklicky měnit velikost a směr působení během krátkého časového intervalu. Zkouška se někdy provádí i při dlouhodobém zatížení silou, jejíž velikost se ve velmi krátké době periodicky mění.

Únavové zkoušky

Zkoušení probíhá dlouhodobě, v řádech hodin nebo i dní, za předepsaných podmínek opakovaného zatížení. Zkouška probíhá, dokud se zkušební vzorek neporuší únavovým lomem. Provedení zkoušky se liší podle druhu a použití materiálu. [10, 11, 13]

Měření tvrdosti polymerů

Tvrдость je charakterizována jako odpor materiálu proti vniknutí jiného, tvrdšího tělesa. Princip zkoušky je založen na vtlačení zkušebního tělíska s hrotem různého tvaru definovaným zatížením do zkoušeného materiálu. Měří se hloubka vniknutí tělíska do materiálu nebo plocha vtisku. [15, 17]

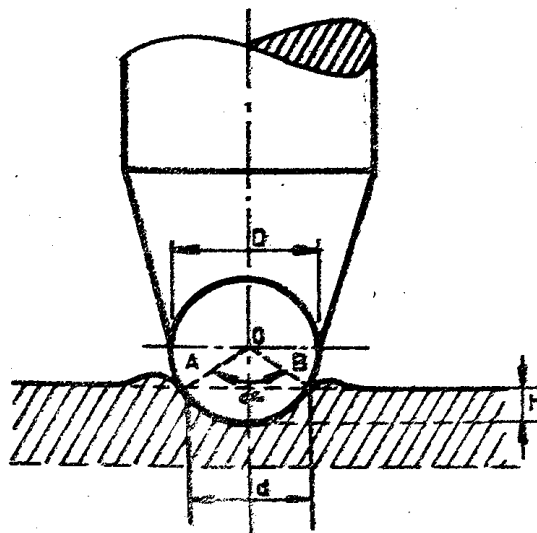
3.1 Měření tvrdosti polymerů

Polymerní materiály jsou houževnaté až pružné, což vede k větší nebo menší deformaci povrchu. Vlivem viskoelastického chování polymerů se obtížně měří stopa vtisku, proto se měří rovnovážná hloubka vniknutí tělesa při konstantní síle vtlačování. [15]

Existuje mnoho různých druhů měření tvrdosti. Odlišnosti v těchto metodách jsou zejména ve tvaru zkušebního tělíska, ale i na použitém tvaru či rozměrech vzorku. Zkouška tvrdosti se dělí podle tvaru zkušebního tělesa, které může být kulička, kužel, komolý kužel, jehlan. Účel a použití jednotlivých měřících metod je obsažen v jednotlivých předpisech norem. [15, 17]

3.1.1 Zkouška tvrdosti vtiskem kuličky podle Brinella

Zkouška tvrdosti vtiskem ocelové kuličky patří k nejpoužívanějším metodám měření tvrdosti plastů. Dříve byla tato metoda používána pro měření tvrdosti kovů, ale pro zkoušení polymerů byla modifikována, kdy došlo ke zvětšení průměru kuličky a zmenšení síly vtlačování. Touto metodou se vtlačuje kulička o průměru D do zkoušeného materiálu silou F a při zatížení se odečítá hloubka důlku h . Do celkové hloubky se zahrnuje i pružná deformace zkušebního tělesa. Tato deformace závisí na druhu plastu, teplotě, vlhkosti a zvětšuje se s rostoucí tloušťkou zkušebního tělesa. [16, 17]



Obr. 8 Měření tvrdosti podle Brinella [15]

Tvrдость polymerů podle Brinella a podmínky měření udává norma ČSN EN ISO 2039-1. V této normě jsou určeny i průměry kuliček a to 3 mm, 5 mm a 10 mm. Kuličky o průměru 3 mm se používají pro lamináty, průměr 5 mm se používá pro většinu plastických hmot a průměr 10 mm se používá pro měkkčené PVC.

V ideálním případě se hloubka h pohybuje v rozmezí $0,02D - 0,2D$. Pokud je hloubka menší než $0,02D$ je nutno zvýšit zatížení a naopak. Přesnost měření je závislá na přesnosti odečtení hloubky důlku. Chyba měření roste s menší hloubkou důlku. Výsledek zkoušky se zapisuje např. jako 70 HB 5/51/10, což znamená, že tvrdost podle Brinella je 70 MPa a při zkoušce byla použita kulička o průměru 5 mm, která byla zatěžována silou 51 N a hloubka vtisku byla odečtena po 10 sekundách. [16]

3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

U zkoušky podle Rockwella se tvrdost nestanovuje podle plochy vtisku, ale odečítá se hloubka vniku. Princip je tedy stejný jako u zkoušky podle Brinella, kde se vtlačuje tělísko do zkoumaného materiálu. Rozdíl je v použitém zkušebním tělísku. Pro tvrdé materiály se používá kužel, který může být z diamantu a vrchový úhel má 120° . Pro měkké materiály se používá kulička o průměru 1,59 mm. V České republice se tato metoda používá pro polymery jen zřídka, častěji se používá u kovů. [16]

3.1.3 Zkouška tvrdosti metodou Shore

Přístrojů na měření tvrdosti Shore je mnoho a liší se rozsahy. Nejpoužívanější typ přístroje je Shore A a D. Metoda Shore patří k dynamickým zkouškám. Zkouška je založena na vtlačování hrotu různého tvaru pomocí pružin do zkoušeného tělesa. Princip této zkoušky spočívá v měření hloubky vtačeného hrotu. Tvrдость není závislá jen na vniku hrotu do vzorku, ale taky na viskoelastickém stavu a modulu pružnosti zkoušeného vzorku. Podle typu hrotu se zkouška vyjadřuje v jednotkách Shore A nebo Shore D. [15, 16]



Obr. 9 Tvrdoměr Shore

Tato metoda vyniká jednoduchou obsluhou přístroje, přímým zobrazením tvrdosti a možností měření přímo na výrobcích i mimo laboratoř tak, že je jednoduše přístroj přiložen k měřenému výrobku.

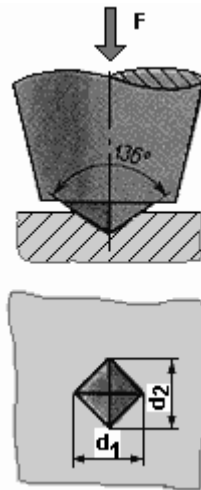
Tvrdot Shore se měří tak, že tvrdoměr je přiložen na zkušební těleso tak, aby patka byla dosedlá po celé ploše. Zkušební těleso se položí na opěrnou podložku, poté se přítlačnou silou přitlačí měřicí hlava a po uplynutí stanoveného času se odečte údaj o tvrdosti, který je odečten ze stupnice tvrdoměru. Tvrdot Shore D se měří obdobně a měří se v případě, když je překročena hodnota tvrdosti 90 Shore A.

Zkušební těleso musí být rovné, hladké a bez viditelných defektů. Minimální tloušťka zkušební vzorku je 6 mm, měří se nejméně 12 mm od kraje a při více měření se měří minimálně 5 mm od sebe. Tělíska je možné skládat na sebe, aby bylo dosaženo požadované tloušťky. Tvrdot je dána hloubkou vtisku. Přesné podmínky určuje norma ČSN EN ISO 868. [16, 17].

3.1.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška podle Vickerse je obdobná jako zkouška podle Brinella. U Vickerse je do zkoušeného materiálu vtlačován pravidelný čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Do zkoušeného materiálu je jehlan vtlačován zkušebním zatížením F , které se pohybuje v rozmezí hodnot 10 – 1000 N. Doba zatížení je 10 – 15 s. Po odlehčení se zjišťuje úhlopříčka vtisku d , která je dána aritmetickým průměrem délek obou úhlopříček po odlehčení. Vickersova tvrdost je určena jako poměr mezi zkušebním zatížením k ploše vtisku.

Příklad označení: 530 HV 1/15 znamená, že tvrdost podle Vickerse je 530 při zkušebním zatížení 1 kg po dobu 15 s.



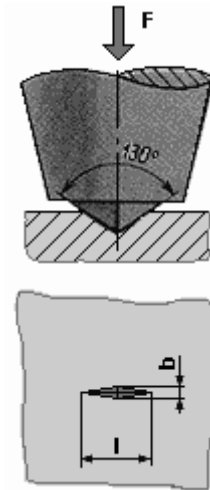
Obr. 10 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse

3.1.5 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Při zkoušce tvrdosti podle Knoop je do zkoušeného materiálu vtlačován silou F čtyřboký diamantový jehlan, který má poměr úhlopříček 7:1, úhly 130° a $172,5^\circ$. Jehlan tedy nemá čtvercovou základnu, ale protáhlý kosočtverec.

Po provedení vtisku se měří pouze delší úhlopříčka l . U kratší úhlopříčky b vzniká největší deformace a po odlehčení je zde největší odpružení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení nejmenší.

Metoda Knoop se využívá k měření mikrotvrdosti. Je tedy vhodná pro měření tenkých plastových a kovových desek, křehkých materiálů a drátů.



Obr. 11 Princip zkoušky tvrdosti podle Knoop

3.1.6 Mikrotvrdomost

Zkouška mikrotvrdomosti spočívá ve vtlačování diamantového jehlanu ve tvaru Vickerse nebo Knoop. Hlavní rozdíl oproti měření běžné (makro) tvrdosti, je velikost zatížení. Při měření tvrdosti podle Vickerse používá zatížení 10 – 1200 N. Při měření mikrotvrdomosti se zatížení pohybuje v rozmezí 1 – 1000 g (0,09807 – 9,807 N). [17]

4 JAKOST POVRCHU

Obecně je povrch složen ze tří základních částí a to z tvaru, vlnitosti a drsnosti.



Obr. 12 Profil obecného povrchu

Vlnitost vzniká vibracemi vzniklými při obrábění, které jsou způsobeny nedostatečnou tuhostí obráběcího stroje. Vlnitost je často periodické povahy. [14]



Obr. 13 Vlnitost povrchu

Drsnost je nerovnost povrchu, vznikající při výrobě dílu. Při obrábění se nedá docílit ideálně hladké plochy. Obrobená plocha má vždy určitou drsnost, která je dána mikronerovnostmi vznikajícími při obrábění.

Drsnost obrobené plochy určují stopy, které zanechává nástroj. Drsnost ovlivňuje použítá technologie, procesní podmínky při výrobě, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu. [14]



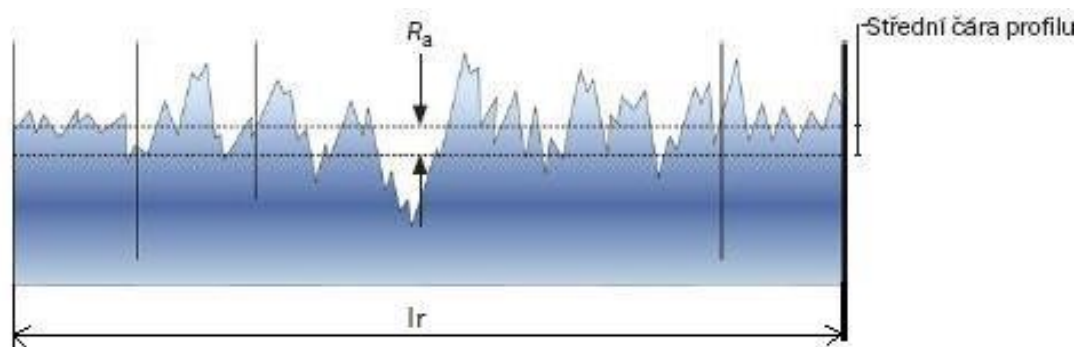
Obr. 14 Drsnost povrchu

4.1 Základní parametry drsnosti povrchu

Hodnocení jakosti povrchu je dáno normami ČSN EN ISO 4287, ČSN EN ISO 4288.

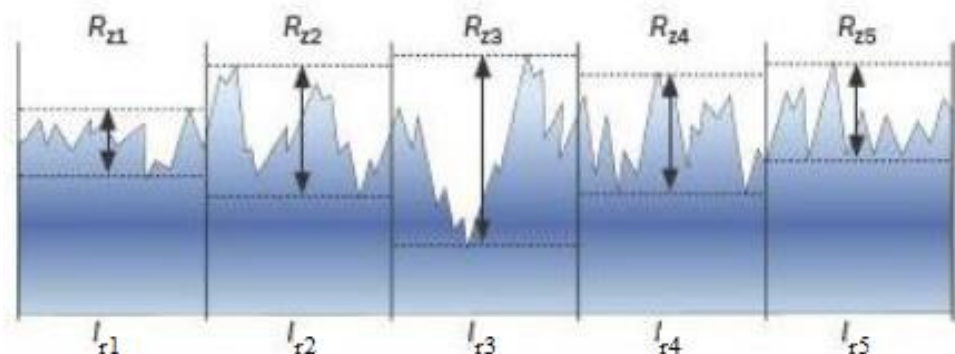
Základní využívané parametry drsnosti:

- **R_a Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu** - je střední hodnota všech odchylek od střední čáry profilu na základní délce. Parametr R_a je nejčastěji měřeným parametrem v praxi. Tento parametr ale neudává 100% informace o nepravidelnosti a tvaru povrchu. Pro stejnou hodnotu R_a může být různá výška profilu R_t . [33]



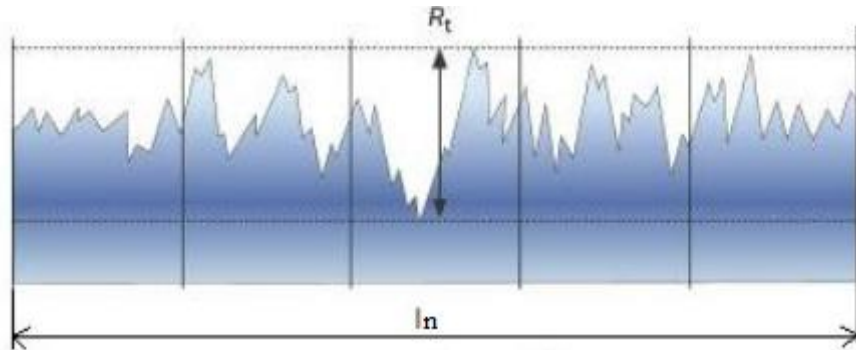
Obr. 15 Průměrná aritmetická úchylka daného profilu

- **R_z Maximální výška nerovnosti profilu** – Maximální výška profilu je průměr hodnot jednotlivých výšek profilu R_{zi} , které se stanovují z největšího výstupku profilu a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Obvyklý počet základních délek je pět. [33]



Obr. 16 Výška nerovnosti profilu

- **R_t Celková výška profilu** – Celková výška profilu je součet největšího výstupku profilu a nejhlubší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. Parametr R_t patří k nejpřísnějším požadavkům profilu. [33]



Obr. 17 Celková výška profilu

5 LASER

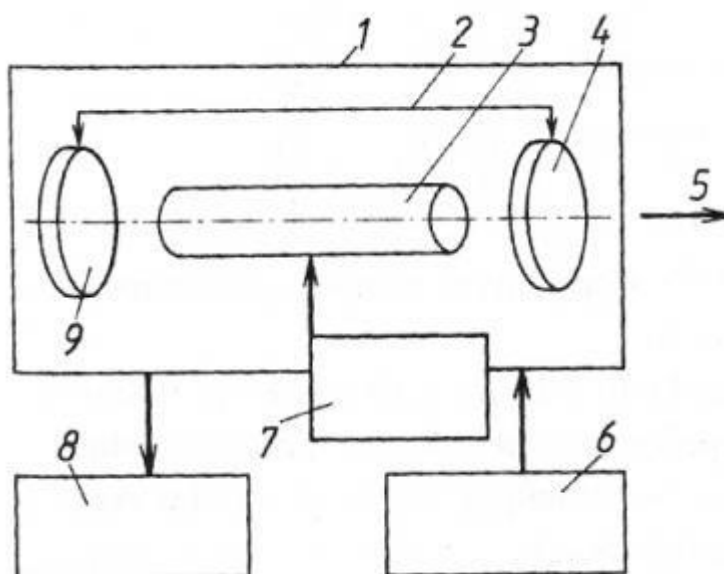
Slovo LASER vzniklo z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Světlo se zesiluje fotony, které opakovaně prochází médiem o určitých speciálních vlastnostech.

První laser byl sestrojen v roce 1960. Jednalo se o rubínový laser, který pracoval ve třech energetických hladinách krystalu a pracoval pouze v pulzním režimu. Sestrojil ho Maiman a podařilo se mu získat první laserový paprsek červeného světla. Několik let na to bylo docíleno souvislé činnosti laseru použitím více energetických hladin. Tento laser byl v roce 1963 použit na léčbu diabetické retinopatie, což je nezáánětlivé onemocnění oční sítnice.

Lasery se liší vlnovou délkou, konstrukcí, výkonem i účinností. Nelze najít univerzální laser použitelný na vše. Jsou různé typy laserů, každý má uplatnění někde jinde a používají se v různých odvětvích, jako je např. medicína, strojírenství, elektrotechnika apod. [18]

5.1 Princip laseru

Laserů jsou různé druhy, ale všechny mají společné základní části laserové hlavičky: **Aktivní prostředí** (laserové médium), kde dochází k zesílení záření. Může být tekuté, pevné nebo plynné. Toto prostředí je směs několika materiálů, které mají vhodné energetické hladiny ve vhodném nosném materiálu. Ten je průhledný a musí odvádět vzniklé teplo. **Rezonátor** vytváří zpětnou vazbu mezi aktivním prostředím a zářením. Tím vznikají laserové oscilace. Je to optický systém, který umožňuje zformování a zesílení záření. Konstrukce rezonátoru určuje vlastnosti paprsku. **Budící zařízení** laserovým médiem ovlivňuje pracovní režim laseru. Elektrickým proudem nebo výbojem je buzeno plynné médium. Výbojkami nebo diodami je buzeno médium pevné. Další částí je **zdroj čerpání**, který vybuzuje aktivní prostředí. Nevyužitá energie je přeměněna na teplo, které odvádí **chladič systém**. Při zpracování materiálu se nejčastěji k chlazení používá voda, u speciálních zařízení se používá i vzduch. [18, 19]



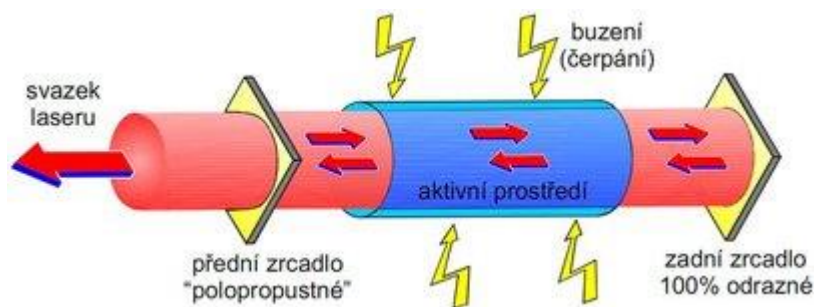
Obr. 18 Schéma zařízení pro obrábění laserem [19]

1 – laserová hlavice, 2 – rezonátor, 3 – laserové médium, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – výstup paprsku, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budicí zařízení, 8 – chladicí systém, 9 – nepropustné zrcadlo

Zdroj čerpání zajišťuje vybuzení elektronů aktivního prostředí ze základní do vyšší energetické hladiny, tzv. excitace. Takto dále excituje většina elektronů.

Při příjmu další energie donutí rovnováha sil v atomu přestup elektronů na nižší energetickou hladinu a vyzáří se tak přijatá energie do prostoru ve formě fotonů. Ty se ve svazku pohybují stejným směrem a jsou velmi pravidelně rozděleny.

Rezonátor se skládá nejméně ze dvou zrcadel, polopropustným a nepropustným. Fotony se odráží od zrcadel a znovu prochází aktivním prostředím. Tím rapidně vzrůstá jejich počet a uvolňuje se energie jako proud fotonů – viditelný svazek laseru, který vychází přes výstupní zrcadlo. [19, 20]

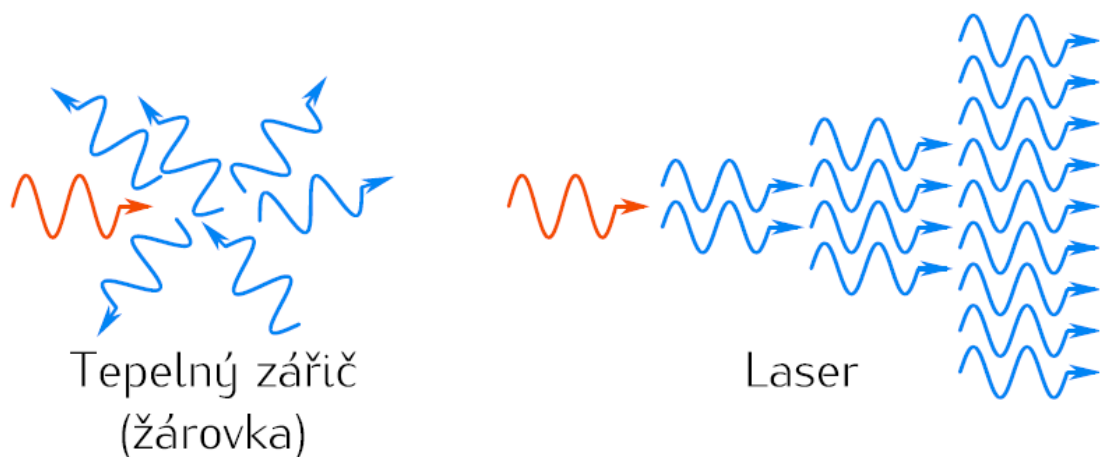


Obr. 19 Rezonátor

Laserové světlo se od běžných zdrojů světla liší těmito vlastnostmi:

- Laserové světlo je koherentní což znamená, že vlny, které jsou emitované z různých míst v aktivním prostředí, mají pevný fázový vztah.
- Laserové záření se šíří pouze v úzkém svazku na rozdíl od běžného světelného zdroje, který se šíří všemi směry. To znamená, že při zaostření laserového paprsku na malou plochu, je možné získat extrémně vysokou hustotu výkonu. [20, 21]

Srovnání laserového světla od běžného světla je vidět na obr. 20. Je zde vidět vysoká koherence s nízkou rozbíhavostí laserového svazku, což umožňuje ono zaostření. Pro volbu laseru na danou aplikaci je nutné znát jeho kvalitu svazku. Ta udává schopnost zaostřit laserový paprsek. [18, 20]



Obr. 20 Srovnání laserového světla od běžného světla [18]

5.2 Základní druhy laserů

Laserů je mnoho druhů, jejich základní princip je stejný, ale liší se konstrukcí a provedením jednotlivých částí. Lasery můžeme rozdělit do několika skupin a to podle následujících kritérií.

Nejčastěji se lasery dělí podle druhu aktivního prostředí, které může být pevné, kapalinové, plynné nebo i plazmatické. Zvláštním případem je laser polovodičový - laserová dioda.

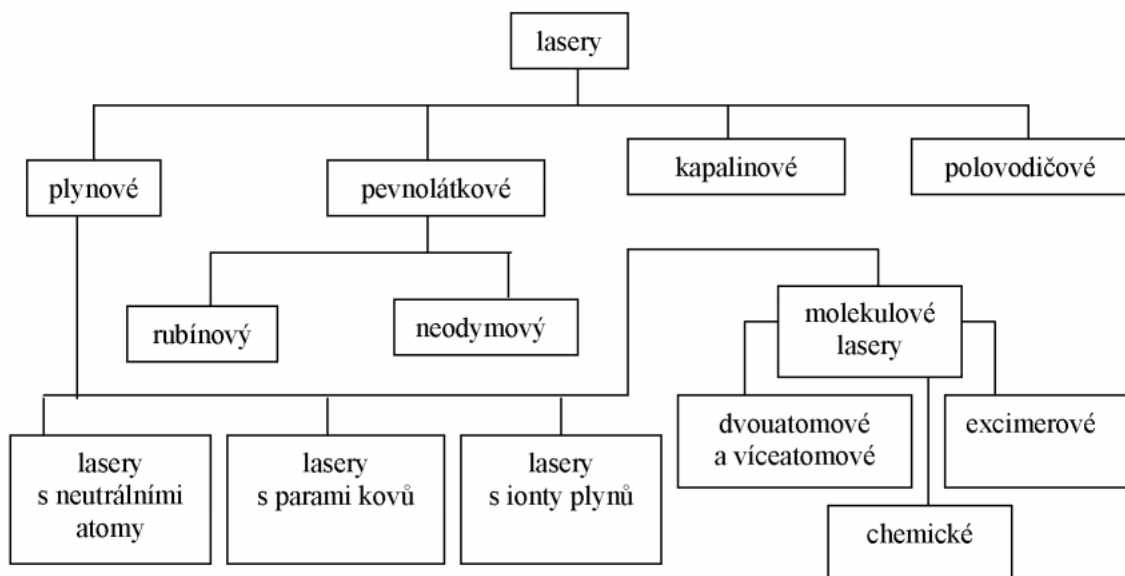
Podle generace provozního režimu laseru se dělí na kontinuální a pulzní lasery.

Podle vlnových délek optického zařízení, které vysílají, na: infračervené, ultrafialové, viditelné, rentgenové.

Podle délky generovaného pulzu můžou být s krátkými nebo velmi krátkými pulzy a dlouhými pulzy.

Podle způsobu buzení se rozdělují na optické, elektrické, chemické, elektronové.

Další možností jak rozdělit lasery je podle druhu kvantového přechodu, struktury laserového paprsku, rozsahu frekvencí. S vývojem nových laserů se uvedené druhy mění a doplňují, ale rozdělení podle druhu aktivního prostředí je univerzální. [20, 21, 22]



Obr. 21 Dělení laserů podle aktivního prostředí [23]

5.2.1 Pevnolátkové lasery

Do této skupiny můžeme zařadit všechny lasery, které mají aktivní prostředí v pevném stavu. Aktivní prostředí se stává z matrice (pevný, opticky propustný izolant - krystal) dotované ionty. K buzení dochází pomocí výbojky nebo laserovými diodami. Tento druh laserů je schopen pracovat v mnoha režimech. Laserový paprsek je ve viditelné a infračervené oblasti. Pevnolátkové lasery jsou stabilní, robustní, nenáročné jak na údržbu tak i na provozní podmínky.

Nejznámější člen této skupiny je rubínový laser. Jeho aktivní prostředí je tvořeno krystalem safíru dopovaným chromem. Paprsek tohoto laseru má vlnovou délku 0,6943 μm zářící červenou barvou. Rubínové lasery pracují ve většině případů v pulzním režimu. Používají se například k vrtání a v dermatologii. V dnešní době bývá nahrazen Nd:YAG laserem.

Nd:YAG laser má aktivní prostředí skládající se z neodymu dopovaného yttria alumina granátu. Tento laser může pracovat v kontinuálním i pulzním režimu. Má výkon až 4000 W a jeho paprsek má vlnovou délku 1,06 μm . Nd:YAG laser bývá používán při generování zeleného světla, v lékařství jako skalpel a v průmyslu pro vrtání, svařování a značení. [20, 22, 24]

5.2.2 Kapalinové lasery

Kapalinové lasery mají aktivní prostředí z roztoku organických barviv dopovaných ionty zemin. Buzení zde probíhá optickým zářením. U kapalinových laserů je možné spojitě přeladovat vlnovou délku záření pomocí změny barviv a nelineární optiky. Vlnové délky záření se tak mohou pohybovat v rozmezích od 300 nm do 1500 nm. Jako příklad může sloužit rhodamonový laser, který generuje záření od zeleného až po červené. Nevýhoda kapalinových laserů je jejich toxicita a kratší životnost aktivního prostředí, proto je snaha nahrazovat je laditelnými pevnolátkovými lasery. Kapalinové lasery se používají ve spektroskopii a v medicíně ve fotodynamické terapii. [20, 22, 24]

5.2.3 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je v plynné fázi. K buzení dochází elektrickým výbojem, opticky, radiofrekvenčními vlnami, chemickou reakcí, expanzí plynu a celou řadou dalších způsobů. Plynové lasery ve většině případů pracují kontinuálně, výjimkou jsou výkonné pulzní lasery. Díky homogennímu aktivnímu prostředí je dobře homogenní i laserový svazek, který má nízkou rozbíhavost. Dosahuje se velké účinnosti laserů až v desítkách procent. Na druhou stranu mají ale malý výkon, který je závislý na objemu aktivního prostředí. Výkonný laser má tedy značně velké rozměry.

Jako první vyrobený plynový laser je heliumneonový laser, který je hodně známým a ještě nedávno byl hojně rozšířeným. Aktivní prostředí tvoří neon buzený elektrickým výbojem. Používá se v geodézii, měřicí technice a holografii. V praxi je nejpoužívanější CO_2 laser s infračerveným zářením o vlnové délce 10 μm . Aktivní prostředí tvoří oxid uhličitý buzený elektrickým výbojem. Používá se pro vrtání, řezání, svařování. Zvláštní druh plynového laseru je excimerový. Aktivní prostředí tvoří molekuly, které vznikly ze dvou různých molekul vzácných plynů za pomoci svazku elektronů. Excimerový laser je výkonný zdroj ultrafialového záření. [20, 24, 25]

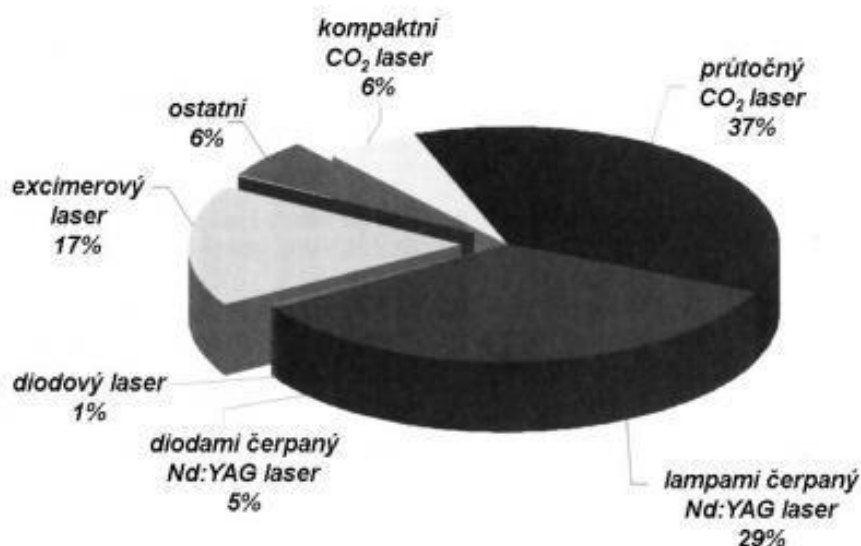
5.2.4 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery patří k nejrozšířenějším laserům často označovaných jako laserová dioda. Aktivní prostředí je tvořeno elektricky čerpaným polovodičovým materiálem - diodou. Výkon laserového paprsku lze snadno měnit pomocí změny budícího elektrického proudu. Polovodičový laser pracuje v pulzním i kontinuálním režimu. Tyto lasery mají malou velikost a účinnost až 50%. Nevýhodou je citlivost na změnu teploty a rozbíhavost záření.

Díky malým rozměrům se polovodičové lasery používají v telekomunikacích a výpočetní technice např. v tiskárnách a CD/DVD přehrávačích. Pomocí nich se také čerpají pevnolátkové lasery a z nich vznikají velmi výkonné a malé laserové generátory. Polovodičové lasery s velkým výkonem se používají v průmyslu na svařování jak kovů, tak i plastů, na kalení a v technologii Rapid Prototyping. [20, 22, 24]

5.3 Aplikace laserů

Laserové zařízení je v dnešní době hojně rozšířené a podle vlastností laserového svazku se používá v astronomii, medicíně, technologii, v automatizaci, geodézii, metrologii, chemii, v technice spojů, biologii, ve výpočetní technice, spektroskopii, energetice, ve vojenské technice a v dálkovém řízení. [20, 21]



Obr. 22 Podíl na trhu – typy laserů [20]

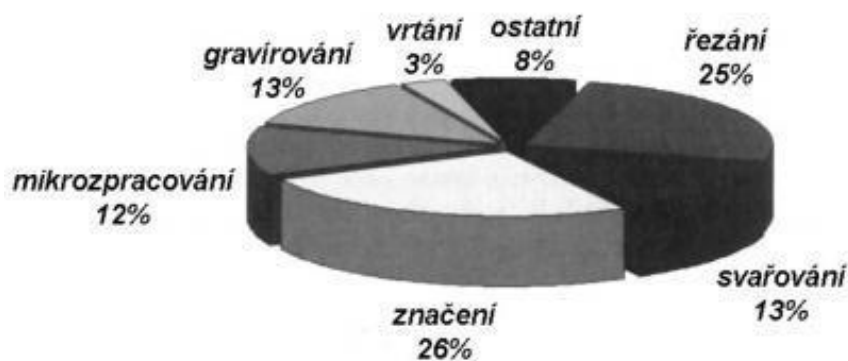
5.3.1 Aplikace laserů v průmyslu

Lasery se v průmyslu začaly používat jen chvíli po sestrojení prvních laserů, a to v druhé polovině 60. let. Vývojem a inovací laserové technologie roste možnost i jeho aplikace. Je snaha vylepšit technické možnosti a ekonomickou nákladnost provozu. Výhodou použití laserů v průmyslu je, že dokáže opracovat kovové, těžkoobrobitelné i nekovové materiály s velmi dobrou kvalitou a dostane se i do špatně přístupných částí obrobku. K obrábění dochází bez mechanického kontaktu s obrobkem. [20, 26]

Zdali je materiál vhodný k opracování laserem udávají tyto vlastnosti:

- Pohltivost, tzn. schopnost materiálu pohltit světelnou energii a změnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky – změna na tepelnou energii.
- Odrazivost, která poměrově udává množství odražené energie a energie dopadající.

Materiál je lépe obrobitelný laserem, pokud má větší pohltivost a menší tepelnou vodivost a odrazivost. [20]



Obr. 23 Procento rozdělení jednotlivých technologií [20]

5.3.1.1 Řezání laserem

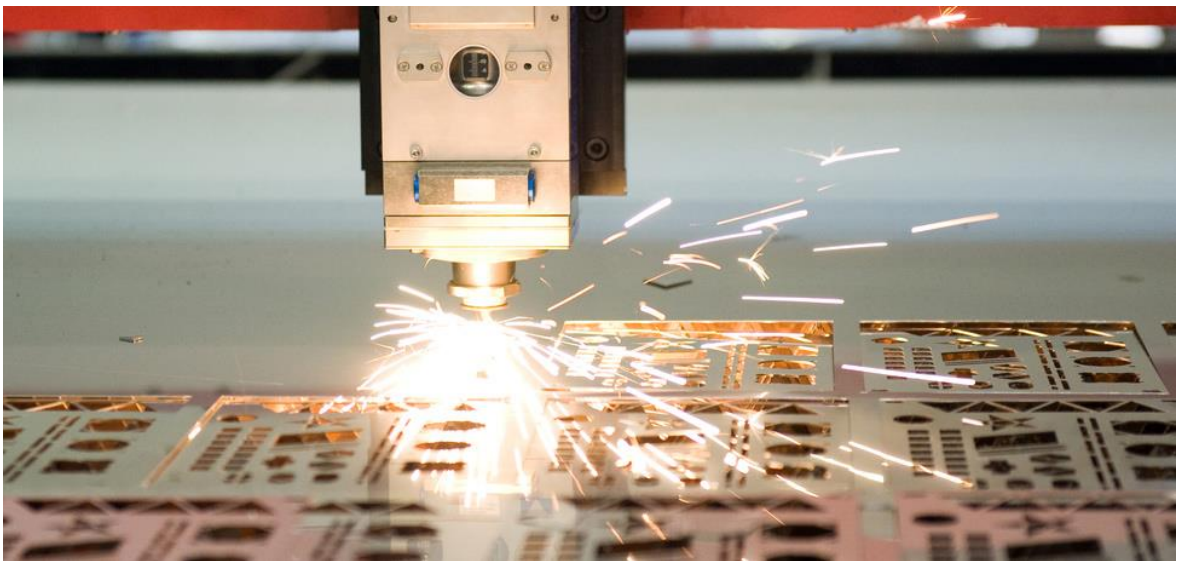
Řezání laserem je dnes využito ve většině výrobních odvětvích, protože lze přesně vyřezávat složité tvary, které se nemusí upínat a při obrábění nevzniká skoro žádný odpad. Materiál při řezání je taven a odfukován inertním plynem. Řezat laserem lze tvrdé, křehké nebo i snadno deformovatelné materiály (textil, kov, dřevo, keramika). Záleží pouze na jejich optických a tepelných vlastnostech. Kvalita povrchu závisí na množství pohlcené energie. To znamená, že leštěný povrch absorbuje méně energie než povrch drsný. Při řezání se pohybuje laserový zářič nad obrobkem, méně často se pohybuje obrobek a laserový zářič je statický.

Nejrozšířenější jsou CO₂ lasery s kontinuálním režimem. Nejlepší efektivnosti řezání se dosahuje u materiálů s nízkou tepelnou vodivostí. K urychlení řezání kovů se do místa řezu přivádí nejčastěji kyslík, který zvětšuje tepelné účinky. Při řezání nekovových materiálů je do místa řezu přiváděn pouze vzduch nebo inertní plyn, aby došlo k odstranění roztaveného materiálu, ochlazení okolí, popř. aby nedošlo ke vzplanutí materiálu např. u papíru. [24, 28]

Technologicky můžeme řezání laserem rozdělit na dvě metody:

- Řezání materiálu v celé jeho hloubce, například u plechů, překližek a jiných tenkých materiálů.
- Vyřezání drážky na povrchu materiálu a poté kontrolovaný lom. Těto metody se využívá u křehkým materiálů, např. keramika nebo sklo.

Řezání laserem může být tavné, oxidační, nebo sublimační. [28]

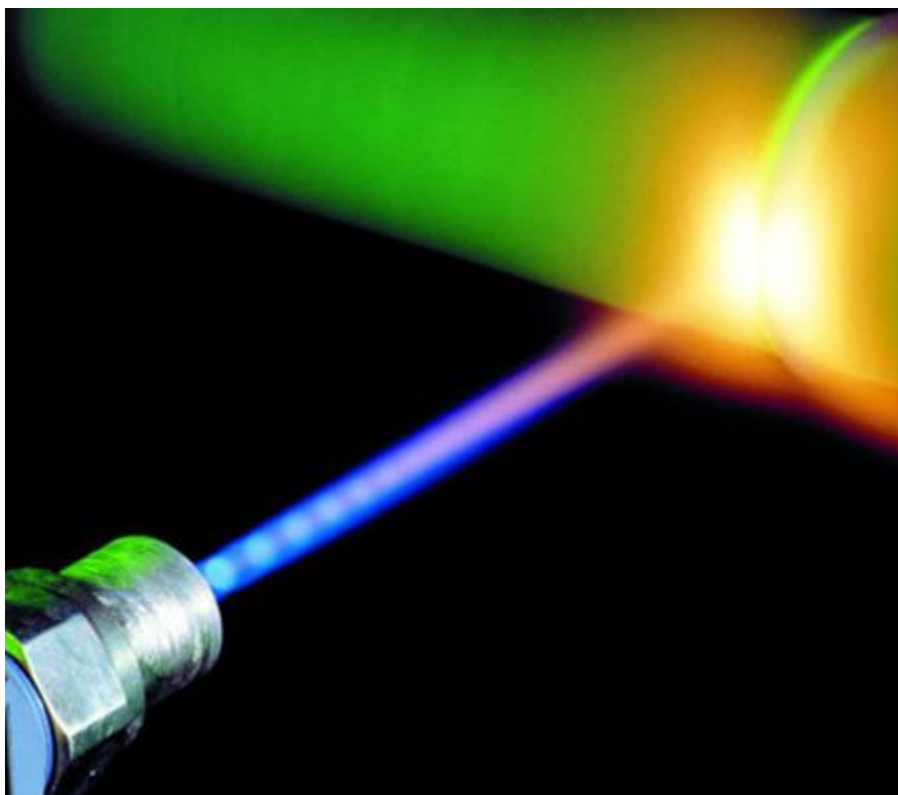


Obr. 24 Řezání laserem [27]

5.3.1.2 Laserové svařování kovů

Svařovat laserem může být v mnoha případech výhodnější než svařování klasickými metodami. Při laserovém svařování dochází pouze k lokálnímu tepelnému působení, takže okolí svaru není tepelně poškozováno. Když je laser dostatečně výkonný, dojde k natavení materiálu dříve, než se stihne ohřát i jeho jádro. Tvar svaru u laserového svařování je obdobný jako u svařování elektronovým svazem. Laserový paprsek má menší průměr než 0,5 mm a vznikají tak kvalitní a velmi jemné svary. Celý proces je řízen počítačem. Pro laserové svařování se nejčastěji používají Nd:YAG lasery a CO₂ lasery. Svařovat pomocí laseru lze nerez ocel, slitiny titanu, zirkonu nebo chromniklu. Laserový paprsek, který má velmi velkou energii na malé ploše, je schopen svařovat i materiály s velkou teplotou tání. Při bodovém svařování se používají impulzní lasery.

Svařování laserem umožňuje svařit i nesourodé materiály, např. plast s kovem, kov s keramikou. Používá se při svařování kontaktů v elektronice, kardiostimulátorů, v letectví a plechů v automobilismu apod. [26, 28]



Obr. 25 Svařování laserem [25]

5.3.1.3 Laserové gravírování a značení

Paprsek laseru vytváří na povrchu materiálu popis, který je kontrastní, přesný a mechanicky odolný. Vytvořený nápis je trvanlivý a to bez použití barev, chemických přísad nebo mechanického zásahu do struktury materiálu. Při označování nezáleží na tvaru výrobku ani na jeho povrchové úpravě. Označovat lze téměř jakékoliv kovové i nekovové materiály. Změnou výkonu a posuvu laseru se dá měnit hloubka popisu od pár tisícín milimetru až do větší hloubky při gravírování. Při technickém značení se dbá na životnost popisu, na rozdíl od reklamního použití, kde se dbá na estetiku popisu.

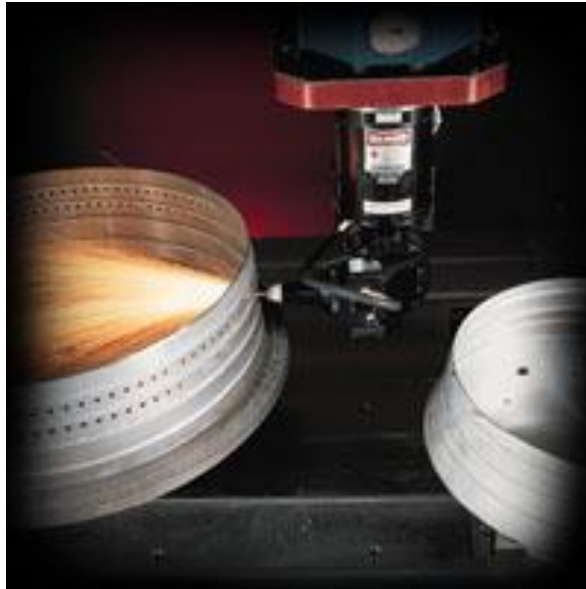
Pro laserové gravírování a značení se nejčastěji používají CO₂ a Nd:YAG lasery. Výhodou je, že ke značení dochází bezkontaktně, takže se materiál nedeformuje a s využitím výpočetní techniky lze dělat i velmi složité motivy, přičemž je zachována reprodukovatelnost. [26, 28]



Obr. 26 Popis vytvořený laserem [26]

5.3.1.4 Laserové vrtání

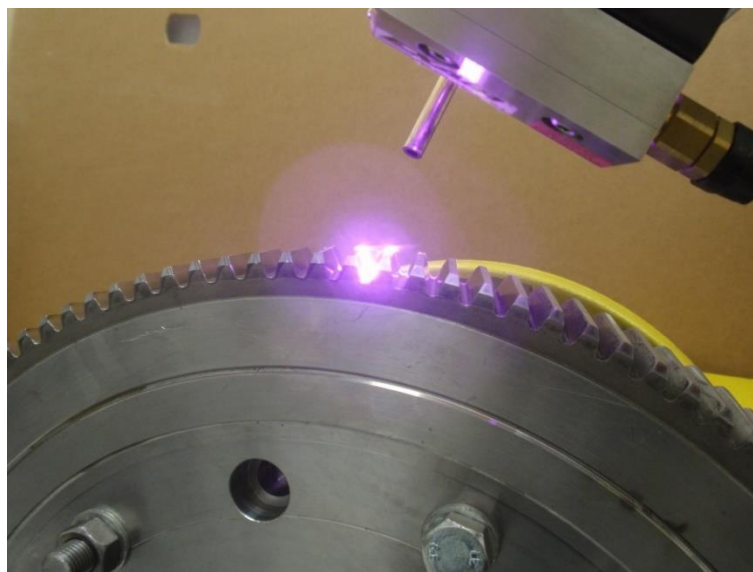
Při laserovém vrtání dochází v místě vrtu vlivem vysoké teploty k odpaření materiálu. Aby byla intenzita laseru dosti vysoká pro vrtání, musí být laserový paprsek dostatečně fokusovaný, na rozdíl od svařování, kde není potřeba tak velké intenzity. Nejčastěji se používají pevnolátkové pulzní Nd:YAG lasery s délkou pulzu menší jak 1 ms. Při laserovém vrtání je možné vytvořit přesné otvory do průměrů 10 – 100 μm i ve špatně dostupných místech. Laserové vrtání bylo použito již v roce 1965, kdy laser s rubínovým aktivním prostředím vrtal do diamantu. [25, 28]



Obr. 27 laserové vrtání [25]

5.3.1.5 Laserové kalení

Laser je při kalení využit jako rychlý zdroj tepla. Při laserovém kalení je kalena jen povrchová vrstva a nedochází tak ke změnám v jádru materiálu. U ocelí tak vzniká jemná martenzitická struktura. Kovům se při použití pulzních laserů zvyšuje jejich únavová pevnost o 10 až 40%. Pro laserové kalení se používá kontinuální CO₂ laser s výkonem až několik kilowatt. Kalit pomocí laseru lze rychlořezné oceli a ostří nástrojů. Kalení laserem se používá k transformačnímu zpevnění u velmi namáhaných součástí v leteckém i automobilovém průmyslu, např. u boků ozubených kol, klikových a vačkových hřídelí. [25, 28]



Obr. 28 Povrchové laserové kalení [29]

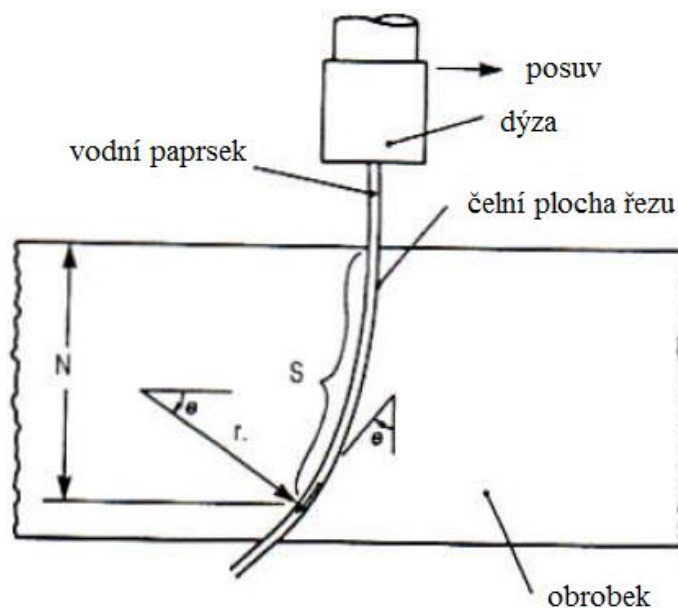
6 VODNÍ PAPERSEK

Technologie vodního paprsku WJM (Water Jet Machning) využívá abrazivní účinky vysokoenergetického vodního paprsku k obrábění materiálu. Pro dělení dřeva a plastů se začal používat na začátku roku 1970. Později se začalo do vodního paprsku přidávat jemné brusivo, aby se zvýšila účinnost řezání. Tak vznikl název abrazivní vodní paprsek AWJM (Abrasive Water Jet Machning), který se začal používat v roce 1983 pro řezání skla. [30, 31]

6.1 Princip řezání materiálu

Úběr materiálu při WJM a AWJM využívá mechanickou energii vody, která velkou rychlostí v úzkém proudu dopadá na obráběnou plochu. Abraziva jsou přísady, které zvyšují mechanický účinek dopadu.

Voda s tlakem 250 až 500 MPa (pro srovnání, hasiči používají tlak vody 4 MPa) je dodávána pomocí dýzy, která má výstupní otvor o průměru 0,2 až 0,4 mm. Potenciální energie vody se transformuje na kinetickou a vodní paprsek má rychlost až 1000 m/s. Vodní paprsek s touto rychlostí po dopadu na obráběný materiál má charakter a vlastnosti pevného tělesa. Proniká do obrobku, kde postupně ztrácí kinetickou energii a začíná se vychylovat (obr. 29). Paprsek se tedy při řezání pohybuje po zaoblené dráze, která závisí na délce řezu. To je způsobeno třením mezi obrobkem a paprskem vody. [30, 32]

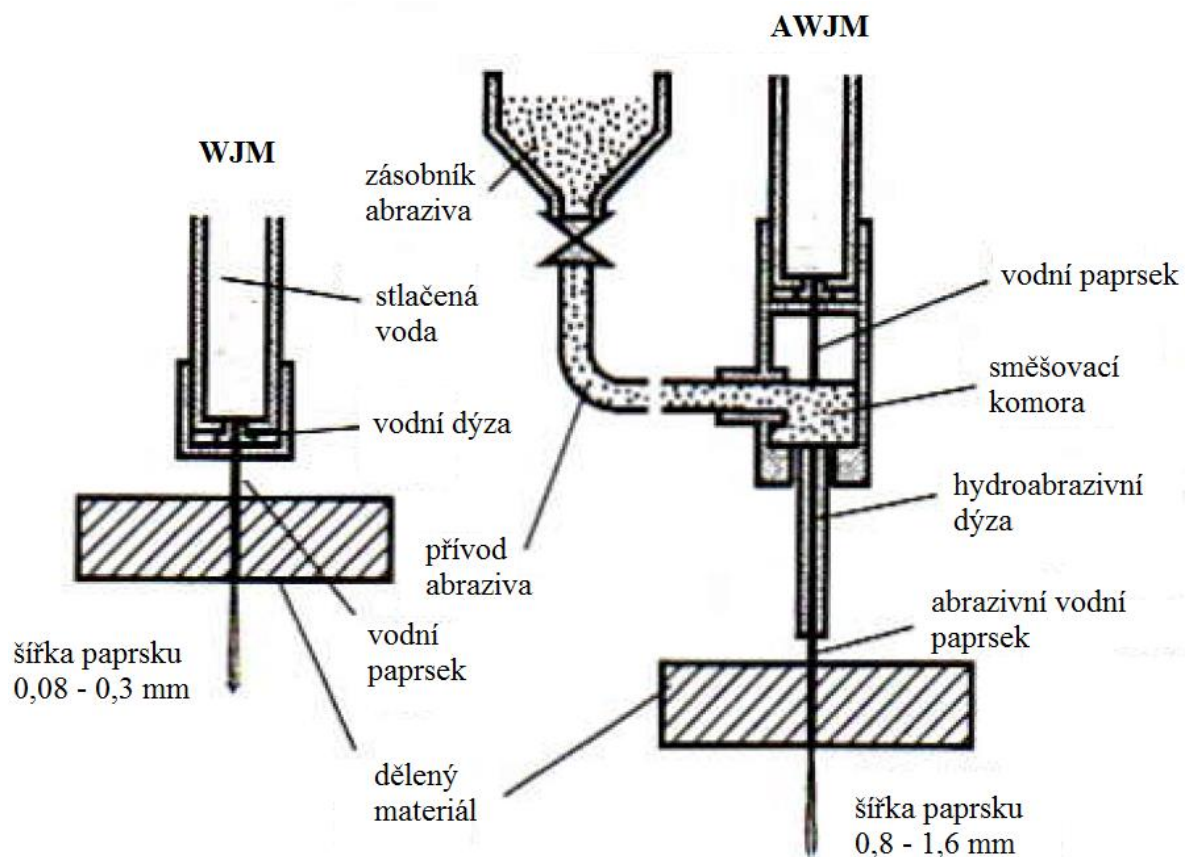


Obr. 29 Schéma řezání vodním paprskem a dráhy paprsku [30]

N – vzdálenost ve svislém směru, kterou projde paprsek za čas; r – poloměr zaoblení paprsku; S – délka stopy paprsku podle čelní plochy řezu; Θ – úhel vychýlení paprsku

Při použití pouze čisté vody, vzniká omezení využití na obrábění. Při vysoké rychlosti vodní paprsek přibírá atmosférický vzduch, což snižuje jeho řeznou schopnost. Proto se do vody přidávají chemické stabilizátory, např. polymery s dlouhými řetězci. Tento způsob řezání se používá pro měkčí a lehčí materiály, jako jsou např. tenké plechy, dřevo, kůže, polymery. [30, 32]

Pro zvýšení řezného výkonu se do vodního paprsku přidávají abraziva – jemné brusivo. Používá se např. písek, granát, skleněné kuličky, karbid křemíku. Abrazivní vodní paprsek AWJM se používá pro tvrdé a těžce obrobitelné materiály, např. pro kompozity, silné plechy a hutnický materiál.

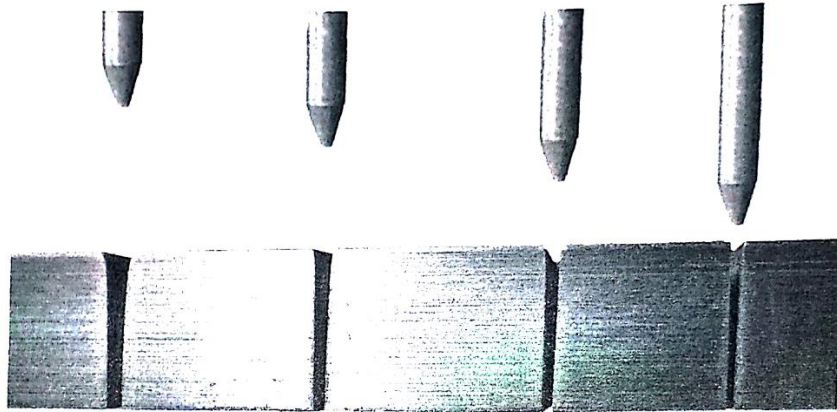


Obr. 30 Princip řezných hlav a rozdíl mezi WJM a AWJM [30]

Při obrábění AWJM se materiál odstraňuje nárazem abraziva pod malým úhlem a dochází k mikroobrábění. Při zvětšení úhlu paprsku dochází i plastickému porušení materiálu. Křehké materiály jsou obráběny vznikem trhliny a jejího dalšího šíření.

Řezání vodním paprskem je erozivní proces a dochází k němu, když tlak čela paprsku překročí pevnost materiálu. Obráběný materiál není teplotně zatěžován a působí na něj pouze malé řezné síly. To umožňuje řezat i křehké materiály, bez nebezpečí vzniku křehkého lomu.

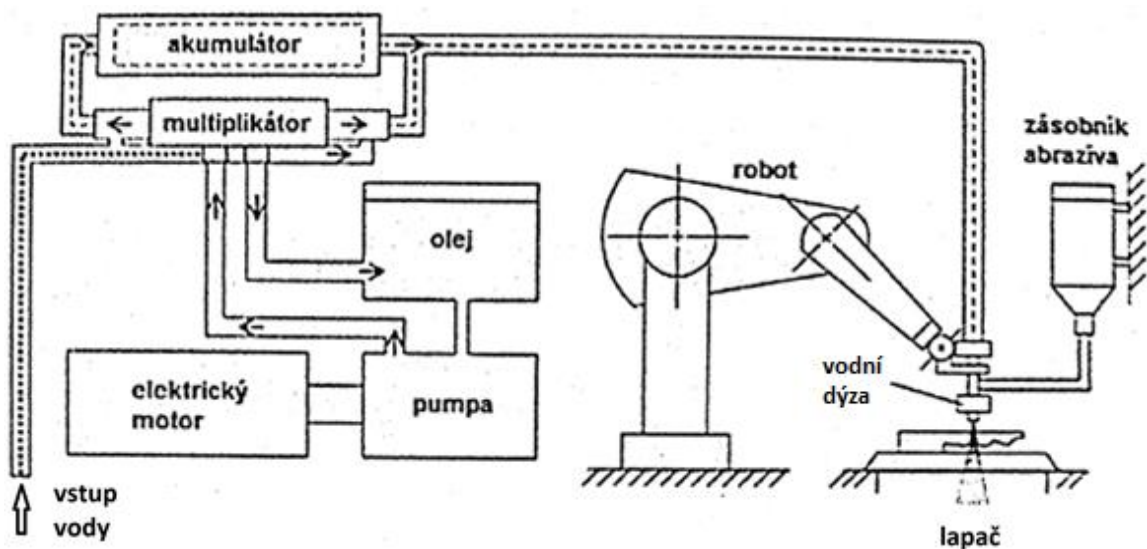
Nevýhodou AWJM je, že vodní paprsek ztrácí energii se zvyšující se hloubkou řezu. Takže na konci spodní části řezaného materiálu je viditelné zúžení. To platí i pro vzdalování dýzy od obrobku. [32]



Obr. 31 Znáznornění zúžení řezu [32]

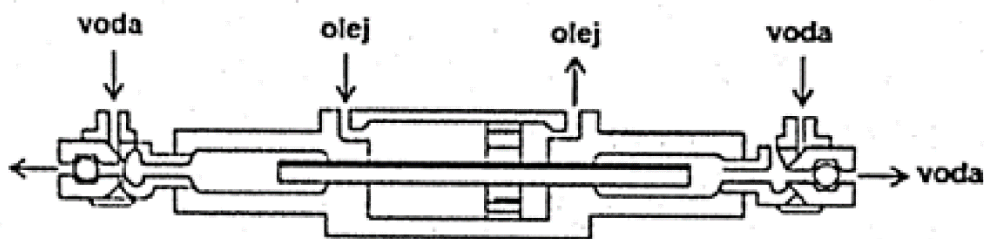
6.2 Zařízení pro dělení materiálu vodním paprskem

Základní části zařízení vodního paprsku tvoří hydraulická jednotka, multiplikátor, akumulátor, filtry, vysokotlaké hydraulické obvody, dýza, nádoba na zachycení vody – lapač. Na obrázku 32 je znázorněno schéma průmyslového zařízení pro AWJM. Namísto robota se také používá souřadnicový stůl. [30, 32]



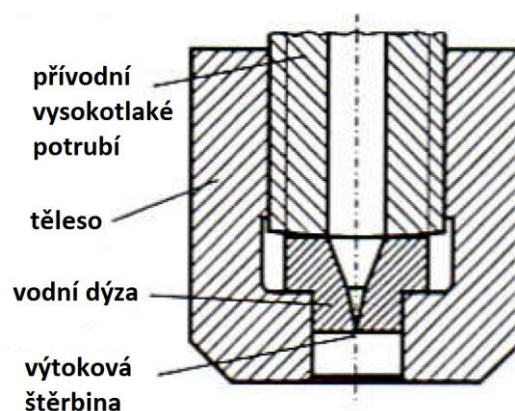
Obr. 32 Schéma sestavy zařízení AWJM [32]

První část je **hydraulická jednotka**, kde nejprve radiální čerpadlo s olejem zajišťuje tlak do 20 MPa. Druhou částí hydraulické jednotky je **multiplikátor** (násobič), který slouží ke zvýšení tlaku vody až na 500 MPa. Zesílení je dáno poměrem ploch obou konců pístu. Typický poměr zesílení multiplikátorem je 1 : 20. Dodávaná voda do čerpadla prochází několika **filtry**, které jsou nutnou součástí zařízení. Filtry zbavují vodu nečistot do velikosti 1,2 až 0,5 μm . To se provádí z důvodu ochrany dýzy před poškozením. Pulzující voda z multiplikátoru dále pokračuje do **akumulátoru**, což je vysokotlaká nádoba. Dochází zde k tlumení rázů a ustálení vody. Akumulátor musí udržovat stejný tlak a rychlost proudící vody. Z akumulátoru voda dále proudí pomocí ocelových (pancéřových) hadic a hydraulických prvků do řezací hlavy. [30, 32]



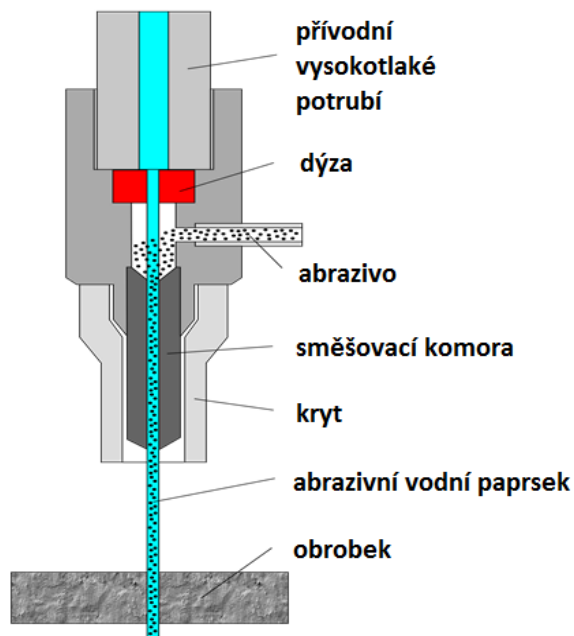
Obr. 33 Schéma multiplikátoru [32]

Druhou základní a nejdůležitější částí je **řezací hlava**, která může být buď s přídavkem abraziv, nebo bez přídavku. Řezací hlava je složena z dýzy, která má průměr od 0,075 mm a může být vyrobena ze safíru, spékaného karbidu nebo diamantu. Výhoda diamantové dýzy je, že se dá vícekrát vyčistit a má tedy větší živostnost. Její cena je však 7 až 10 násobně větší, než cena safíru nebo spékaného karbidu. Dýza ovlivňuje kvalitu paprsku i řezu.



Obr. 34 Příklad konstrukce řezací hlavy pro čistý vodní paprsek [30]

Rozdíl mezi čistým vodním paprskem a abrazivním paprskem je v přidávání drobného brusiva do proudu vody. Tomu je přizpůsobena i konstrukce řezací hlavy, která má navíc směšovací komoru a vložku. Ve vložce se vodní paprsek smíchává s částicemi abraziva a vzniká tak abrazivní vodní paprsek.



Obr. 35 Příklad konstrukce řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsek [32]

Poslední částí zařízení je **lapač** vody. Je to nádoba, která slouží k zachycení a rozptýlení vodního paprsku, který projde přes materiál. Také slouží k tlumení hluku a zachycení třísky. Nádoba musí být dostatečně hluboká, aby se paprsek rozptýlil před dnem nádoby. Hloubka nádoby bývá 300 až 600 mm. Je možné použít i nižší nádoby, kde se paprsek rozptýlí o ocelové kuličky nebo o zachytávající pláty z titanu boru. [30, 32]

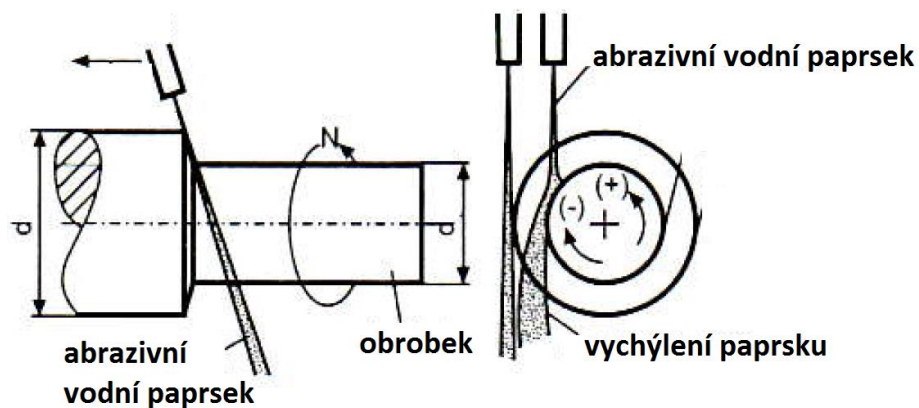
6.3 Aplikace vodního paprsku

Oblast využití vodního paprsku a abrazivního paprsku se neustále rozšiřuje v různých průmyslových odvětvích. V leteckém průmyslu a kosmonautice se vodní paprsek používá, protože nedochází k narušování struktury obráběných slitin. Ve stavebnictví se používá k dělení obkladových materiálů i betonu. Ve sklářském průmyslu k dělení skel, bezpečnostních skel apod. Používá se také v potravinářském průmyslu k dělení mražené potravy, zákusků, ovoce. Dále se vodní paprsek používá v dřezpracujícím, textilním, papírenském, kožařském a elektrotechnickém průmyslu. [31]

Největší uplatnění má však ve strojařském průmyslu, kde se používá k obrábění prakticky všech konstrukčních materiálů. Dělení vodním paprskem je téměř jediným řešením pro dělení plátovaných plechů tak, aby nebyla negativně ovlivněna povrchová vrstva plechu. Abrazivní vodní paprsek se používá na ploché i tvarové obrábění, řezání závitů, soustružení, frézování, vrtání a to především těžce obrobitelných materiálů. [30, 32]

Soustružení

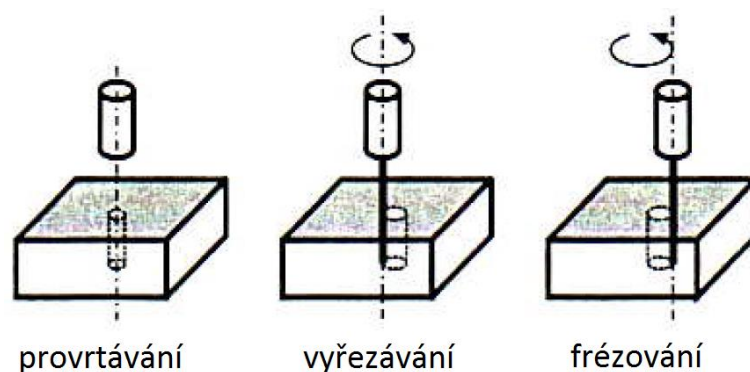
Obrobek rotuje a abrazivní vodní paprsek koná posuvný pohyb ve směru osy obrobku. Hloubka řezu je závislá na radiálním posuvu paprsku, viz obr. 36. [30]



Obr. 36 Soustružení abrazivním vodním paprskem [30]

Vrtání

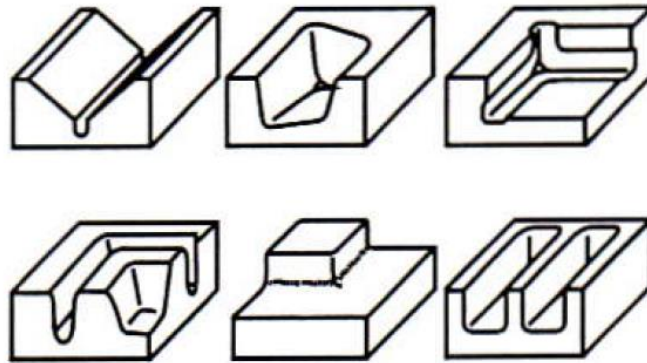
Pro vrtání těžkoobrobitelných materiálů jako je keramika, sklo, niklové slity se do popředí dostává AWJM. V současné době se používá několik způsobů vrtání děr charakterizovaný vzájemným pohybem obrobku a paprsku. Nejčastěji se pro vrtání používá stacionární paprsek i obrobek, rotující nebo vibrující paprsek se stacionárním obrobkem. [30]



Obr. 37 Způsoby vrtání abrazivním vodním paprskem [30]

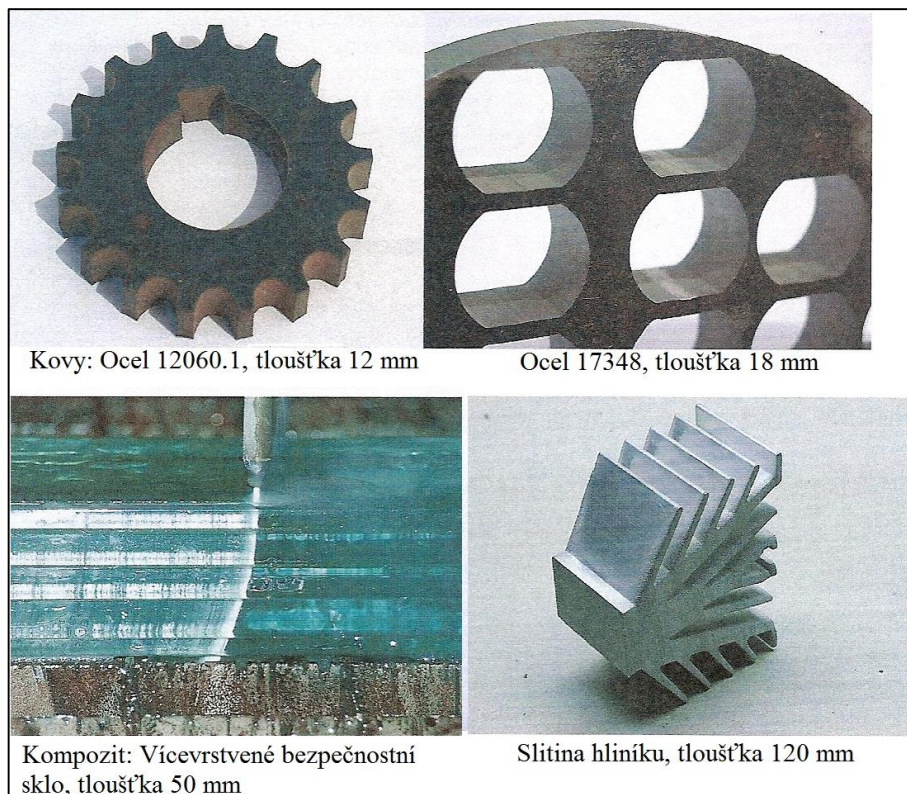
Frézování

Frézování abrazivním vodním paprskem se používá pro tvarově složité obrobky. Dochází k řezání obrobku, nikoliv k dělení. Při AWJM frézování paprsek vícenásobně přejíždí po obráběné ploše a postupně se tvoří tvar, který je podobný konečnému tvaru. AWJM frézování se používá pro výrobu tvářecích nástrojů. [30]



Obr. 38 Vyfrézované tvary abrazivním vodním paprskem [30]

Příklady použití vodního paprsku jsou na obrázku 39, kde jsou zobrazeny výrobky z různých materiálů.



Obr. 39 Ukázky řezů WJM a AWJM [33]

7 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je porovnání technologií řezání laserem a vodním paprskem u vybraných polymerních materiálů. To jsou polypropylen, akrylonitrilbutadienstyren, polymethylmethakrylát a polykarbonát s akrylonitrilbutadienstyren. Z těchto materiálů byly vyřezány vzorky pomocí laseru a vodního paprsku. Odlišnosti použitých technologií se zkoumaly na vyrobených vzorcích, kde se porovnávala tvrdost, drsnost, ale také šířka řezu a přesnost vyrobených vzorků.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Vyrobté vzorky z různých materiálů na laserovém zařízení pro experiment
3. Proved'te experiment
4. Proved'te vyhodnocení experimentu

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH POLYMERŮ

Každý plast má své typické zpracovatelské i funkční vlastnosti, které ovšem lze měnit přidáním přísad.

8.1 Polypropylen (PP)

Polypropylen je termoplastický polymer a patří k nejběžnějším plastům. Používá se v různých odvětvích průmyslu, např. potravinářský, textilní, ale i jako laboratorní vybavení.

PP má dobrou pevnost, stálost i tvrdost. Je dobře svařitelný a nemá sklon k vnitřnímu pnutí. Je velmi dobře elektricky a chemicky odolný. *PP* má nízkou hustotu, vysokou teplotní a tvarovou stálost, povrchovou tvrdost a není fyziologicky závadný. Nevýhodou *PP* je nízká ořezuvzdornost, špatná lepitelnost a náchylnost k oxidaci. [34]

Tab. 1 Základní vlastnosti PP [36]

Mez kluzu [MPa]	33
Tažnost [%]	700
E-Modul pružnosti v tahu [Mpa]	1450
Tvrdost podle Brinella	72
Tepelná vodivost [W/Km]	0,22
Teplota tavení [°C]	163
Maximální teplota dlouhodobá [°C]	100

8.2 Polymethylmethakrylát (PMMA)

Typickou vlastností *PMMA* je čírost a bezbarvost i v tlustých vrstvách. Tato vlastnost zajišťuje průhlednost, ale i snadné barvení polymeru. *PMMA* má větší odolnost povětrnosti než ostatní běžné termoplasty. Má také dobré mechanické i elektroizolační vlastnosti a je zdravotně nezávadný. Výhodou *PMMA* je dobrá lepitelnost, nevýhodou je nízká povrchová tvrdost. [34]

Tab. 2 Základní vlastnosti PMMA [36]

Pevnost v tahu [MPa]	73
Tažnost [%]	3,5
E-Modul pružnosti v tahu [Mpa]	3200
Tvrdość podle Brinella	195
Tepelná vodivost [W/Km]	0,19
Teplota tavení [°C]	110
Maximální teplota dlouhodobá [°C]	90

8.3 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

ABS je termoplastický polymer, který je charakteristický svou tuhostí. Dobře odolává proměnlivým teplotám, má dobré elektrické vlastnosti a je zdravotně nezávadný. ABS lze lehce zapálit a identifikovat jej podle hořlavosti. Hoří svítivým plamenem se silným vznikem sazí.

ABS nachází uplatnění především v automobilovém průmyslu. ABS je vhodné pro pokovení, lakování a laserování. [34]

Tab. 3 Základní vlastnosti ABS [36]

Mez kluzu [MPa]	45
Tažnost [%]	10
E-Modul pružnosti v tahu [Mpa]	2300
Tvrdość podle Brinella	90
Tepelná vodivost [W/Km]	0,17
Teplota tavení [°C]	110
Maximální teplota dlouhodobá [°C]	95

8.4 Polycarbonate-Akrylonitrilbutadienstyren (PC-ABS)

PC-ABS je směs tvořená *PC* a *ABS*. Kombinuje výhodu *ABS*, což je dobrá zpracovatelnost a výborné mechanické vlastnosti a odolnosti proti teplu a nárazu, což je typické pro *PC*.

Poměr *PC* a *ABS* určuje hlavně tepelnou odolnost výrobku. *PC-ABS* vykazuje synergický efekt, což vede k velmi dobré odolnosti proti nárazům při snížených teplotách. Tato odolnost je lepší než u samostatného *ABS* nebo *PC*.

PC-ABS se používá v automobilovém průmyslu a elektronice. Používá se tam, kde se požaduje vysoká teplota průhybu při zatížení, dobrá tuhost a pevnost. Používá se také pro výrobky, které jsou vystaveny velkému rozsahu teplot. [35]

Tab. 4 Základní vlastnosti *PC-ABS* [36]

Mez kluzu [MPa]	52
Tažnost [%]	>50
E-Modul pružnosti v tahu [Mpa]	2200
Tvrdost podle Brinella	90
Tepelná vodivost [W/Km]	0,2
Teplota tavení [°C]	130
Maximální teplota dlouhodobá [°C]	90

9 VÝROBA VZORKŮ

Vzorky byly vyrobeny pomocí laserového zařízení ILS 3NM a vodním paprskem AWJM.

Popis a parametry vodního paprsku AWJM

Výrobu vzorků pomocí vodního paprsku zajistila firma MRB Sazovice, s.r.o., která již dlouhou dobu spolupracuje s univerzitou a disponuje zařízením pro řezání vodním paprskem, které je zobrazeno na obrázku 40.



Obr. 40 Zařízení pro řezání vodním paprskem

Parametry AWJM jsou uvedeny v tabulce 5. Toto zařízení je osazeno řeznou hlavou pro obrábění s přidavkem abraziva.

Tab. 5 Parametry WJM zařízení

Max. formát zpracovávaného materiálu	2000x3000mm
Max. tloušťka řezaného materiálu	až 120mm (záleží na druhu mat.)
Rozměrová a geometrická přesnost řezaných tvarů	až 0,1mm

Při řezání plastových vzorků vodním paprskem, byly použity řezné podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 Řezné podmínky vodního paprsku

Řezná rychlost [mm/min]	2500
Řezný tlak [bar]	2500
Množství abraziva [g/min]	80

Popis a parametry laseru ILS 3NM

Laserové zařízení ILS 3NM je vzhledem ke svému výkonu vhodné především pro značení a gravírování. Je ale také vhodné pro řezání plastů pryží, skla, kovu menších tlouštěk. Zdrojem laserového záření je CO₂. Laserová tiskárna má pojezdový stůl a prosklená otevírací dvířka. Laser ILS 3MN je kompatibilní s Windows a pracuje se s ním pomocí programu Corel Draw.



Obr. 41 Laser ILS 3NM

Laser ILS 3MN splňuje podmínky bezpečnosti třídy 1. Jeho parametry a vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 7.

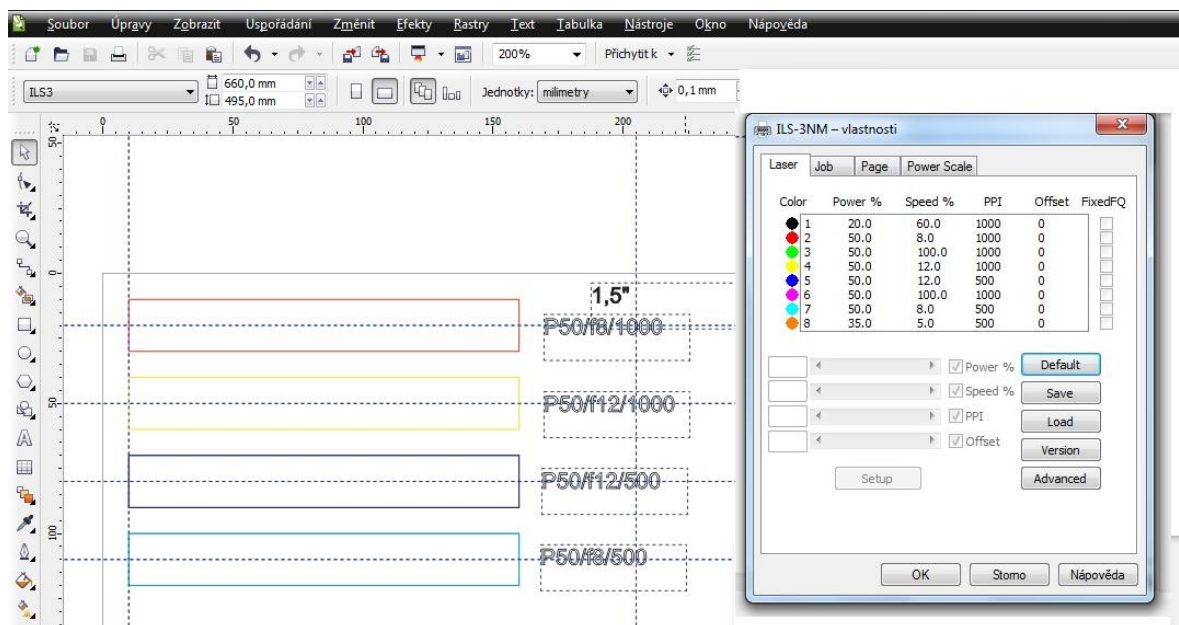
Tab. 7 Parametry laseru ILS 3NM [39]

Laser 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 1524 mm/sec
Řízení výkonu laseru	Nastavitelné od 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
Displej zobrazuje	seznam vzorů, síla laseru, gravírovací rychlost, čas průběhu, načtené soubory, nastavení a diagnostiku
Napájení	~110 / ~240 V
Chlazení	Vzduchové

Výroba vzorků pomocí laseru

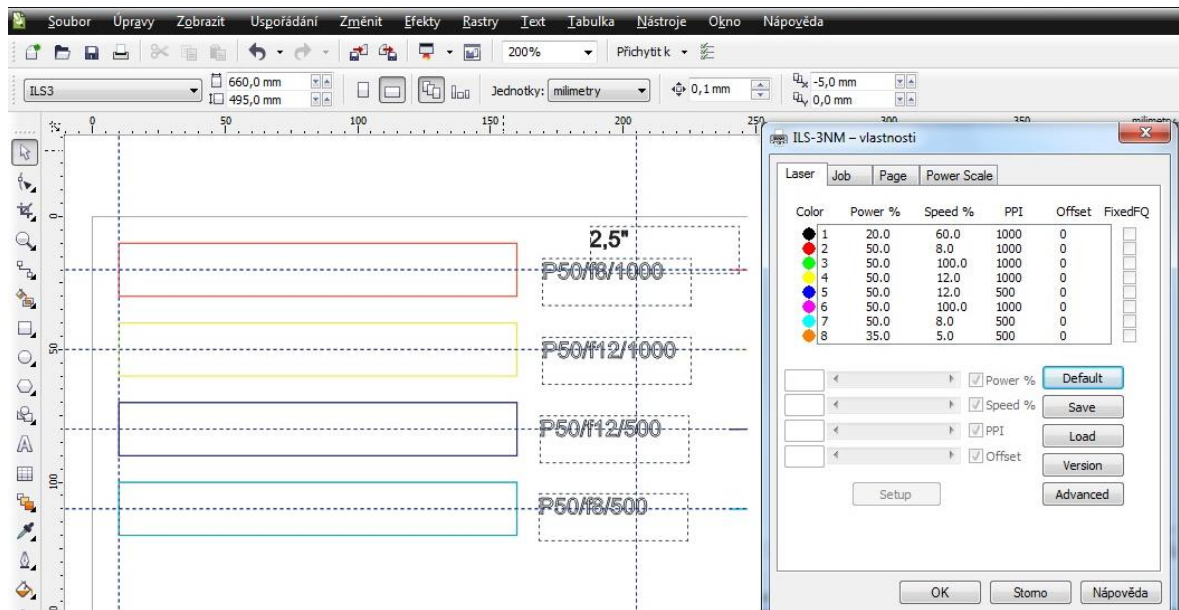
Vzorky pro testování byly vyrobeny na školním laboratorním laseru ILS 3NM. Rozměr a tvar zkušební vzorku byl navržen v grafickém programu Corel Draw, který komunikuje s laserovým zařízením. Rozměr zkušební vzorku byl 150 x 20 mm. Navržený tvar byl převeden na vlasový obrys a nastavila se barva, ke které se poté, ve vlastnostech tisku, přiřadily řezné parametry. Výkon P a posuv f se zadává v %. Parametr PPI určuje počet pulzů na palec.

Pro materiál *PMMA* byly testovány řezné podmínky, které jsou na obrázku 42. Tyto řezné podmínky byly použity pro ohniskovou vzdálenost 1,5". Z těchto řezných podmínek se poté vybíraly ty, které se jevíly jako optimální.



Obr. 42 Řezné podmínky PMMA pro čočku 1,5"

Pro řezání s ohniskovou vzdáleností 2,5" byly nastaveny stejné řezné podmínky jako pro ohniskovou vzdálenost 1,5" a to z důvodu, aby se dalo vyhodnotit, jestli má ohnisková vzdálenost vliv obrobenu plochu.



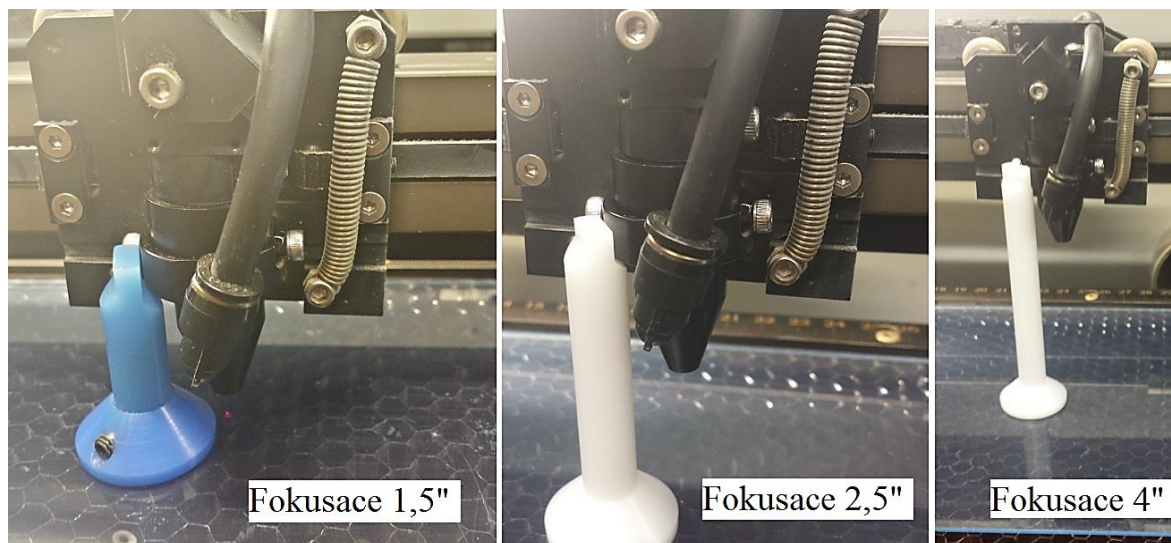
Obr. 43 Řezné podmínky PMMA s čočkou 2,5"

Pro čočku s fokusací 4" byly použity stejné řezné podmínky jako u čočky 2,5". Při stejných podmínkách, ale jiné ohniskové vzdálenosti nedošlo k proříznutí *PMMA*.

U zbylých materiálů se postupovalo stejným způsobem jako u *PMMA*, ale byla použita pouze čočka 1,5" a hledaly se optimální řezné podmínky, které se jeví jako:

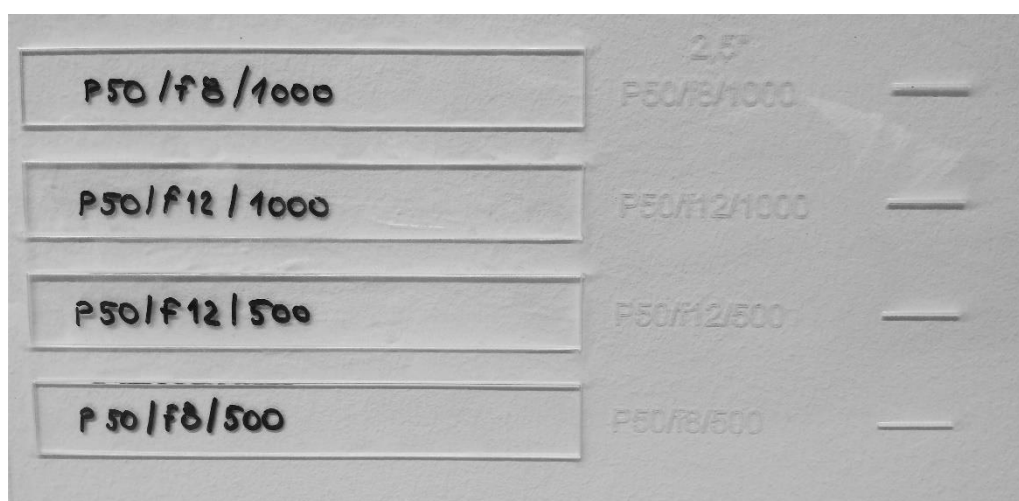
- PP – P85 / f7 / PPI 1000
- ABS – P70 / f7 / PPI 1000
- PC - ABS – P70 / f7 / PPI 1000

Při změně ohniskové vzdálenosti čočky (1,5", 2,5", 4"), nebo různé tloušťky materiálu se musí provést nastavení ohniskové vzdálenosti. To se provádí autofokusací (je možno ověřit pomocí fokusačního etalonu (obr. 44).



Obr. 44 Fokussace laseru

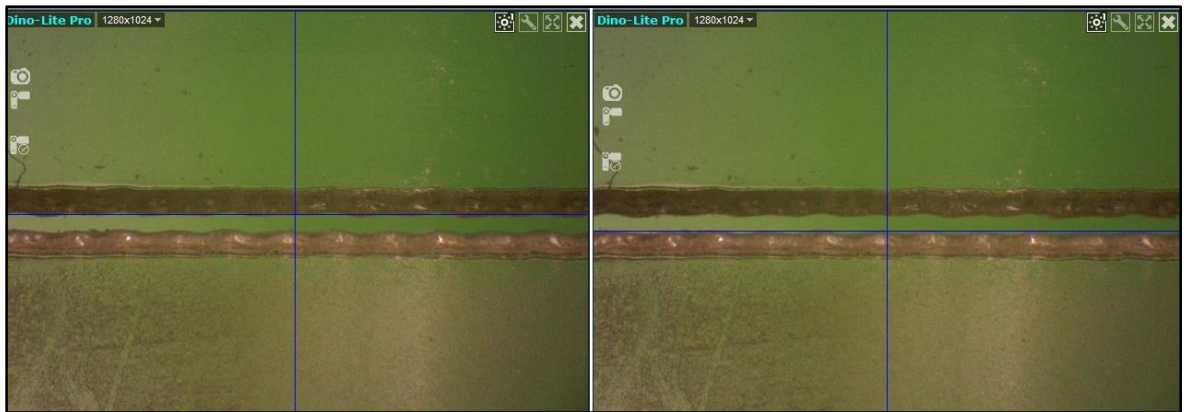
Po nastavení ohniskové vzdálenosti je možné zahájit pracovní proces. Na obrázku 45 jsou již vyrobené vzorky z *PMMA* při použití čočky s fokusací 2,5".



Obr. 45 Vzorky z *PMMA*

10 MĚŘENÍ ŠÍŘKY ŘEZU

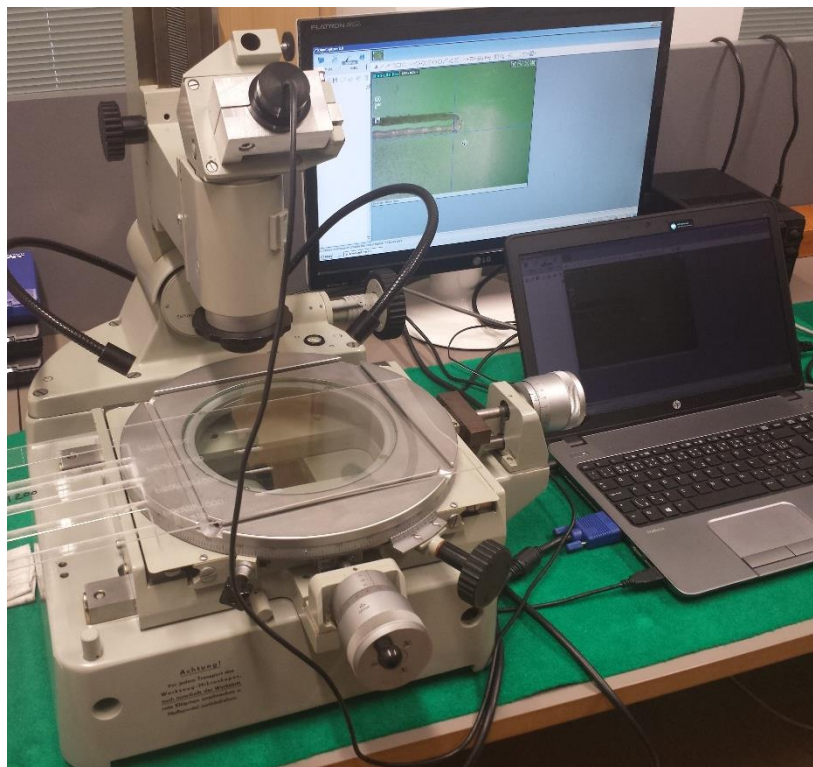
Vzorek s řezy byl umístěn na stůl mikroskopu, který má podélný a příčný posuv s přesností na setiny milimetru. Měření spočívalo v najetí osového kříže na horní kraj řezu a poté se zaměřil dolní kraj řezu. Šířka řezu byla určena jako rozdíl hodnot vzdálenosti horního a dolního kraje řezu.



Obr. 46 Zaměření šířky drážky

10.1 Příklad pro měření šířky řezu

Na mikroskopu Carl Zeiss s okulárovou kamerou AM423B byly naměřeny šířky řezů u *PMMA*. Tento mikroskop je vybaven okulárovou kamerou s třicetinasobným přiblížením. Kamera je připojena k počítači a spolupracuje s programem DinoCapture. Mikroskop je vybaven pojezdovým stolem, který se může posouvat v osách X, Y a zároveň může konat rotační pohyb kolem své osy.



Obr. 47 Mikroskop Carl Zeiss

Na obrázku 48 je zobrazen posuv stolku mikroskopu, jehož otočením o 360° se stolek posune o 1 mm.



Obr. 48 Ovládání posuvu mikroskopu

10.2 Vyhodnocení měření

U materiálu *PMMA* se testovalo, jestli má změna ohniskové vzdálenosti, při stejných řezných podmínkách, vliv na šířku řezu.

Šířka řezu při P50/f12/PPI1000

Nejprve byly použity řezné podmínky P50/f12/PPI1000 a ohniskové vzdálenosti 1,5", 2,5" a 4". Při použití ohniskové vzdálenosti 4" nedošlo k prořezání materiálu. Hodnoty šířky řezu pro ohniskovou vzdálenost 1,5" a 2,5" jsou uvedeny v tabulkách v příloze P I.

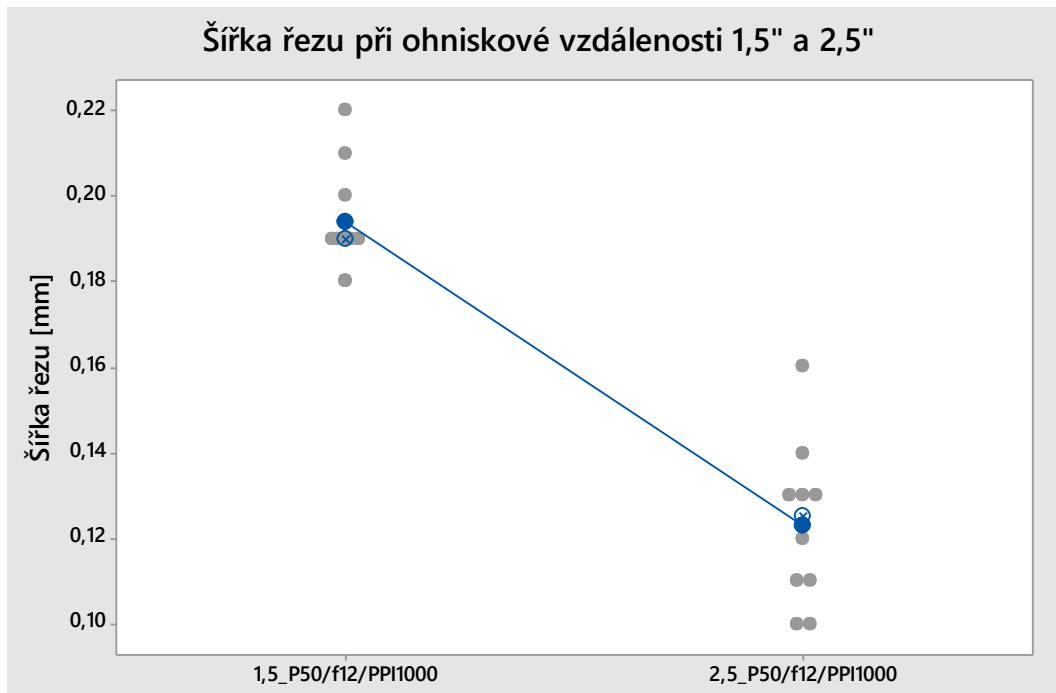
Statistika naměřených hodnot byla zpracována v programu Minitab (obr. 49).

Descriptive Statistics: 1,5_P50/f12/PPI1000; 2,5_P50/f12/PPI1000								
Variable	Total Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median
1,5_P50/f12/PPI1000	10	0,19400	0,00400	0,01265	6,52	0,18000	0,18750	0,19000
2,5_P50/f12/PPI1000	10	0,12300	0,00597	0,01889	15,35	0,10000	0,10750	0,12500
Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis		
1,5_P50/f12/PPI1000	0,20250	0,22000	0,04000	0,01500	1,10	0,79		
2,5_P50/f12/PPI1000	0,13250	0,16000	0,06000	0,02500	0,57	0,09		

Obr. 49 Statistika naměřených hodnot šířky řezu

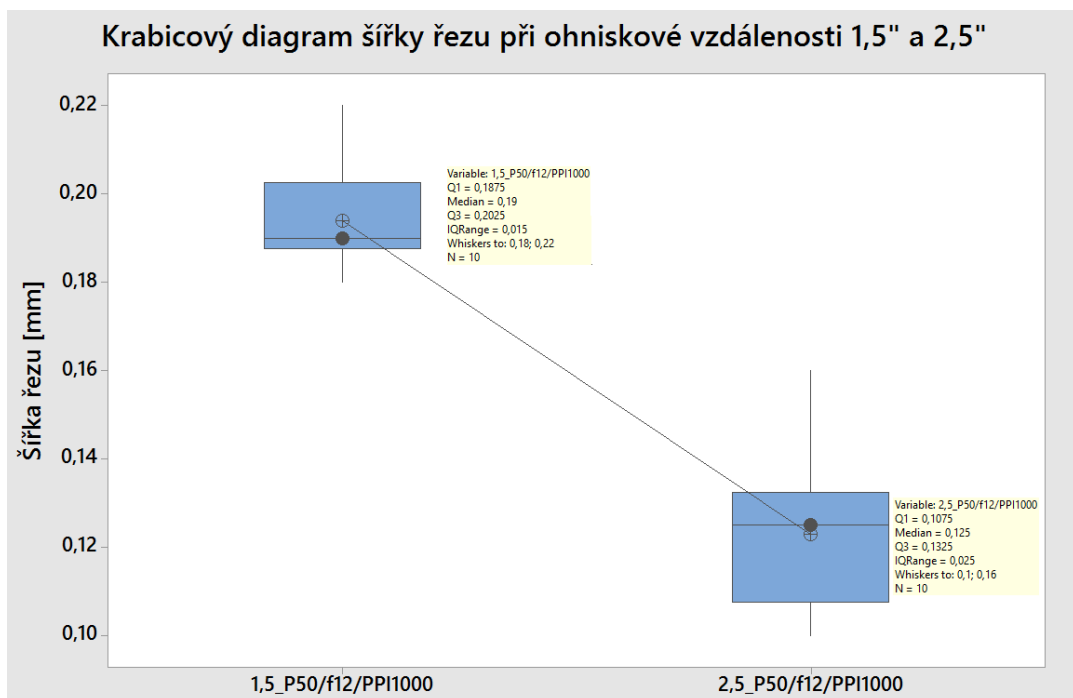
Průměrná šířka řezu pro ohniskovou vzdálenost 1,5" je 0,19 mm a pro ohniskovou vzdálenost 2,5" je 0,12 mm.

Diagram na obrázku 50 zobrazuje všechny naměřené hodnoty a jejich průměry, které jsou propojeny spojnici trendu.



Obr. 50 Diagram naměřených hodnot šířky řezu

Na obrázku 51 je vidět, že při zvětšení ohniskové vzdálenosti se zmenšila šířka řezu. To se ověřilo statisticky pomocí testů.



Obr. 51 Krabicový diagram šířky řezu

F-test:

Nejprve bylo nutné zjistit, zda jsou hodnoty rozptylu stejné pro ohniskovou vzdálenost 1,5" a 2,5".

$$H_0: \delta_{1,5_P50/f12/PPI1000}^2 = \delta_{2,5_P50/f12/PPI1000}^2 \quad (1)$$

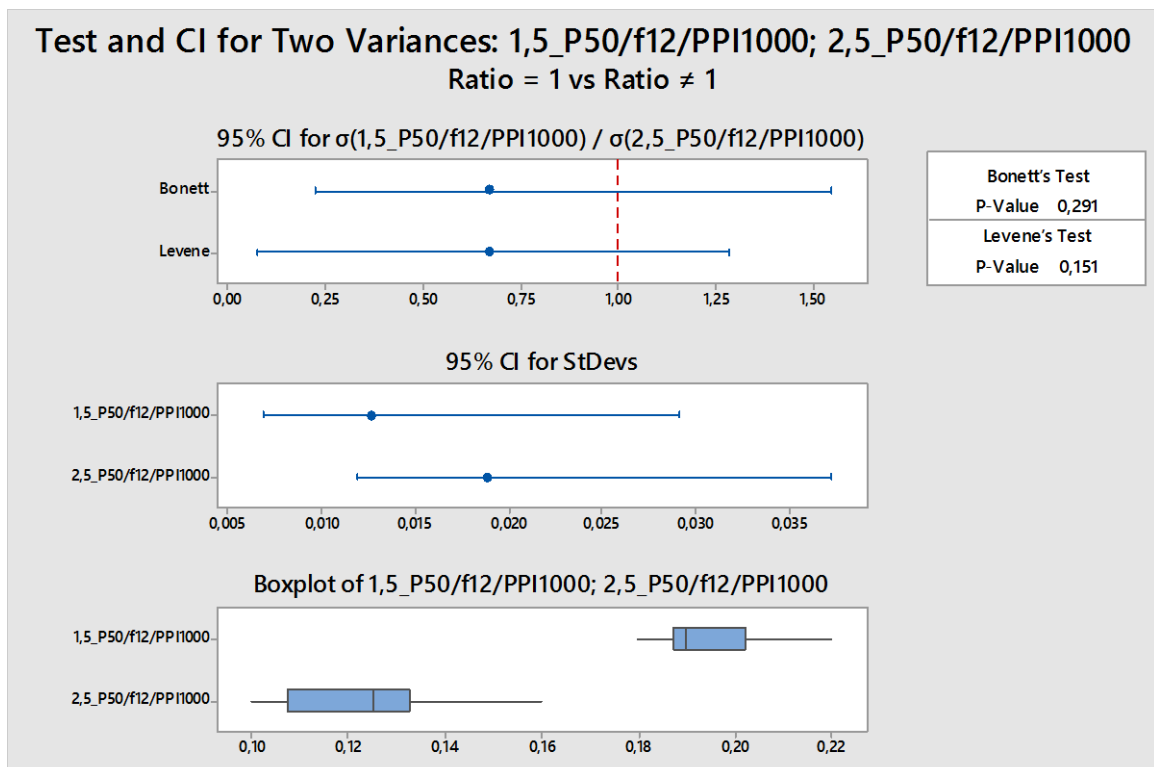
$$H_A: \delta_{1,5_P50/f12/PPI1000}^2 \neq \delta_{2,5_P50/f12/PPI1000}^2 \quad (2)$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,291 > \alpha = 0,050$$

Hodnota P byla získána provedením f-testu v programu Minitab (obr. 52).

Nezamítám H_0 a předpokládám stejné rozptyly.



Obr. 52 F-test šířky řezu

Two-Sample T-Test and CI: 1,5_P50/f12/PPI1000; 2,5_P50/f12/PPI1000				
Two-sample T for 1,5_P50/f12/PPI1000 vs 2,5_P50/f12/PPI1000				
	N	Mean	StDev	SE Mean
1,5_P50/f12/PPI1000	10	0,1940	0,0126	0,0040
2,5_P50/f12/PPI1000	10	0,1230	0,0189	0,0060
Difference = μ (1,5_P50/f12/PPI1000) - μ (2,5_P50/f12/PPI1000)				
Estimate for difference: 0,07100				
95% CI for difference: (0,05590; 0,08610)				
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 9,88 P-Value = 0,000 DF = 18				
Both use Pooled StDev = 0,0161				

Obr. 53 T-test šířky řezu

T-test

Liší se šířka řezu pro ohniskové vzdálenosti 1,5" a 2,5" při řezných podmínkách P50/f12/PPI1000 statisticky významně?

Nutné bylo počítat s výsledkem f-testu, tedy s předpokladem stejných rozptylů.

$$H_0: \mu_{1,5_P50/f12/PPI1000} = \mu_{2,5_P50/f12/PPI1000} \quad (3)$$

$$H_A: \mu_{1,5_P50/f12/PPI1000} \neq \mu_{2,5_P50/f12/PPI1000} \quad (4)$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,000 < \alpha = 0,050$$

Hodnota P byla získána provedením t-testu v programu Minitab (obr. 53).

Zamítám H_0 ve prospěch H_A . Test prokázal, že ohnisková vzdálenost při řezných podmínkách P50/f12/PPI1000 má statisticky významný vliv na šíři řezu.

Šířka řezu při P50/f8/PPI500

Při druhém měření byly řezné podmínky P50/f8/PPI500. Řezáno bylo při ohniskové vzdálenosti 1", 2,5" a 4". Při ohniskové vzdálenosti 4" opět nedošlo k proříznutí materiálu.

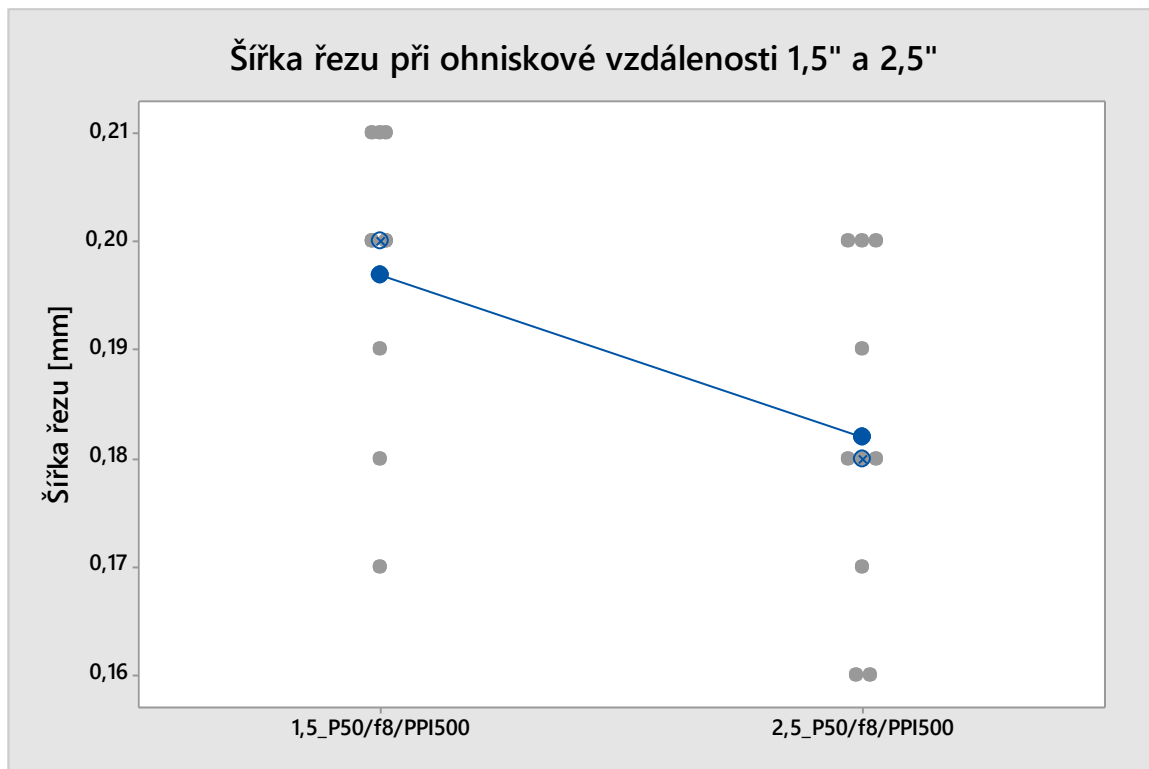
Ze statistiky na obrázku 54 je vidět, že průměrná šířka drážky pro ohniskovou vzdálenost 1,5" je 0,20 mm se směrodatnou odchylkou 0,013 mm a pro ohniskovou vzdálenost 2,5" je průměrná šířka řezu 0,18 mm s odchylkou 0,016 mm.

Descriptive Statistics: 1,5_P50/f8/PPI500; 2,5_P50/f8/PPI500									
Variable	Total		Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median
	Count								
1,5_P50/f8/PPI500	10		0,19700	0,00423	0,01337	6,79	0,17000	0,18750	0,20000
2,5_P50/f8/PPI500	10		0,18200	0,00490	0,01549	8,51	0,16000	0,16750	0,18000

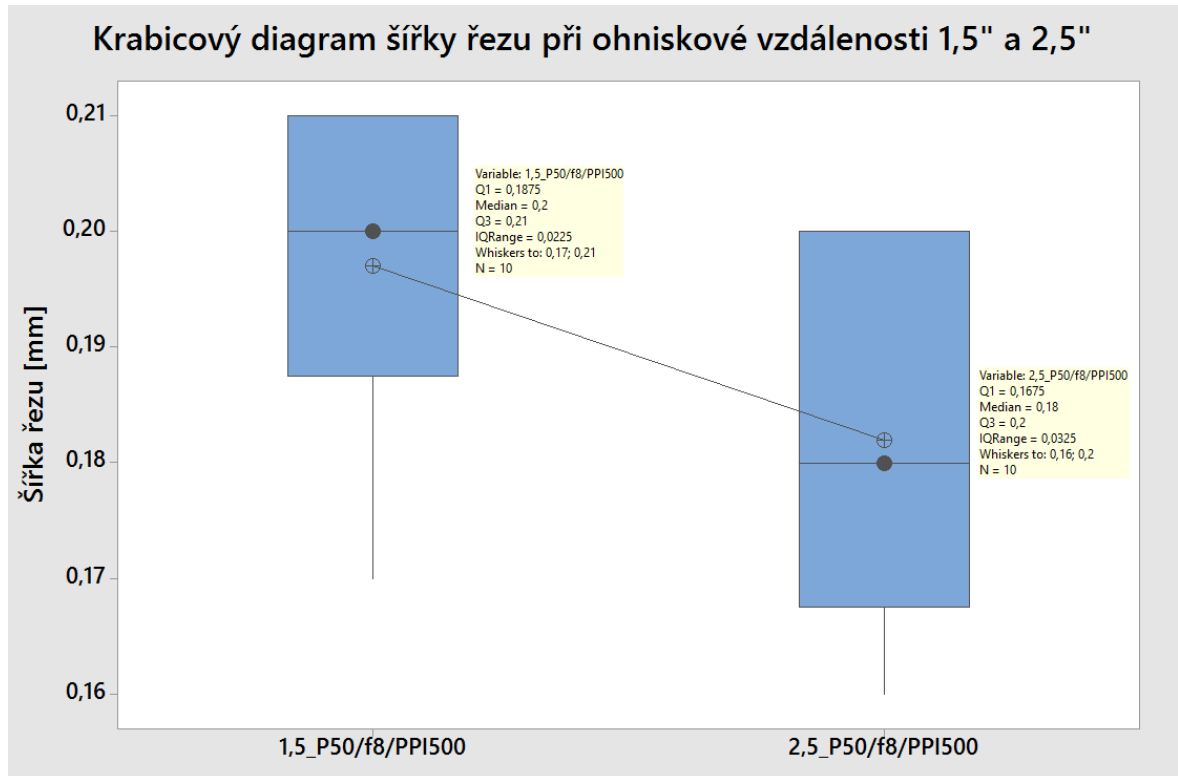
Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis
1,5_P50/f8/PPI500	0,21000	0,21000	0,04000	0,02250	-1,06	0,46
2,5_P50/f8/PPI500	0,20000	0,20000	0,04000	0,03250	-0,19	-1,28

Obr. 54 Statistika hodnot šířky řezu pro P50/f8/PPI500

Diagram na obrázku 55 zobrazuje všechny naměřené hodnoty a průměry, které jsou propojeny spojnici trendu. Je také patrný větší rozptyl měření.



Obr. 55 Diagram naměřených hodnot pro P50/f8/PPI500



Obr. 56 Šířky řezu pro P50/f8/PPI1500

F-test

Nejprve bylo nutné zjistit, zda jsou hodnoty rozptylu stejné pro ohniskovou vzdálenost 1,5" a 2,5".

$$H_0: \delta_{1,5_P50/f8/PPI500}^2 = \delta_{2,5_P50/f8/PPI500}^2 \quad (5)$$

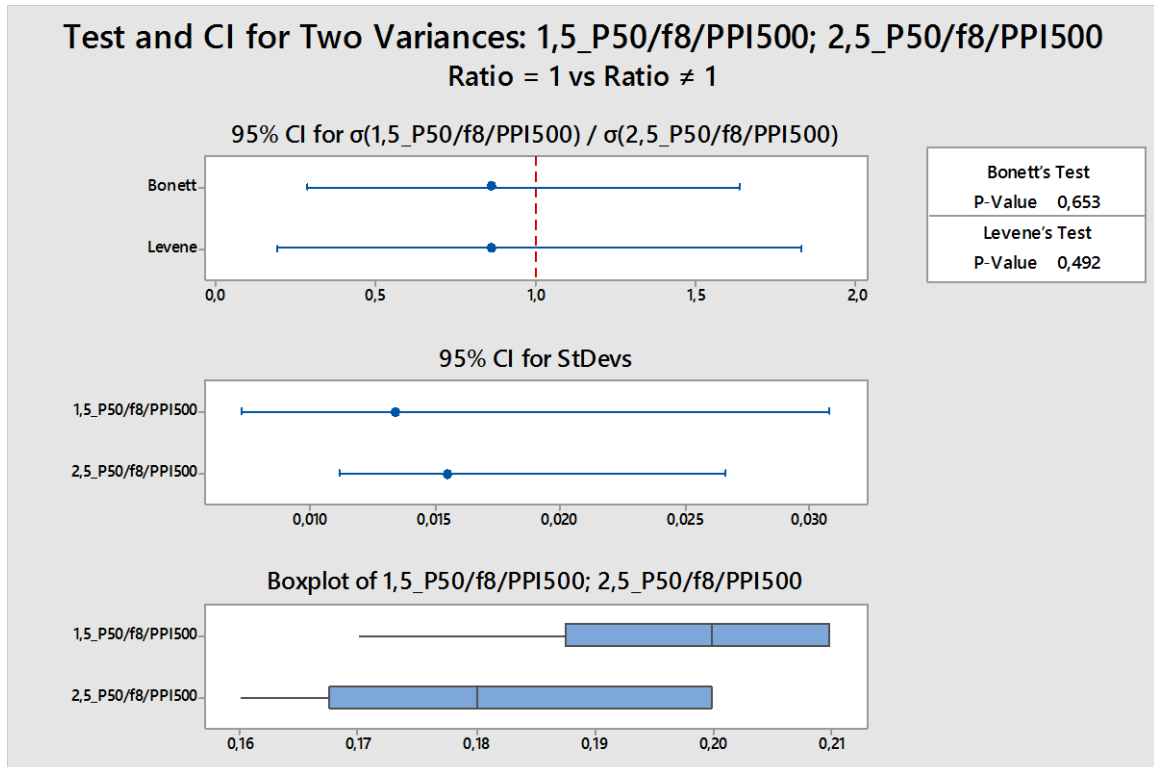
$$H_A: \delta_{1,5_P50/f8/PPI500}^2 \neq \delta_{2,5_P50/f8/PPI500}^2 \quad (6)$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,653 > \alpha = 0,050$$

Hodnota P byla získána provedením f-testu v programu Minitab (obr. 57).

Nezamítám H_0 a předpokládám stejné rozptyly.



Obr. 57 F-test šířky řezu pro P50/f8/PPI500

T-test

Liší se šířka řezu pro ohniskové vzdálenosti 1,5" a 2,5" při řezných podmínkách P50/f8/PPI500 statisticky významně?

Nutné bylo počítat s výsledkem f-testu, tedy s předpokladem stejných rozptylů.

$$H_0: \mu_{1_P50/f8/PPI500} = \mu_{2,5_P50/f8/PPI500} \quad (7)$$

$$H_A: \mu_{1_P50/f8/PPI500} \neq \mu_{2,5_P50/f8/PPI500} \quad (8)$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$P = 0,032 < \alpha = 0,050$$

Hodnota P byla získána provedením t-testu v programu Minitab (obr. 58).

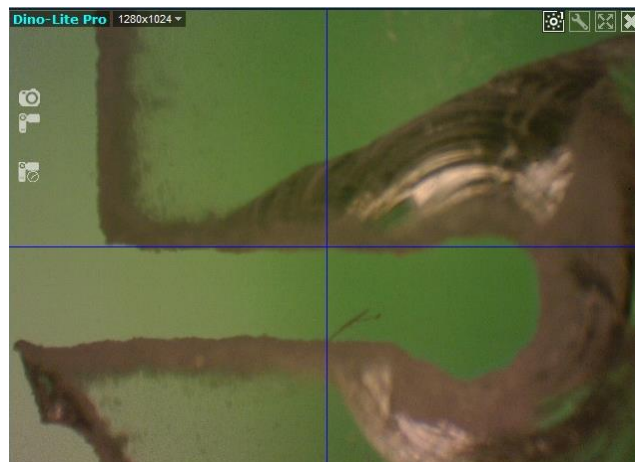
Zamítám H_0 ve prospěch H_A . Test prokázal, že ohnisková vzdálenost při řezných podmínkách P50/f8/PPI500 má statistický významný vliv na šíři řezu. Tento vliv je ale menší, než při použití řezných podmínek P50/f12/PPI1000.

Two-Sample T-Test and CI: 1,5_P50/f8/PPI500; 2,5_P50/f8/PPI500				
Two-sample T for 1,5_P50/f8/PPI500 vs 2,5_P50/f8/PPI500				
	N	Mean	StDev	SE Mean
1,5_P50/f8/PPI500	10	0,1970	0,0134	0,0042
2,5_P50/f8/PPI500	10	0,1820	0,0155	0,0049
Difference = μ (1,5_P50/f8/PPI500) - μ (2,5_P50/f8/PPI500)				
Estimate for difference: 0,01500				
95% CI for difference: (0,00140; 0,02860)				
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 2,32 P-Value = 0,032 DF = 18				
Both use Pooled StDev = 0,0145				

Obr. 58 T-test šířky řezu pro P50/f8/PPI500

Šířka řezu vodního paprsku

Šířka řezu vodního paprsku byla určena stejně jako u řezu laserem.



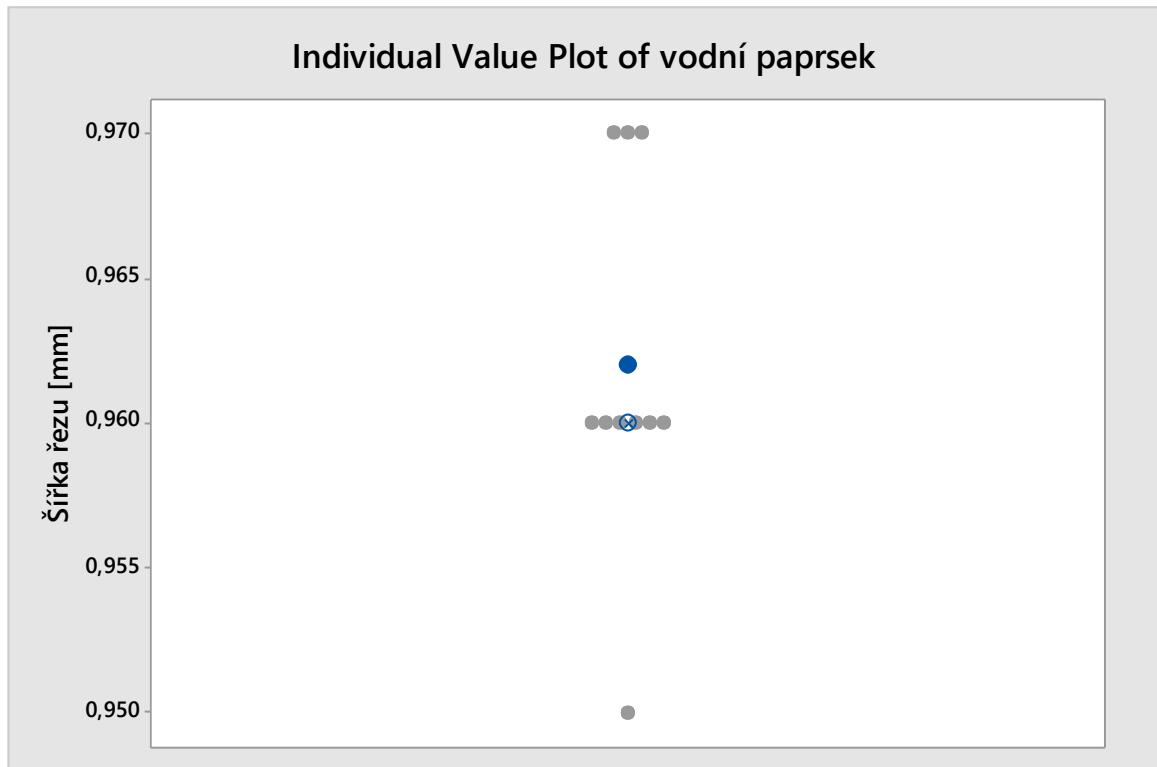
Obr. 59 Řez vodního paprsku

Statistika naměřených hodnot je na obrázku 60. Průměrná šířka řezu vodního paprsku byla 0,96 mm se směrodatnou odchylkou 0,006 mm. Minimální naměřená hodnota šířky řezu byla 0,95 mm, maximální naměřená hodnota byla 0,97 mm.

Descriptive Statistics: vodní paprsek									
Variable	Total Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
vodní paprsek	10	0,96200	0,00200	0,00632	0,66	0,95000	0,96000	0,96000	0,97000
Variable	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis				
vodní paprsek	0,97000	0,02000	0,01000	-0,13	0,18				

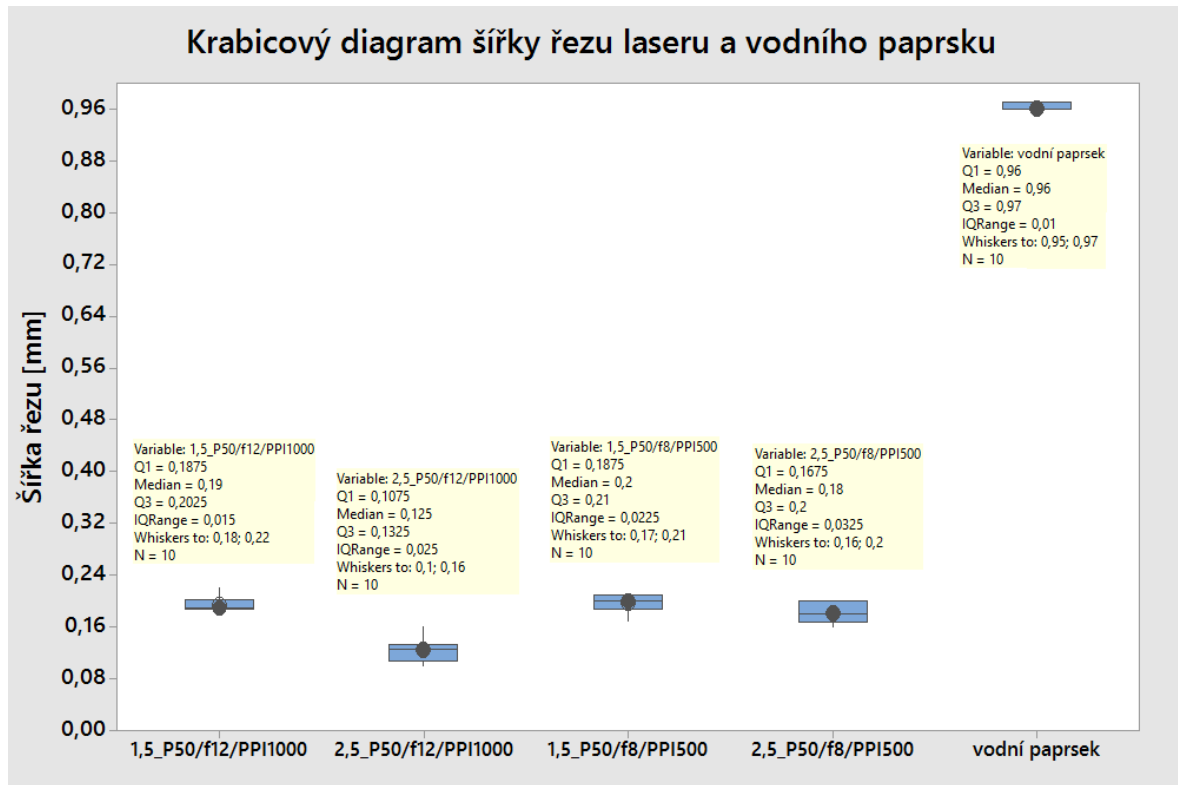
Obr. 60 Statistika naměřených hodnot šířky řezu vodního paprsku

Diagram na obrázku 61 zobrazuje všechny naměřené hodnoty šířky řezu vodního paprsku. Je vidět, že to rozměr vzorku byl přesný a odchylky byly minimální.



Obr. 61 Diagram naměřených hodnot šířky řezu vodního paprsku

Na obrázku 62 je zobrazeno porovnání šířky řezu vodního paprsku oproti laseru s různým výkonem a ohniskovou vzdáleností. Je vidět, že šířka vodního paprsku dosahovala téměř jednoho milimetru, zatímco šířka řezu laseru při různých výkonech i ohniskových vzdálenostech se pohybovala v řádech desetin milimetru.



Obr. 62 Šířka řezu laseru a vodního paprsku

11.2 Vyhodnocení měření

Polypropylen

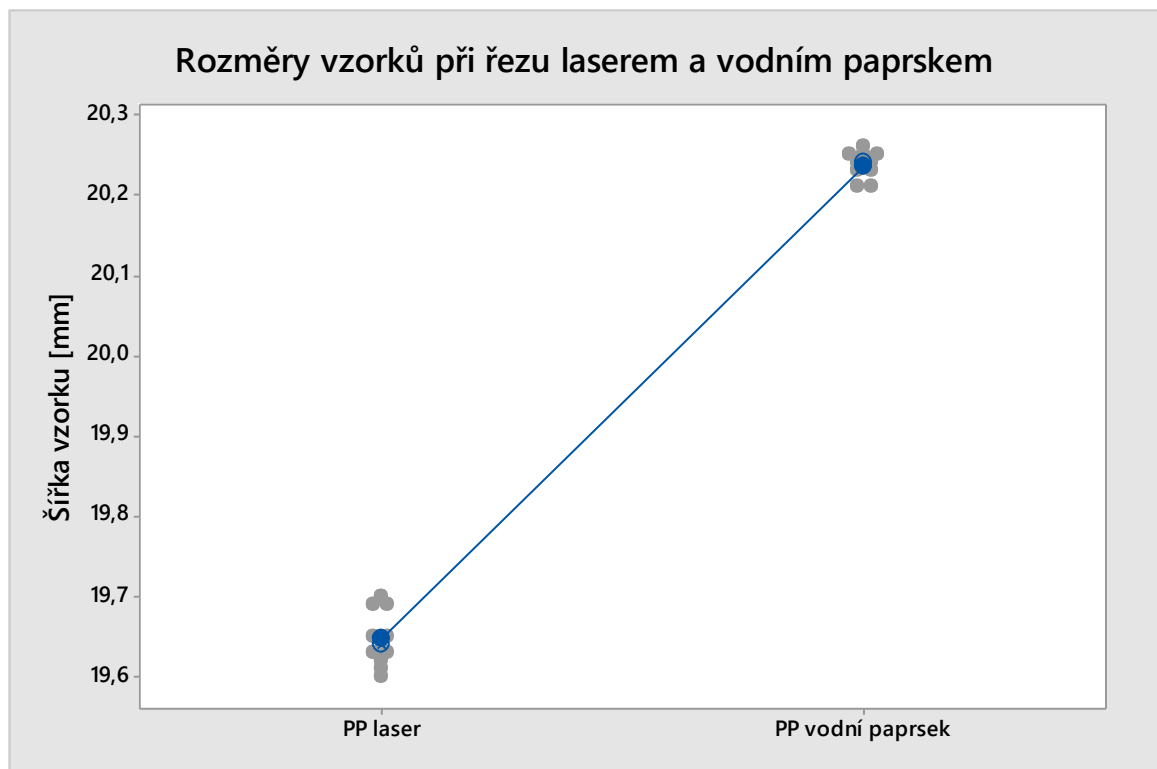
U materiálu *PP* byla průměrná šířka vzorku řezaného laserem 19,65 mm se směrodatnou odchylkou 0,036 mm. Průměrná šířka vzorku řezaného vodním paprskem byla 20,24 se směrodatnou odchylkou 0,017 mm.

Descriptive Statistics: PP laser; PP vodní paprsek									
Variable	Total					Minimum	Q1	Median	Q3
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar				
PP laser	10	19,647	0,0113	0,0356	0,18	19,600	19,618	19,640	19,690
PP vodní paprsek	10	20,237	0,00539	0,0170	0,08	20,210	20,225	20,240	20,250

Variable	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis
PP laser	19,700	0,100	0,0725	0,38	-1,33
PP vodní paprsek	20,260	0,0500	0,0250	-0,60	-0,62

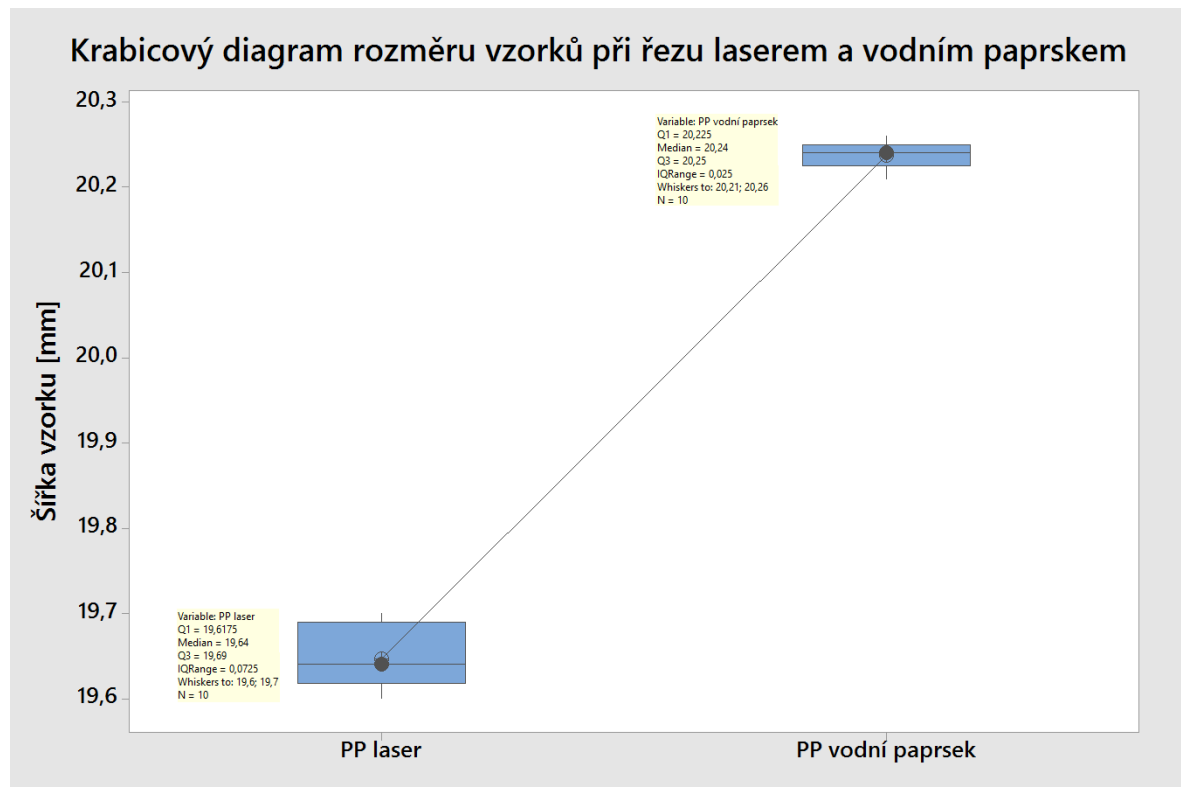
Obr. 65 Statistika rozměrů *PP*

Diagram na obrázku 66 zobrazuje všechny naměřené hodnoty a jejich průměr, který je spojen spojnicí trendu.



Obr. 66 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku *PP*

Z diagramu na obrázku 67 je vidět, že při řezání *PP* laserem byl rozměr vzorku menší než nadefinovaná hodnota a rozptyl měření byl větší než při řezání vodním paprskem. Naopak při řezání *PP* vodním paprskem byl vzorek širší než nadefinovaný rozměr, ale rozptyl šířky vzorku byl menší.



Obr. 67 Rozměry vzorků *PP*

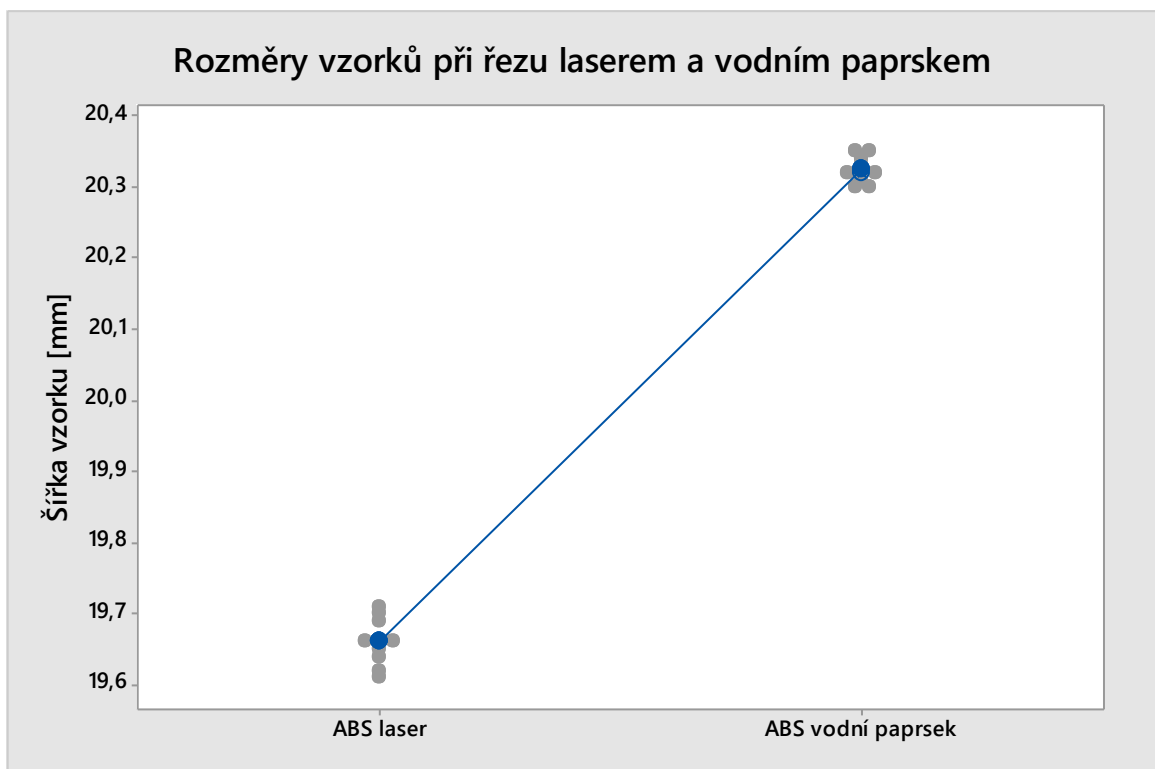
Akrylonitrilbutadienstyren

Statistika měření při řezání ABS je znázorněna na obrázku 68. Průměrná hodnota šířky vzorku při řezání laserem byla 19,66 mm se směrodatnou odchylkou 0,033 mm. Průměrná hodnota při řezání vodním paprskem byla 20,32 mm se směrodatnou odchylkou 0,018 mm.

Descriptive Statistics: ABS laser; ABS vodní paprsek									
Variable	Total								
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
ABS laser	10	19,660	0,0103	0,0327	0,17	19,610	19,635	19,660	19,693
ABS vodní paprsek	10	20,324	0,00581	0,0184	0,09	20,300	20,307	20,320	20,343
Variable	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis				
ABS laser	19,710	0,100	0,0575	0,07	-0,77				
ABS vodní paprsek	20,350	0,0500	0,0350	0,20	-1,12				

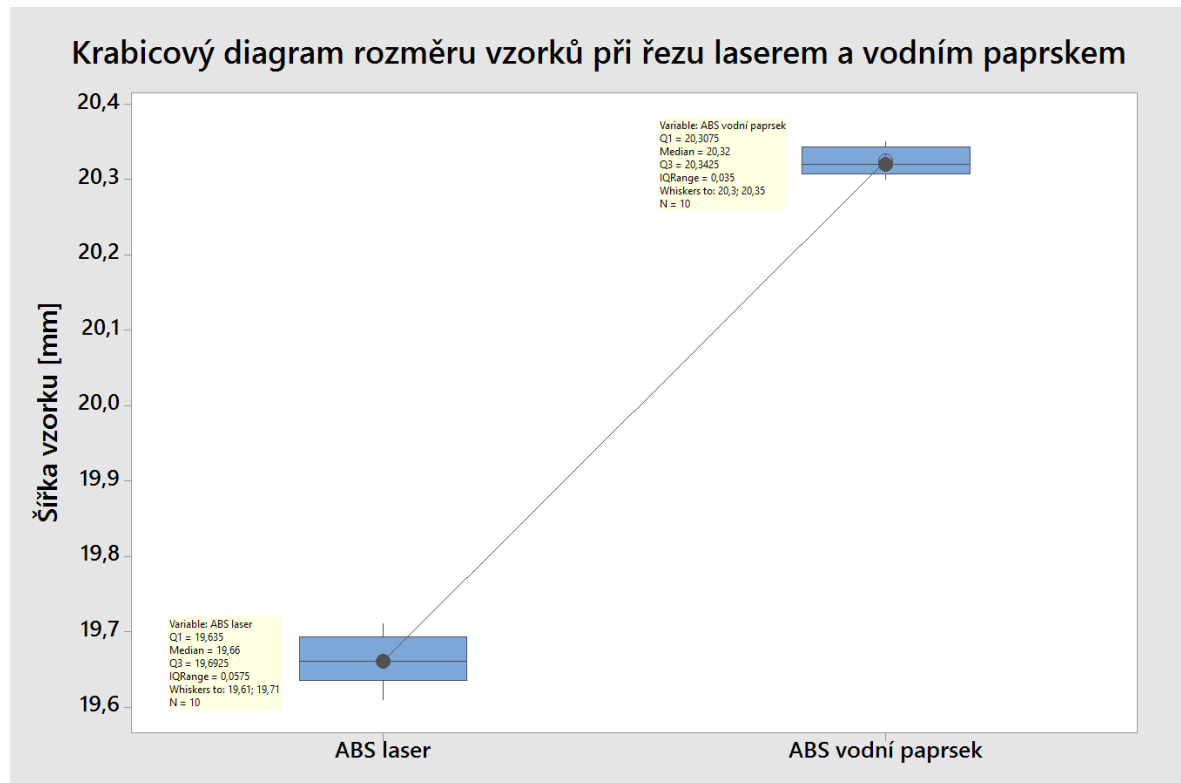
Obr. 68 Statistika rozměrů ABS

Naměřené hodnoty rozměru ABS vyrobeného laserem a vodním paprskem jsou v diagramu na obrázku 69.



Obr. 69 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku ABS

Z diagramu na obrázku 70 je patrné, že při řezání ABS laserem byl vzorek menší než nadefinovaný rozměr a rozměr vzorku měl větší rozptyl. Při řezání ABS vodním paprskem měl vzorek větší šířku než nadefinovaný rozměr a rozptyl šířky vzorku byl menší.



Obr. 70 Rozměry vzorků ABS

Polykarbonát – Akrylonitrilbutadienstyren

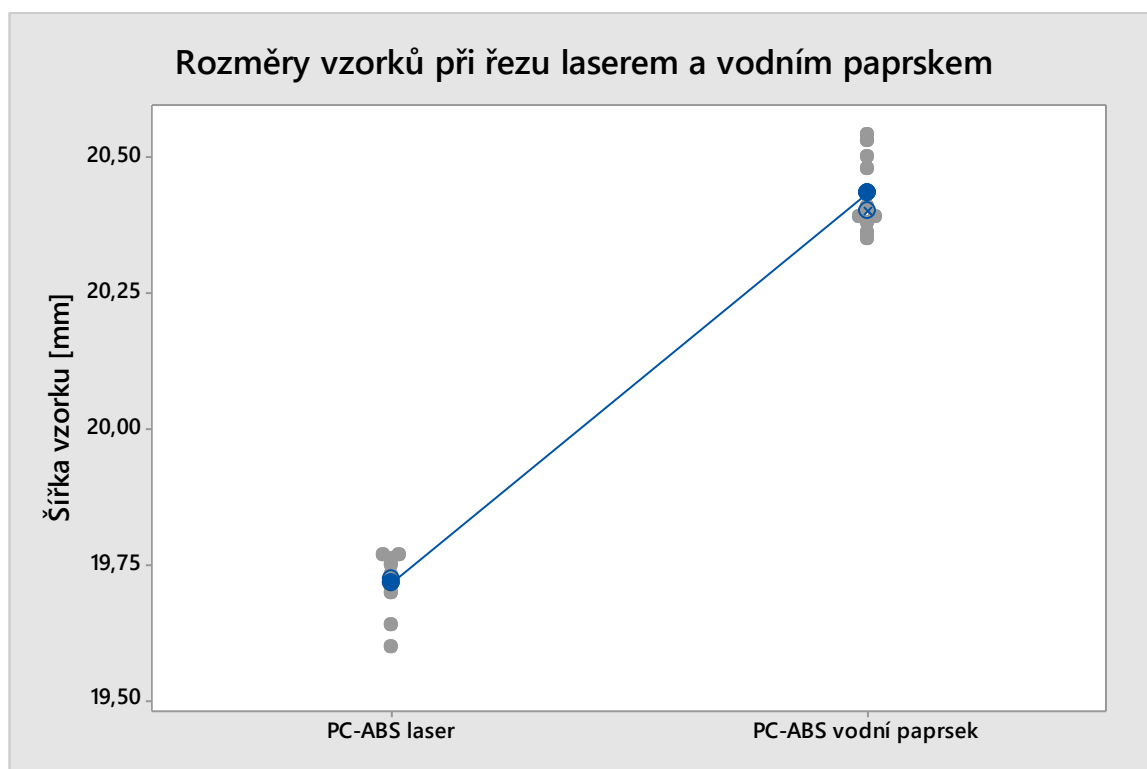
Na obrázku 71 je zobrazena statistika rozměru vzorku *PC-ABS* řezaného laserem a vodním paprskem. Při řezání laserem byla průměrná šířka vzorku 19,72 mm se směrodatnou odchylkou 0,056 mm. Při řezání *PC-ABS* vodním paprskem byla průměrná šířka vzorku 20,43 mm a směrodatná odchylka 0,072 mm.

Descriptive Statistics: PC-ABS laser; PC-ABS vodní paprsek									
Variable	Total								
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	
PC-ABS laser	10	19,715	0,0178	0,0564	0,29	19,600	19,685	19,725	
PC-ABS vodní paprsek	10	20,433	0,0228	0,0721	0,35	20,350	20,375	20,400	

Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis
PC-ABS laser	19,762	19,770	0,170	0,0775	-1,14	0,63
PC-ABS vodní paprsek	20,508	20,540	0,190	0,133	0,47	-1,63

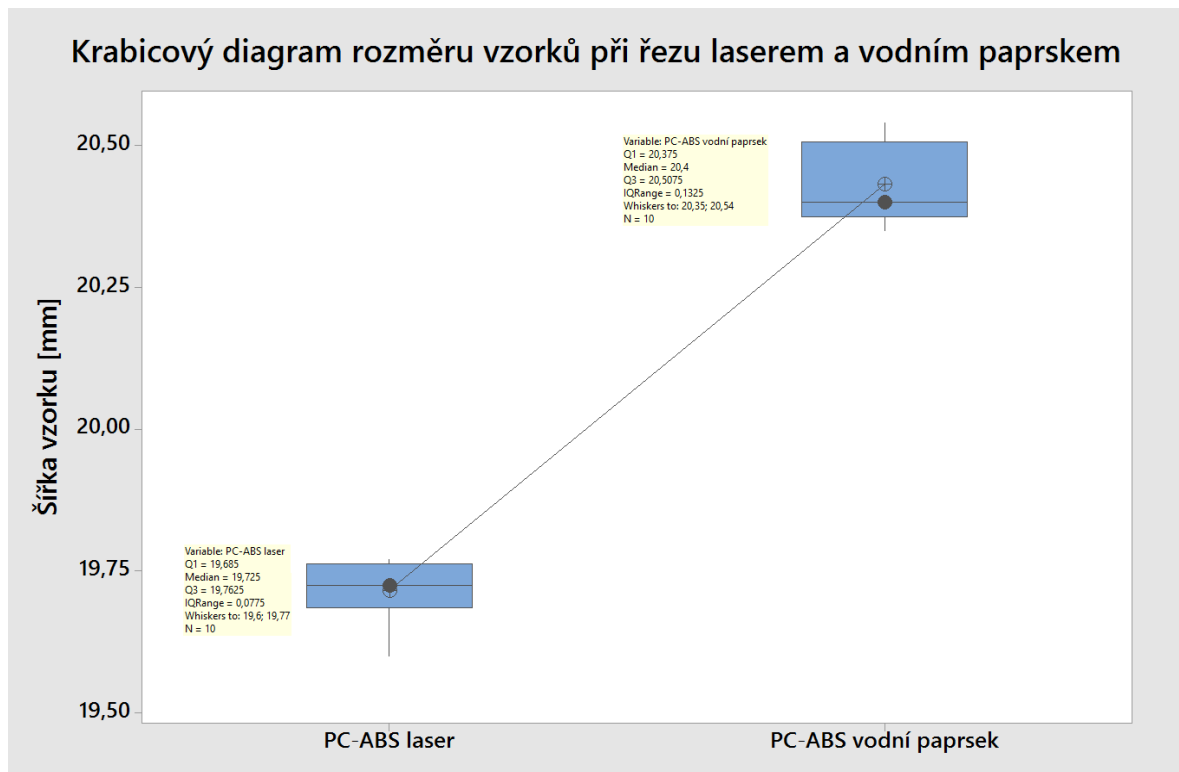
Obr. 71 Statistika rozměrů *PC-ABS*

Hodnoty rozměrů *PC-ABS* jsou zobrazeny v diagramu na obrázku 72.



Obr. 72 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku *PC-ABS*

Z diagram na obrázku 73 plyne, že při řezání *PC-ABS* laserem byl vzorek menší než nadefinovaný rozměr. Naopak při řezání *PC-ABS* vodním paprskem byl vzorek větší až o 0,5 mm než nadefinovaný rozměr. Rozptyl šířky řezu byl větší při řezání vodním paprskem oproti řezání laserem.



Obr. 73 Rozměry vzorků *PC-ABS*

PMMA P50/f12/PPI1000

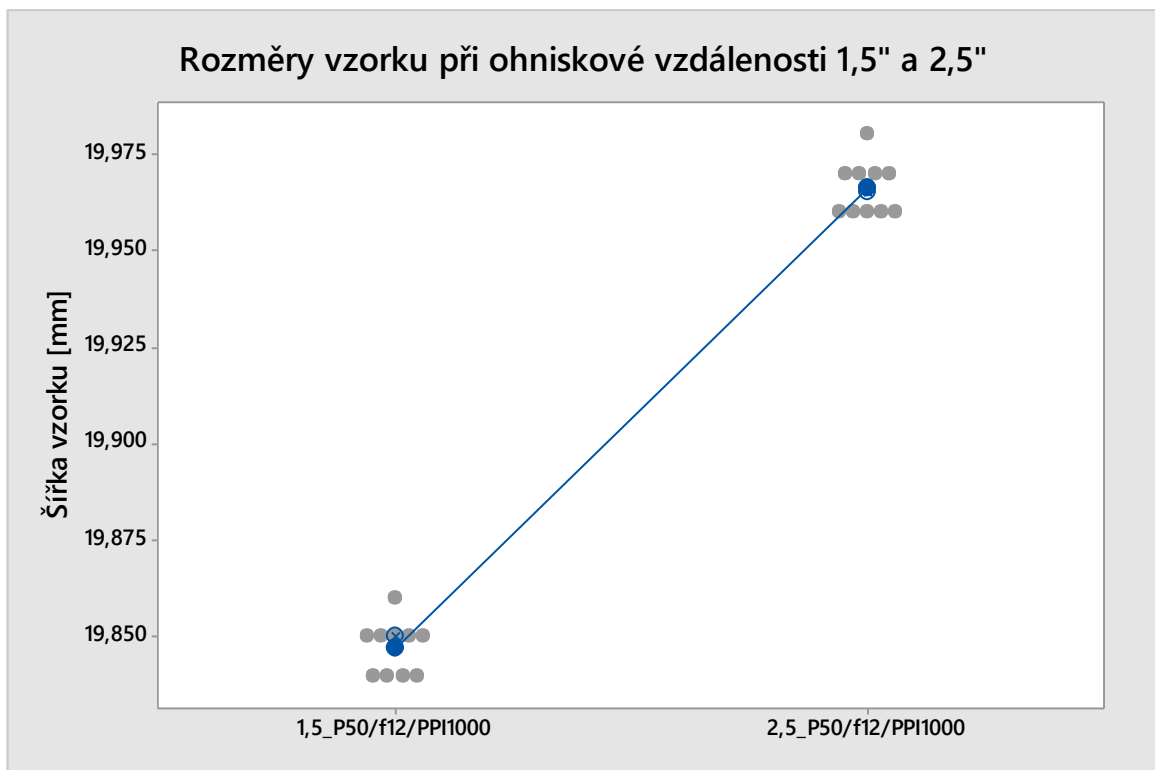
Obrázek 74 zobrazuje statistiku naměřených hodnot rozměrů vzorku při ohniskové vzdálenosti 1,5" a 2,5". Při použití ohniskové vzdálenosti 1,5" byla průměrná šířka vzorku 19,85 mm s odchylkou 0,007 mm. U ohniskové vzdálenosti 2,5" byla průměrná šířka vzorku 19,97 mm s odchylkou 0,007 mm.

Descriptive Statistics: 1,5_P50/f12/PPI1000; 2,5_P50/f12/PPI1000								
Variable	Total							
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median
1,5_P50/f12/PPI1000	10	19,847	0,00213	0,00675	0,03	19,840	19,840	19,850
2,5_P50/f12/PPI1000	10	19,966	0,00221	0,00699	0,04	19,960	19,960	19,965

Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis
1,5_P50/f12/PPI1000	19,850	19,860	0,0200	0,0100	0,43	-0,28
2,5_P50/f12/PPI1000	19,970	19,980	0,0200	0,0100	0,78	-0,15

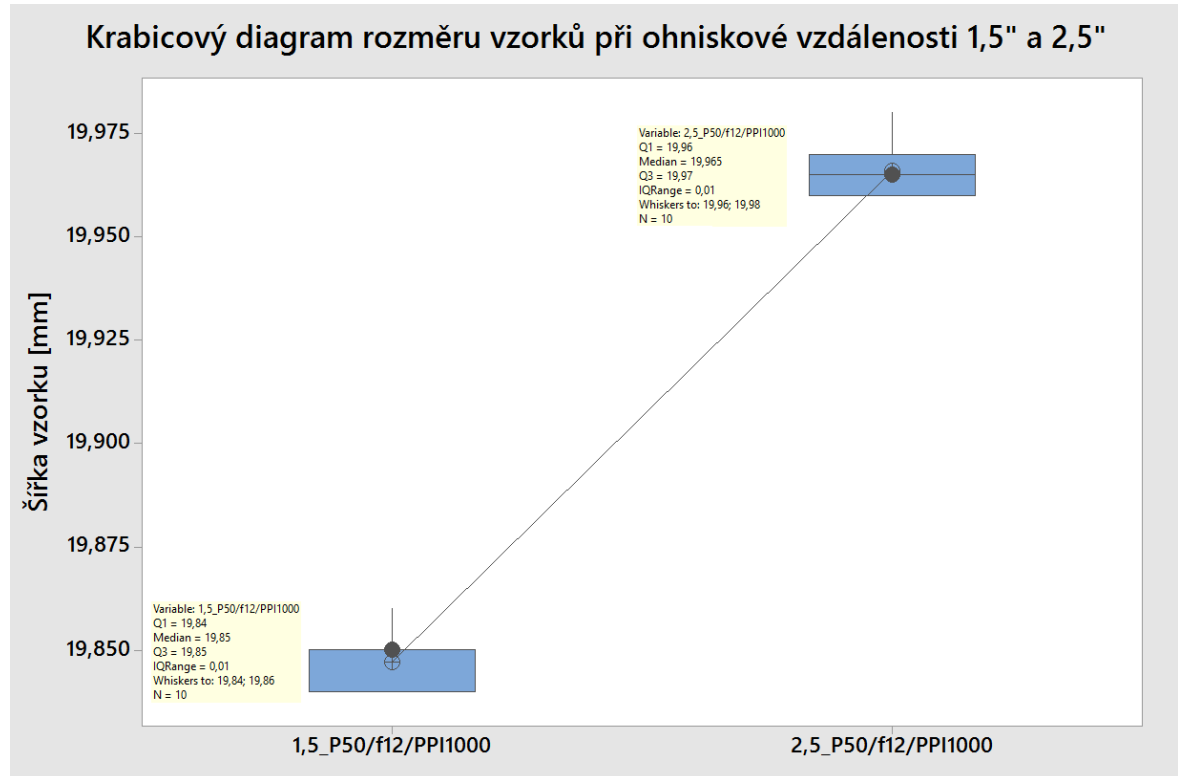
Obr. 74 Statistika rozměrů PMMA

Naměřené hodnoty rozměrů PMMA jsou zaznamenány v diagramu na obrázku 75.



Obr. 75 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku PMMA

Z diagramu na obrázku 76 je vidět, že při použití řezných podmínek P50/f12/PPI1000 a ohniskové vzdálenosti 2,5" je vzorek přesnější než při použití ohniskové vzdálenosti 1,5" při stejných řezných podmínkách.



Obr. 76 Rozměry vzorků PMMA

PMMA P50/f8/PPI500

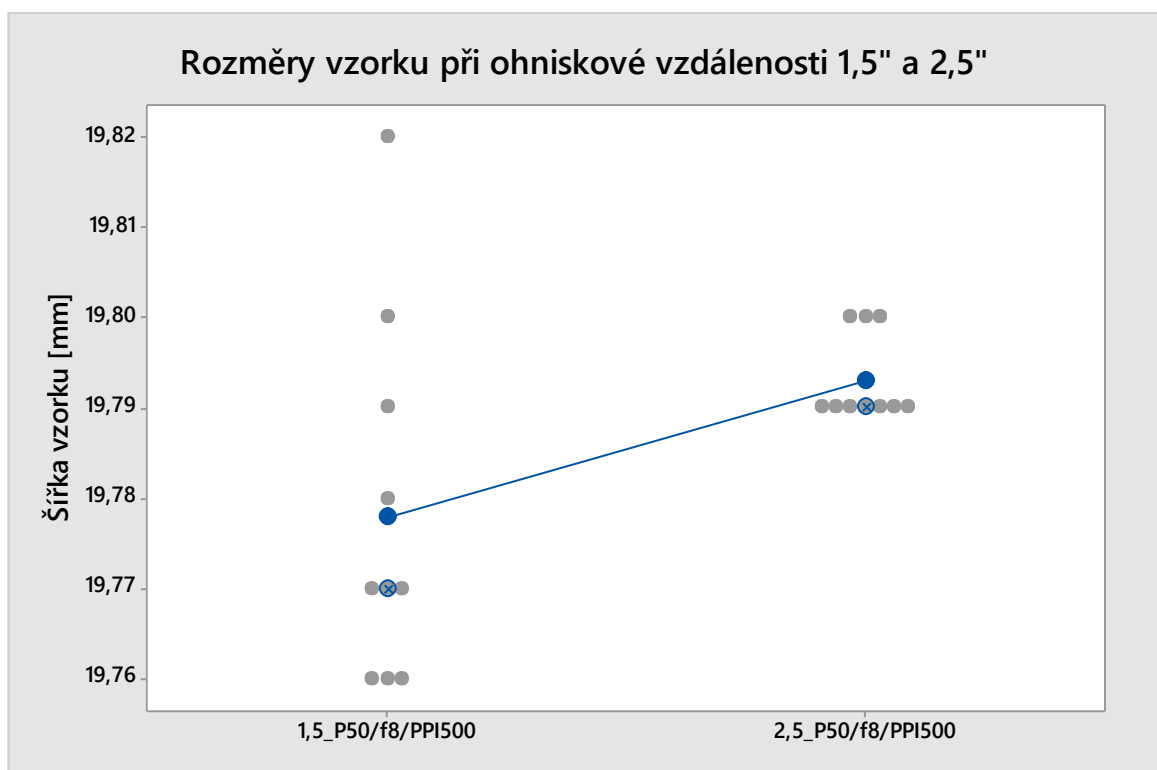
Při použití ohniskové vzdálenosti 1,5" byla průměrná šířka vzorku 19,78 mm se směrodatnou odchylkou 0,02 mm. U ohniskové vzdálenosti 2,5" byla průměrná šířka vzorku 19,79 mm a odchylka měření byla 0,005 mm.

Descriptive Statistics: 1,5_P50/f8/PPI500; 2,5_P50/f8/PPI500									
Variable	Total								
	Count	Mean	SE Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
1,5_P50/f8/PPI500	10	19,778	0,00629	0,0199	0,10	19,760	19,760	19,770	19,793
2,5_P50/f8/PPI500	10	19,793	0,00153	0,00483	0,02	19,790	19,790	19,790	19,800

Variable	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis
1,5_P50/f8/PPI500	19,820	0,0600	0,0325	1,19	0,81
2,5_P50/f8/PPI500	19,800	0,0100	0,0100	1,04	-1,22

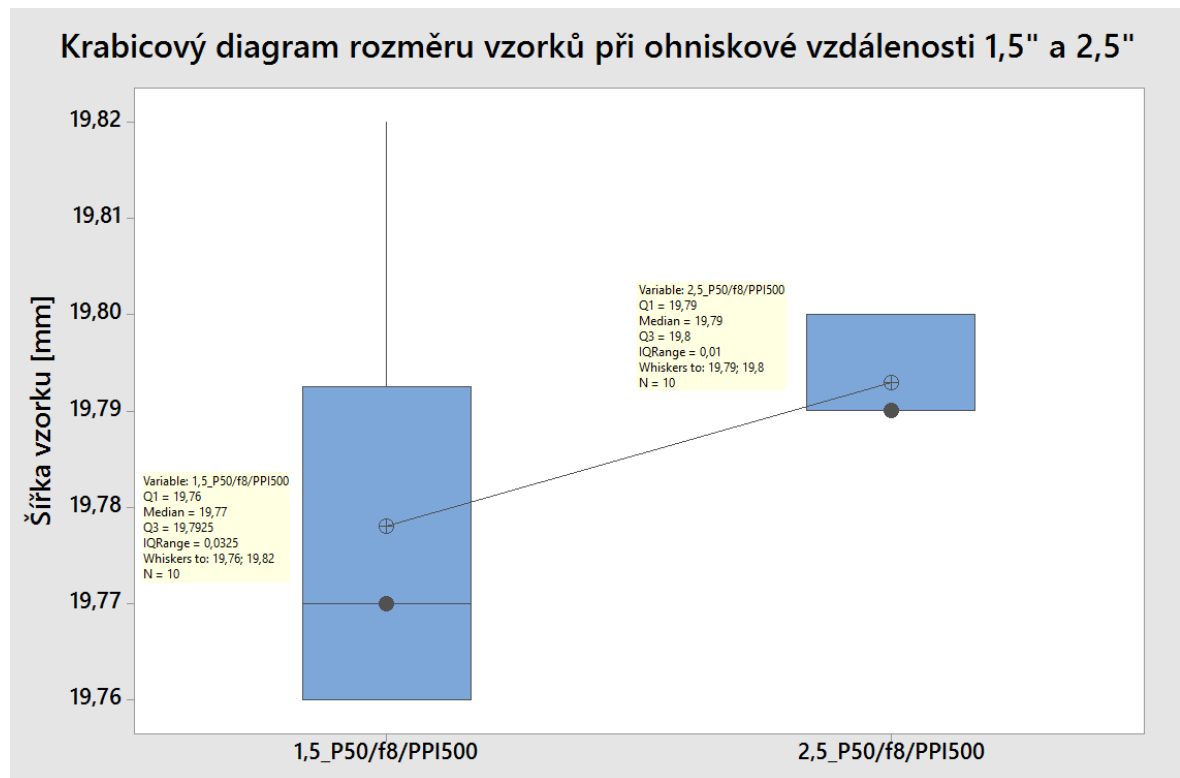
Obr. 77 Statistika rozměrů PMMA

Naměřené hodnoty rozměrů PMMA jsou zaznamenány v diagramu na obrázku 78. Z diagramu je patrný velký rozptyl měření u ohniskové vzdálenosti 1,5".



Obr. 78 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku PMMA

Z diagramu na obrázku 79 je patrné, že při řezných podmínkách P50/f8/PPI500 a ohniskové vzdálenosti 2,5" byl vzorek přesnější než při použití ohniskové vzdálenosti 1". U ohniskové vzdálenosti 1,5" byla velká odchylka šířky vzorku a i průměrná šířka vzorku byla nižší než při ohniskové vzdálenosti 2,5".



Obr. 79 Rozměru vzorků PMMA

12 MĚŘENÍ TVRDOSTI

Tvrdot byla měřena metodou Shore, ale rozdíly ve výsledcích nebyly patrné a navíc hrozilo zhroucení stěny při měření, protože zkoušené vzorky byly tenkostěnné. Z těchto důvodů se měřilo pomocí přístroje Micro Combi Tester, na kterém byla měřena mikrotvrdot. Tento přístroj je od firmy CSM Instruments a splňuje normu ČSN EN ISO 6507-1. [38]

Pro zkoušku mikrotvrdoti byl použit Vickersův indentor. Zatížení bylo zvoleno 1 N a výdrž 90 s. Zatěžující a odtěžující rychlost byla nastavena 5 N/min. U každého vzorku proběhlo 10 měření. Naměřené hodnoty jsou v příloze P III.

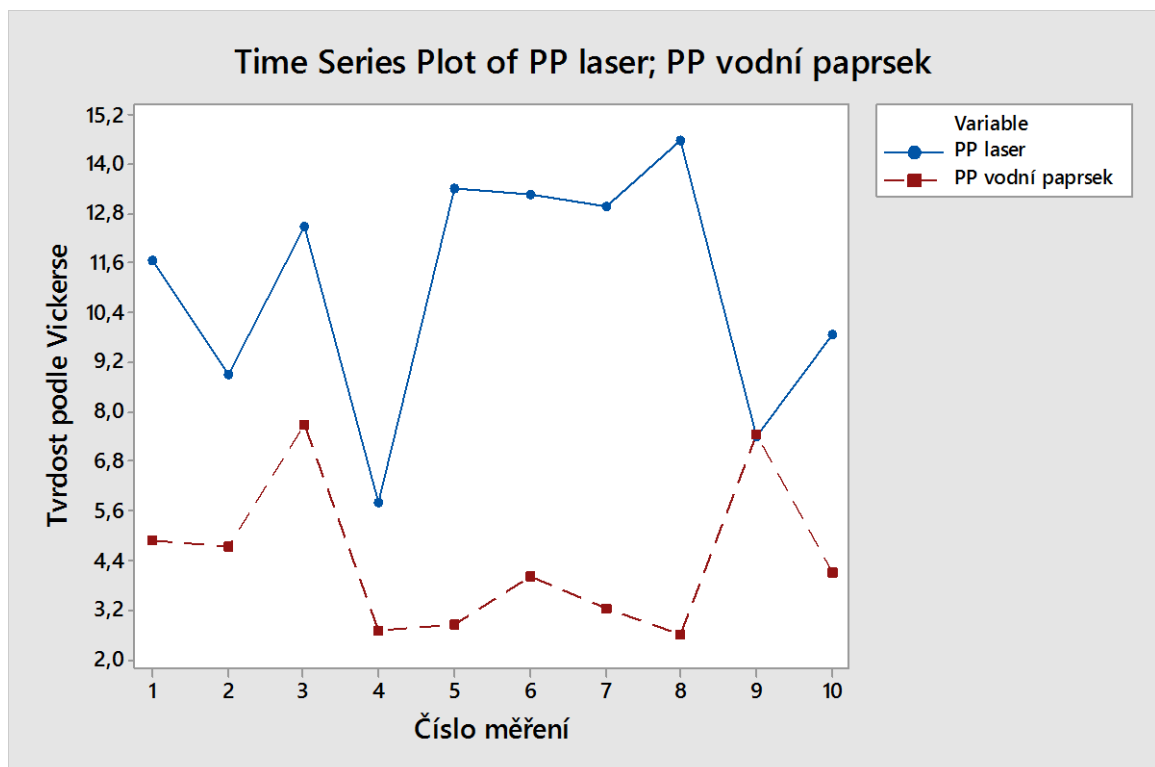


Obr. 80 Micro Combi Tester

12.1 Vyhodnocení měření

Polypropylen

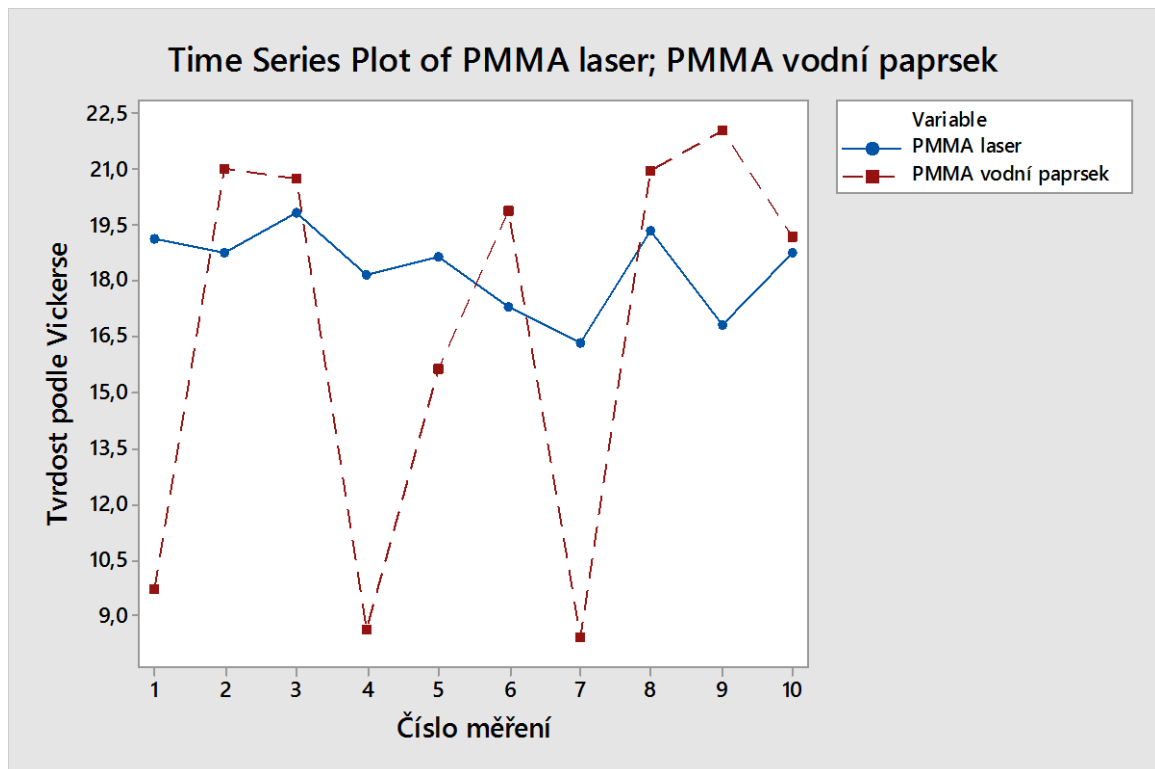
Diagram na obrázku 81 zobrazuje deset měření mikrotvrdomosti podle Vickerse u materiálu *PP* řezaným vodou a vodním paprskem. Jde vidět, že se hodnoty tvrdosti u obou způsobů řezání mění skokově. Je ale patrné, že při řezání *PP* laserem byla tvrdost větší než při použití vodního paprsku.



Obr. 81 Porovnání tvrdostí PP

Polymethylmethakrylát

Diagram na obrázku 82 zobrazuje mikrotvrдость *PMMA* řezaného laserem, která je relativně stálá a pohybuje se od 16,3 do 19,8 HV. Tvrдость při řezání vodním paprskem se mění velmi skokově od hodnoty 8,4 HV až po 51 HV. V maximálních hodnotách je tedy tvrдость *PMMA* při řezání vodním paprskem větší než při řezání laserem.

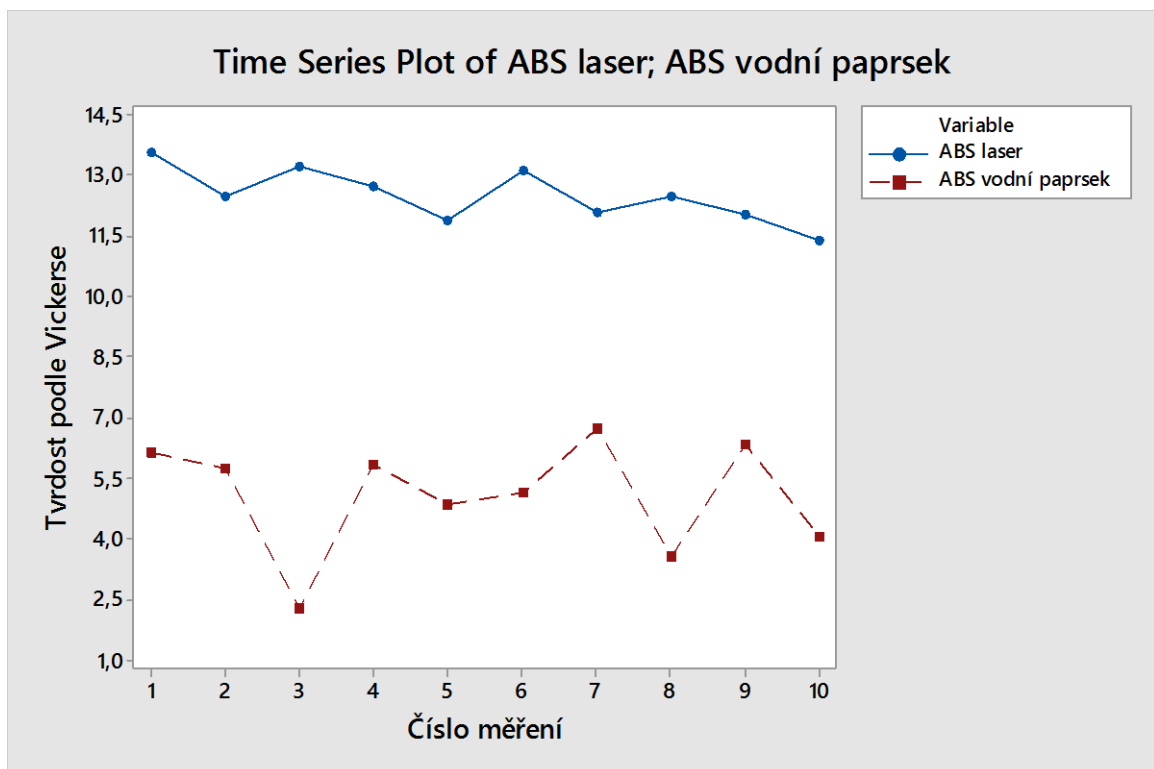


Obr. 82 Porovnání tvrđostí *PMMA*

Akrylonitrilbutadienstyren

Na obrázku 83 je vidět závislost tvrdosti ABS při řezání laserem a vodním paprskem. Při řezání ABS laserem byla naměřená tvrdost více než dvojnásobně větší oproti vodnímu paprsku.

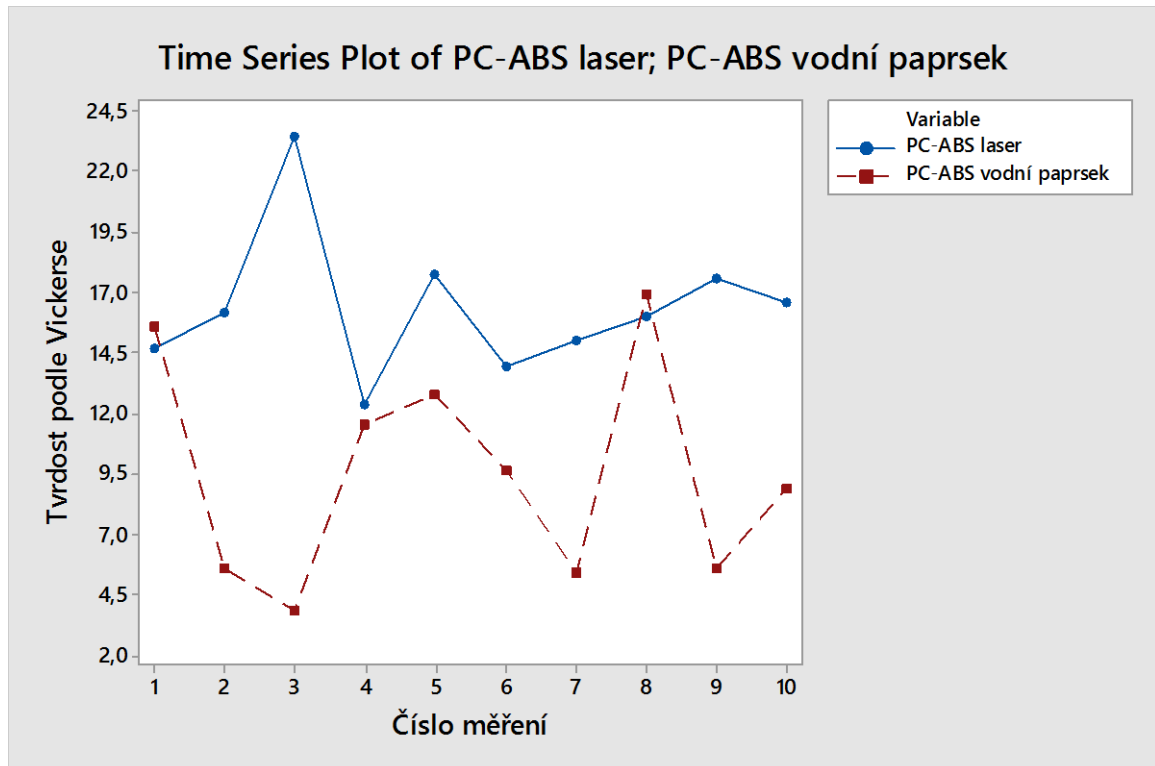
Při řezání laserem byla tvrdost relativně stálá, ale při řezání vodním paprskem se pohybovala v rozmezí 2,3 – 6,8 HV.



Obr. 83 Porovnání tvrdostí ABS

Polykarbonát - Akrylonitrilbutadienstyren

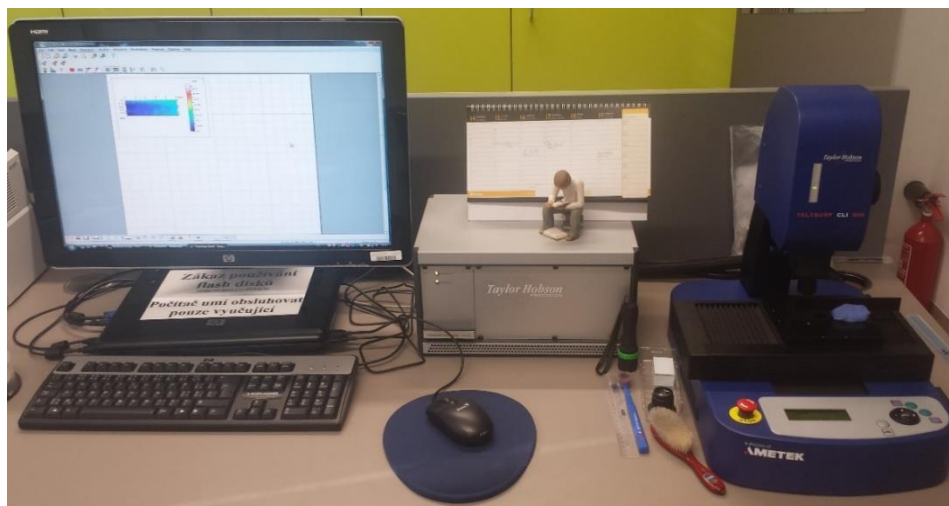
Graf na obrázku 84 znázorňuje tvrdost *PC-ABS* řezaného laserem a vodním paprskem. V obou případech se hodnoty mění skokově. Je zřejmé, že při řezání *PC-ABS* laserem byla tvrdost větší než při řezání vodním paprskem.



Obr. 84 Porovnání tvrdostí PC-ABS

13 MĚŘENÍ DRSNOSTI

Přístrojem Taylor Hobson Talysurf CLI 500 (obr. 85) byla bezkontaktně naměřena drsnost povrchu. Tento přístroj se používá pro měření menších předmětů s rozměry do 50 x 50 x 50 mm, délka posuvu je 50 mm. Přístroj se ovládá pomocí programu Talymap. Tento program slouží pro analýzu dat a je v něm možné vyhodnocovat 2D i 3D strukturu povrchu. [37]



Obr. 85 Taylor Hobson Talysurf CLI 500

V tabulce 8 jsou uvedeny základní specifikace přístroje Taylor Hobson Talysurf CLI 500 a jaké parametry drsnosti je možné měřit.

Tab. 8 Základní parametry Taylor Hobson Talysurf CLI 500 [37]

Horizontální charakteristika	
Délka snímání	0,1mm až 50mm
Rychlost snímání/měření	10mm/s max - 0,25mm/s
Datová rozteč v X	0,5 μ m
Úchylka přímosti	0,4 μ m na 50mm
	0,2 μ m na libovolných 20mm
Vertikální charakteristika	
Nominální rozsah měření	1mm
Rozlišení	16nm v rozsahu 1mm
Poměr rozsahu k rozlišení	65.536 : 1
Charakteristika přístroje	
Rozměry L x D x H	Posuvová jednotka 343x116x160 mm
Hmotnost	4,9 kg
Parametry drsnosti	R3y, R3z, Ra, Rc, Rda, Rdc*, Rdq, Rz, RHSC*, Rku, Rln, Rlo, Rlq, Rmc(c)*, Rz(DIN), RHSC*, Rku, Rln, Rlo, Rlq, Rmc(c)*, Rz(DIN), Rmr*, Rp, Rp1max

13.1 Vyhodnocení měření

Drsnost polypropylenu

V tabulce 9 jsou uvedeny parametry drsnosti *PP* při řezání laserem a vodním paprskem. Při řezání laserem bylo dosaženo R_a 3,83 μm a R_z 16,7 μm . Při řezání *PP* vodním paprskem je R_a 9,48 μm a R_z 50,3 μm . Při řezání *PP* laserem bylo docíleno lepší drsnosti povrchu než při řezání vodním paprskem.

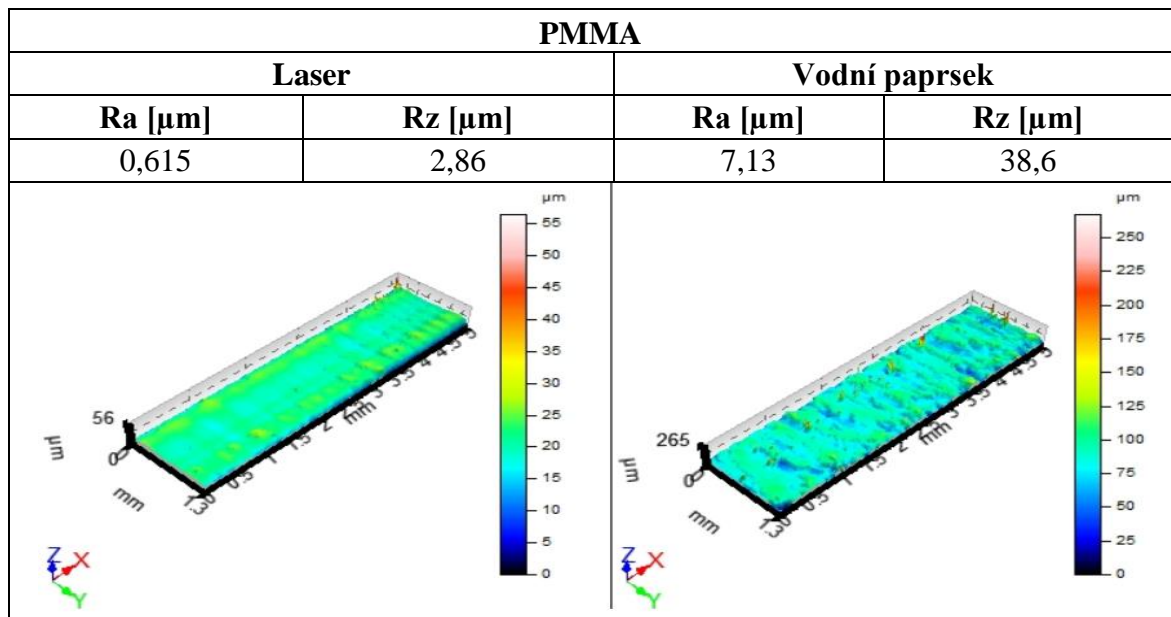
Tab. 9 Porovnání drsností *PP*

PP			
Laser		Vodní paprsek	
R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
3,83	16,7	9,48	50,3

Drsnost Polymethylmethakrylátu

Tabulka 10 zobrazuje parametry drsnosti *PMMA* při řezání laserem a vodním paprskem. Při řezání laserem bylo dosaženo R_a 0,615 μm a R_z 2,86 μm . Při řezání *PMMA* vodním paprskem bylo dosaženo R_a 7,13 μm a R_z 38,6 μm . Při řezání *PMMA* laserem bylo docíleno lepší drsnosti povrchu než při řezání vodním paprskem. To můžeme vidět na 3D zobrazení povrchu, který je součástí tabulky. Naopak u materiálu *PMMA*, který byl řezán vodním paprskem, vidíme na obrázku patrné nerovnosti.

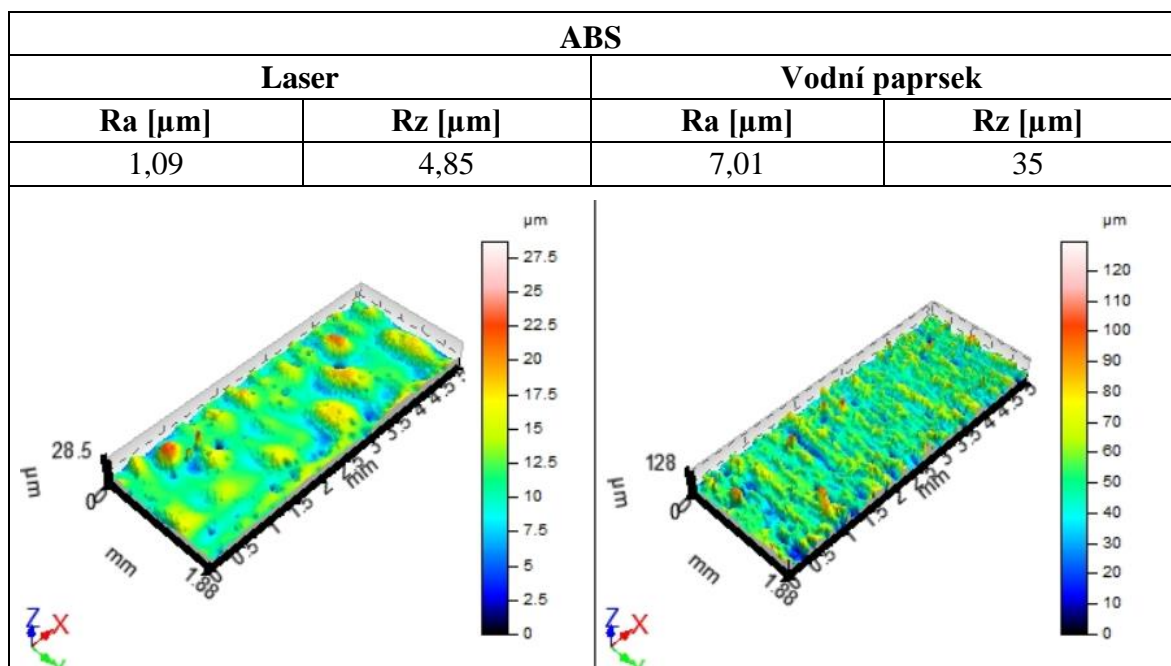
Tab. 10 Porovnání drsnosti PMMA



Drsnost Akrylonitrilbutadienstyrenu

V tabulce 11 jsou uvedeny parametry drsnosti ABS řezaného laserem a vodním paprskem. Při řezání laserem bylo dosaženo Ra 1,09 μm a Rz 4,85 μm . Při řezání ABS vodním paprskem bylo dosaženo Ra 7,01 μm a Rz 35 μm . Z naměřených hodnot plyne, že při řezání ABS laserem se docílí lepší drsnosti povrchu než při řezání vodním paprskem.

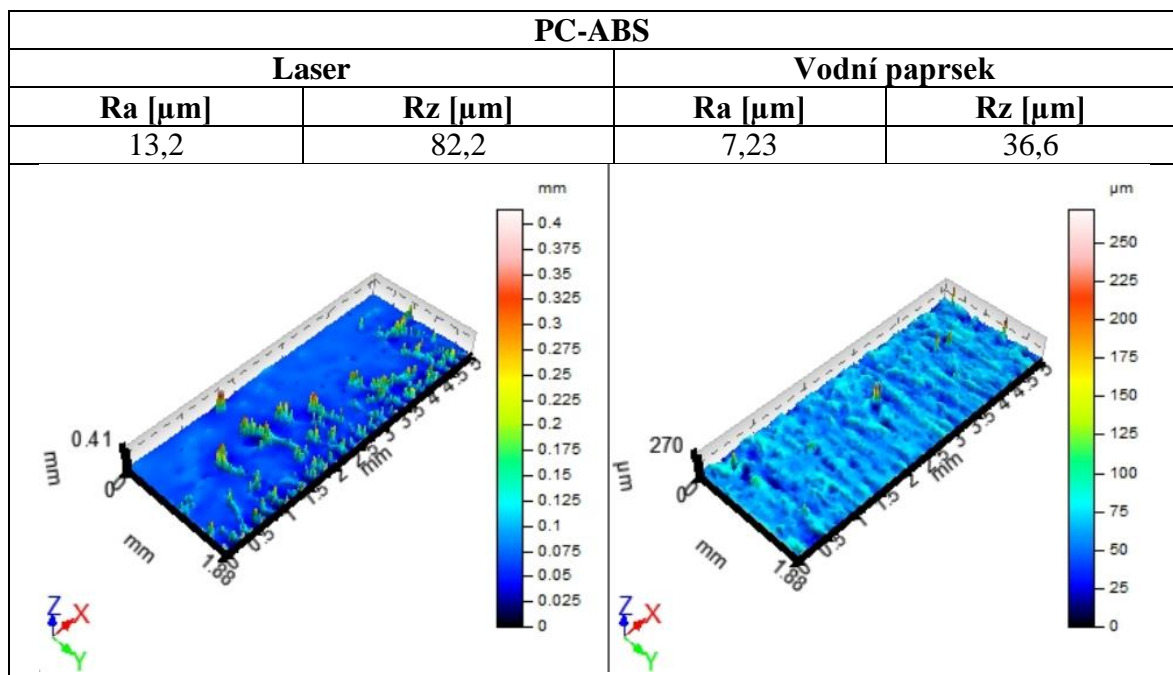
Tab. 11 Porovnání drsnosti ABS



Drsnost Polykarbonát - Akrylonitrilbutadienstyrenu

V tabulce 12 jsou uvedeny parametry drsnosti PC-ABS při řezání laserem a vodním paprskem. Při řezání laserem bylo dosaženo Ra 13,2 μm a Rz 82,2 μm . Při řezání PC-ABS vodním paprskem bylo Ra 7,23 μm a Rz 36,6 μm . Z hodnot vyplývá, že přidáním PC do ABS se zhorší drsnost povrchu při řezání laserem. Pro řezání PC-ABS je vhodnější použít vodní paprsek, protože se dosáhne lepší drsnosti než při řezání laserem.

Tab. 12 Porovnání drsností PC-ABS



ZÁVĚR

Technologie laseru a vodního paprsku jsou velmi odlišné a při obrábění je nutné zvážit, která metoda bude lepší z hlediska ovlivnění materiálu.

Nejprve jsem testoval, jestli má změna ohniskové vzdálenosti vliv na šířku řezu laseru. Statisticky jsem prokázal, že ohnisková vzdálenost má vliv na šířku řezu. Při zvětšení ohniskové vzdálenosti se zmenšila šířka řezu. To však neznamená, že pokud chci docílit co nejužší šířky řezu, použiji největší ohniskovou vzdálenost. Mohlo by se stát, že laser materiál už neprořízne, pokud jsou nastaveny pořád stejné řezné podmínky. To může být způsobeno ztrátou výkonu laseru na větší vzdálenosti.

Poté jsem porovnal šířky řezu laseru a vodního paprsku. Šířka řezu vodního paprsku byla až pětinašobně větší, než šířka řezu laseru, takže bylo odebíráno větší množství materiálu.

Po vyřezávání vzorků se měřily jejich rozměry a porovnával se vliv technologie. Při řezání laserem byly vzorky vždy menší než nadefinovaný rozměr. Naopak při řezání vodním paprskem byly vždy větší. U materiálů *PP* a *ABS* řezaným laserem byly větší rozptyly měření než při řezání vodním paprskem. Pouze u materiálu *PC-ABS* byl větší rozptyl měření při řezání vodním paprskem. Naměřené hodnoty také ukázaly, že při řezání *PMMA* laserem s ohniskovou vzdáleností 1,5" a 2,5" jsou přesnější vzorky, které byly vyřezány s ohniskovou vzdáleností 2,5".

Byl také měřen vliv paprsků na tvrdost materiálů v místě řezu. Při použití laseru byla tvrdost vždy větší než při řezání vodním paprskem. Pouze v případě řezání *PMMA* vodním paprskem byla polovina naměřených hodnot tvrdosti vyšší, než při řezání laserem. Hodnoty se ale mění skokově. Vyšší tvrdost na řezu při obrábění laserem může být způsobena natavením a degradací polymerů.

Posledním měřením byl vliv paprsků na drsnost řezu. Drsnost při řezání laserem byla, až na *PC-ABS*, vždy menší než při řezání vodním paprskem. Při řezání *PC-ABS* laserem byla drsnost asi 2x větší než při řezání vodním paprskem. Zatímco při řezání vodním paprskem se drsnosti pohybovaly v relativně stejných hodnotách, tak při řezání laserem se více měnily v závislosti na řezaném materiálu.

Při výběru technologie může rozhodovat i ekonomické hledisko. Finanční náklady na řezání vodním paprskem se pohybovaly ve výši 25 Kč za metr řezu. Náklady na řezání laserem se pohybovaly 160 Kč za metr řezu. Ceny se liší pro různé materiály a jejich tloušťky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ducháček, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [2] Hluchý, M., a kolektiv: *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978. 360 s. ISBN 04-212-78
- [3] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. Dostupný z WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [4] Machek, Václav a Jaromír Sodomka. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [5] Hudocovič, M., *Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, Vedoucí diplomové práce ing. Michal Staněk, Ph.D.
- [6] Ptáček, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] Jurčová, M., *Testování mechanických vlastností modifikovaných polymerů*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [8] Ducháček, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. VŠCHT v Praze, 2006. 280 s, ISBN 80-7080-617-6.
- [9] *Keramika, kompozity, polymery*, [online]. Dostupný z WWW: <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>.
- [10] *Polymery „stručně“* [online]. Dostupný z WWW: old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf
- [11] *Mechanické vlastnosti polymerů*, [online]. Dostupný z WWW: <http://www.belt-plast.cz/cs/vlastnosti>
- [12] *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Dostupný z WWW: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [13] *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Dostupný z WWW: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sa-blony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-25.pdf

- [14] WHITEHOUSE, D. Surfaces and their measurement. London: HPS, 2002, xi, 395 p. ISBN 1 9039 9601 5..
- [15] Schätz, Miroslav a Petr Vondráček. Zkoušení polymerů. 2., přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [16] Jarušek, Jaroslav. Metody zkoumání polymerů. 2. vyd. Pardubice: VŠCHT, 1984, 105 s.
- [17] Holík, Z., Vliv elektromagnetického pole na mechanické vlastnosti plastů, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Žaludek, Ph.D.
- [18] Laserová technologie v praxi [online]. Dostupný z WWW: <https://fy-zika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [19] Řasa, Jaroslav a Zuzana, Kerečaninová. Nekonenční metody obrábění – 4. díl [online]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [20] Šulc, Jan. Lasery a jejich aplikace [online]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [22] Maňková, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [22] Seriál na téma lasery – základní princip a jejich rozdělení [online]. Dostupný z WWW: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [23] Wilfert, O. Optoelektronika: Skriptum, Brno, 155 s. Dostupný z WWW: https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/M_EST/MKVE/Optoelektronika.pdf
- [24] Kusala, Jaroslav. Aplikace laseru [online]. Lasery kolem nás [vid. 2. února 2013]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm>
- [25] Laser – vše o laserech [online]. Dostupný z WWW: <http://lasery.wz.cz/>
- [26] Laser a jeho využití [online]. Dostupný z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31.htm>
- [27] Řezání laserem – HS-Tech [online]. Dostupný z WWW: <http://www.hs-tech.cz/>
- [28] Šulc, Jan. Průmyslové aplikace laserových systémů [online]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>

- [29] Představení odboru TTP [online]. Dostupný z WWW: <http://ttp.zcu.cz/images/laboratories/surfaceTreatment/img020.jpg>
- [30] MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie: Advanced methods of material removal. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, viii, 275 s. ISBN 80-709-9430-4
- [31] text MORÁVEK, Rudolf. Nekonenční metody obrábění. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9
- [32] GELETA, Vojtech. Progresívne technológie obrábania. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2013, 163 stran. ISBN 978-80-227-3997-9
- [33] Měření jakosti povrchu [online]. Dostupné z WWW: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx
- [34] MLEZIVA, Josef; ŠŇUPÁREK, Jaromír. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 8085920727
- [35] RESINEX Distribution of Plastics & Elastomers [online]. Dostupné z WWW: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc-abs.html>
- [36] LPM s.r.o. Technické díly z plastů [online]. Dostupné z WWW: <http://www.lpm.cz/>
- [37] Mikel, R., Hodnocení jakosti povrchu polymerních výrobků po vstřikování, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Čop
- [38] Šmach, P., Vliv množství Polybutenu na mikrotvrdotost PP, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012, Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. David Mañas, Ph.D.
- [39] Doležal, P., Studium vlivu polymeru na mechanické vlastnosti při laserovém obrábění, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012, Vedoucí bakalářské práce Ing. Jana Knedlová.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

μ	Populační průměr výběrového souboru
$1-\alpha$	Konfidenční úroveň
2D	Dvojměrný prostor
3D	Trojměrný prostor
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AWJM	Obrábění abrazivním vodním paprskem
CoefVar	Variační koeficient
Count	Počet měření
ČSN	Česká státní norma
D	Průměr
EN	Evropská norma
f	Posuv
F	Síla
h	Hloubka
H0	Nulová hypotéza
HA	Alternativní hypotéza
IQR	Interkvartilové rozpětí
Kurtosis	Špičatost
Maximum	Maximální naměřená hodnota
Mean	Průměr
Minimum	Minimální naměřená hodnota
n	Počet měření výběrového souboru
P	Výkon
PC	Polykarbonát

PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
PPI	Počet impulzů laseru
PVC	Polyvinylchlorid
Q1	1. kvartil
Q3	3. kvartil
Rt	Celková výška profilu drsnosti
Rz	Maximální výška nerovnosti profilu
Range	Rozpětí
SE Mean	Nejistota typu A
Skewness	Šikmost
STDev	Variační koeficient
WJM	Obrábění vodním paprskem
δ	Rozptyl
σ	Odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Struktura polymeru [5]	11
Obr. 2	Rozdělení polymerů	12
Obr. 3	Semikrystalický polymer	12
Obr. 4	Podstata a zpracování termoplastů a reaktoplastů [6]	13
Obr. 5	Struktura polymerů	14
Obr. 6	Tvar makromolekulárních řetězců [7]	15
Obr. 7	Struktura kopolymeru [9]	16
Obr. 8	Měření tvrdosti podle Brinella [15]	19
Obr. 9	Tvrdoměr Shore	21
Obr. 10	Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse	22
Obr. 11	Princip zkoušky tvrdosti podle Knoop	23
Obr. 12	Profil obecného povrchu	24
Obr. 13	Vlnitost povrchu	24
Obr. 14	Drsnost povrchu	24
Obr. 15	Průměrná aritmetická úchylka daného profilu	25
Obr. 16	Výška nerovností profilu	25
Obr. 17	Celková výška profilu	26
Obr. 18	Schéma zařízení pro obrábění laserem [19]	28
Obr. 19	Rezonátor	28
Obr. 20	Srovnání laserového světla od běžného světla [18]	29
Obr. 21	Dělení laserů podle aktivního prostředí [23]	30
Obr. 22	Podíl na trhu – typy laserů [20]	32
Obr. 23	Procento rozdělení jednotlivých technologií [20]	33
Obr. 24	Řezání laserem [27]	34
Obr. 25	Svařování laserem [25]	35
Obr. 26	Popis vytvořený laserem [26]	36
Obr. 27	laserové vrtání [25]	37
Obr. 28	Povrchové laserové kalení [29]	37
Obr. 29	Schéma řezání vodním paprskem a dráhy paprsku [30]	38
Obr. 30	Princip řezných hlav a rozdíl mezi WJM a AWJM [30]	39
Obr. 31	Znázornění zúžení řezu [32]	40
Obr. 32	Schéma sestavy zařízení AWJM [32]	40

Obr. 33 Schéma multiplikátoru [32]	41
Obr. 34 Příklad konstrukce řezací hlavy pro čistý vodní paprsek [30].....	41
Obr. 35 Příklad konstrukce řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsek [32]	42
Obr. 36 Soustružení abrazivním vodním paprskem [30].....	43
Obr. 37 Způsoby vrtání abrazivním vodním paprskem [30]	43
Obr. 38 Vyfrézované tvary abrazivním vodním paprskem [30].....	44
Obr. 39 Ukázky řezů WJM a AWJM [33].....	44
Obr. 40 Zařízení pro řezání vodním paprskem	50
Obr. 41 Laser ILS 3NM.....	51
Obr. 42 Řezné podmínky PMMA pro čočku 1,5"	52
Obr. 43 Řezné podmínky PMMA s čočkou 2,5"	53
Obr. 44 Fokusace laseru.....	54
Obr. 45 Vzorky z PMMA	54
Obr. 46 Zaměření šířky drážky	55
Obr. 47 Mikroskop Carl Zeiss	56
Obr. 48 Ovládání posuvu mikroskopu.....	56
Obr. 49 Statistika naměřených hodnot šířky řezu.....	57
Obr. 50 Diagram naměřených hodnot šířky řezu.....	58
Obr. 51 Krabicový diagram šířky řezu	58
Obr. 52 F-test šířky řezu	59
Obr. 53 T-test šířky řezu	60
Obr. 54 Statistika hodnot šířky řezu pro P50/f8/PPI500	61
Obr. 55 Diagram naměřených hodnot pro P50/f8/PPI500.....	61
Obr. 56 Šířka řezu pro P50/f8/PPI1500.....	62
Obr. 57 F-test šířky řezu pro P50/f8/PPI500	63
Obr. 58 T-test šířky řezu pro P50/f8/PPI500	64
Obr. 59 Řez vodního paprsku	64
Obr. 60 Statistika naměřených hodnot šířky řezu vodního paprsku	64
Obr. 61 Diagram naměřených hodnot šířky řezu vodního paprsku.....	65
Obr. 62 Šířka řezu laseru a vodního paprsku.....	66
Obr. 63 Digitální posuvné měřítko Mitutoyo	67
Obr. 64 Kalibrační list digitální posuvky.....	67
Obr. 65 Statistika rozměrů PP.....	68

Obr. 66 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku PP.....	68
Obr. 67 Rozměry vzorků PP	69
Obr. 68 Statistika rozměrů ABS	70
Obr. 69 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku ABS	70
Obr. 70 Rozměry vzorků ABS.....	71
Obr. 71 Statistika rozměrů PC-ABS	72
Obr. 72 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku PC-ABS	72
Obr. 73 Rozměry vzorků PC-ABS	73
Obr. 74 Statistika rozměrů PMMA.....	74
Obr. 75 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku PMMA	74
Obr. 76 Rozměry vzorků PMMA	75
Obr. 77 Statistika rozměrů PMMA.....	76
Obr. 78 Diagram naměřených hodnot rozměrů vzorku PMMA	76
Obr. 79 Rozměry vzorků PMMA	77
Obr. 80 Micro Combi Tester.....	78
Obr. 81 Porovnání tvrdostí PP	79
Obr. 82 Porovnání tvrdostí PMMA	80
Obr. 83 Porovnání tvrdostí ABS.....	81
Obr. 84 Porovnání tvrdostí PC-ABS.....	82
Obr. 85 Taylor Hobson Talysurf CLI 500	83

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní vlastnosti PP [36].....	47
Tab. 2 Základní vlastnosti PMMA [36].....	48
Tab. 3 Základní vlastnosti ABS [36]	48
Tab. 4 Základní vlastnosti PC-ABS [36]	49
Tab. 5 Parametry WJM zařízení	50
Tab. 6 Řezné podmínky vodního paprsku	50
Tab. 7 Parametry laseru ILS 3NM [39]	51
Tab. 8 Základní parametry Taylor Hobson Talysurf CLI 500 [37].....	83
Tab. 9 Porovnání drsností PP.....	84
Tab. 10 Porovnání drsností PMMA.....	85
Tab. 11 Porovnání drsností ABS	85
Tab. 12 Porovnání drsností PC-ABS	86
Tab. 13 Naměřené hodnoty šířky řezu laseru při P50/f12/PPI1000	98
Tab. 14 Naměřené hodnoty šířky řezu laseru při P50/f8/PPI500	98
Tab. 15 Naměřené hodnoty šířky řezu vodního paprsku	99
Tab. 16 Naměřené hodnoty rozměru PP	100
Tab. 17 Naměřené hodnoty rozměru ABS.....	100
Tab. 18 Naměřené hodnoty rozměru PC-ABS	101
Tab. 19 Naměřené hodnoty rozměru PMMA při P50/f12/PPI1000	101
Tab. 20 Naměřené hodnoty rozměru PMMA při P50/f8/PPI500	102
Tab. 21 Tvrdost vzorků – 1 část	103
Tab. 22 Tvrdost vzorků – 2 část	103

SEZNAM PŘÍLOH

P I ŠÍŘKA ŘEZU

P II ROZMĚRY VZORŮ

P III TVRDOST

PŘÍLOHA P I: ŠÍŘKA ŘEZU

Tab. 13 Naměřené hodnoty šířky řezu laseru při P50/f12/PPI1000

Číslo měření	1,5_P50/f12/PPI1000 [mm]	2,5_P50/f12/PPI1000 [mm]
1	0,21	0,16
2	0,19	0,14
3	0,18	0,13
4	0,19	0,13
5	0,19	0,11
6	0,22	0,10
7	0,20	0,10
8	0,19	0,12
9	0,18	0,13
10	0,19	0,11
Arit. průměr	0,19	0,12
Sm. odchylka	0,012	0,018
Rozptyl	0,00014	0,00032
Min. hodnota	0,18	0,10
Max. hodnota	0,22	0,16

Tab. 14 Naměřené hodnoty šířky řezu laseru při P50/f8/PPI500

Číslo měření	1,5_P50/f8/PPI500 [mm]	2,5_P50/f8/PPI500 [mm]
1	0,20	0,23
2	0,17	0,20
3	0,20	0,14
4	0,21	0,18
5	0,21	0,20
6	0,21	0,18
7	0,18	0,20
8	0,20	0,18
9	0,20	0,17
10	0,19	0,19
Arit. průměr	0,20	0,19
Sm. odchylka	0,013	0,022
Rozptyl	0,00016	0,00050
Min. hodnota	0,17	0,14
Max. hodnota	0,21	0,23

Tab. 15 Naměřené hodnoty šířky řezu vodního paprsku

Číslo měření	Šířka řezu [mm]
1	0,97
2	0,96
3	0,96
4	0,96
5	0,96
6	0,95
7	0,97
8	0,96
9	0,94
10	0,96
Arit. průměr	0,96
Sm. odchylka	0,008
Rozptyl	0,00007
Min. hodnota	0,94
Max. hodnota	0,97

PŘÍLOHA P II: ROZMĚRY VZORŮ

Tab. 16 Naměřené hodnoty rozměru PP

Číslo měření	PP	
	Laser [mm]	Vodní paprsek [mm]
1	19,70	20,21
2	19,69	20,23
3	19,69	20,21
4	19,65	20,23
5	19,63	20,24
6	19,60	20,24
7	19,61	20,26
8	19,62	20,25
9	19,65	20,25
10	19,63	20,25
Arit. průměr	19,65	20,24
Sm. odchylka	0,034	0,016
Rozptyl	0,0011	0,0003
Min. hodnota	19,60	20,21
Max. hodnota	19,70	20,26

Tab. 17 Naměřené hodnoty rozměru ABS

Číslo měření	ABS	
	Laser [mm]	Vodní paprsek [mm]
1	19,71	20,30
2	19,69	20,32
3	19,66	20,35
4	19,66	20,34
5	19,65	20,35
6	19,62	20,33
7	19,61	20,31
8	19,66	20,30
9	19,64	20,32
10	19,70	20,32
Arit. průměr	19,66	20,32
Sm. odchylka	0,031	0,017
Rozptyl	0,0010	0,0003
Min. hodnota	19,61	20,30
Max. hodnota	19,71	20,35

Tab. 18 Naměřené hodnoty rozměru PC-ABS

Číslo měření	PC-ABS	
	Laser [mm]	Vodní paprsek [mm]
1	19,77	20,39
2	19,77	20,35
3	19,75	20,39
4	19,72	20,41
5	19,73	20,36
6	19,76	20,38
7	19,70	20,48
8	19,71	20,50
9	19,64	20,53
10	19,60	20,54
Arit. průměr	19,72	20,43
Sm. odchylka	0,054	0,068
Rozptyl	0,0029	0,0047
Min. hodnota	19,6	20,35
Max. hodnota	19,77	20,54

Tab. 19 Naměřené hodnoty rozměru PMMA při P50/f12/PPI1000

Číslo měření	1,5_P50/f12/PPI1000 [mm]	2,5_P50/f12/PPI1000 [mm]
1	19,85	19,93
2	19,84	19,96
3	19,84	19,96
4	19,84	19,96
5	19,84	19,97
6	19,85	19,98
7	19,85	19,96
8	19,85	19,97
9	19,86	19,97
10	19,85	19,96
Arit. průměr	19,85	19,96
Sm. odchylka	0,006	0,012
Rozptyl	0,00004	0,00016
Min. hodnota	19,84	19,93
Max. hodnota	19,86	19,98

Tab. 20 Naměřené hodnoty rozměru PMMA při P50/f8/PPI500

Číslo měření	1,5_P50/f8/PPI500 [mm]	2,5_P50/f8/PPI500 [mm]
1	19,80	19,79
2	19,82	19,79
3	19,78	19,79
4	19,77	19,79
5	19,76	19,79
6	19,76	19,80
7	19,79	19,79
8	19,77	19,80
9	19,76	19,79
10	19,77	19,80
Arit. průměr	19,78	19,79
Sm. odchylka	0,019	0,005
Rozptyl	0,00036	0,00002
Min. hodnota	19,76	19,79
Max. hodnota	19,82	19,80

PŘÍLOHA P III: TVRDOST

Tab. 21 Tvrdost vzorků – 1 část

Číslo měření	ABS laser [HV]	ABS vodní paprsek [HV]	PC-ABS laser [HV]	PC-ABS vodní paprsek [HV]
1	13,581	6,144	14,653	15,602
2	12,488	5,743	16,155	5,556
3	13,222	2,271	23,435	3,838
4	12,731	5,830	12,364	11,541
5	11,911	4,829	17,709	12,777
6	13,121	5,160	13,909	9,606
7	12,111	6,750	14,987	5,409
8	12,513	3,532	16,000	16,905
9	12,064	6,325	17,512	5,590
10	11,387	4,067	16,557	8,894
Arit. průměr	12,513	5,065	16,328	9,572
Sm. odchylka	0,637	1,336	2,832	4,324
Rozptyl	0,405	1,785	8,018	18,694
Min. hodnota	11,387	2,271	12,364	3,838
Max. hodnota	13,581	6,750	23,435	16,905

Tab. 22 Tvrdost vzorků – 2 část

Číslo měření	PMMA laser [HV]	PMMA vodní paprsek [HV]	PP laser [HV]	PP vodní paprsek [HV]
1	19,091	9,715	11,666	4,869
2	18,707	50,965	8,869	4,739
3	19,805	20,720	12,475	7,681
4	18,144	8,596	5,786	2,660
5	18,607	15,617	13,397	2,808
6	17,265	19,839	13,281	3,967
7	16,328	8,415	12,947	3,214
8	19,310	20,942	14,591	2,564
9	16,818	22,004	7,385	7,413
10	18,748	19,151	9,867	4,099
Arit. průměr	18,282	19,596	11,026	4,401
Sm. odchylka	1,075	11,630	2,763	1,755
Rozptyl	1,155	135,263	7,633	3,079
Min. hodnota	16,328	8,415	5,786	2,564
Max. hodnota	19,805	50,965	14,591	7,681