

Porovnání kontinuálního a pulzního režimu při obrábění CO₂ laserem

Bc. Jaroslav Doležal

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Doležal**
Osobní číslo: **T13786**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Porovnání kontinuálního a pulzního režimu při
obrábění CO₂ laserem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Vyrobte vzorky z různých materiálů na laseru ILS pro experiment
3. Proveďte experiment
4. Proveďte vyhodnocení experimentu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Knedlová

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: Jaroslav Doležal

Obor:Výrobní inženýrství....

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 24.4.2014



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 vzdělávacímu 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

Diplomová práce se zabývá měřením drsnosti bezkontaktním způsobem na laboratorním přístroji Taylor Hobson CLI 500. Zkušební vzorky byly vypáleny na školním laseru ILS 3NM. Vzorky byly vyhotoveny za konstantního výkonu 20 W a odlišných řezných podmínek pro gravírování (maximum posuvu 1524 mm/s): 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %. Na vyrobených vzorcích z PMMA bylo provedeno měření drsnosti dle norem - Rz, Ra, Rmr.

Klíčová slova: Laser, PMMA, drsnost, Taylor Hobson

ABSTRACT

This thesis deals with the measurement of roughness without contact on laboratory apparatus Taylor Hobson CLI 500. Test samples were fired at the school laser ILS 3NM. Samples were drawn at a constant power of 20 W and different cutting conditions for engraving (maximum feed 1524 mm / s): 20%, 30%, 40%, 60%, 80%, 100%. The produced samples of PMMA were performed according to the roughness measurement standards - Rz, Ra, Rmr.

Keywords: Laser, PMMA, roughness, Taylor Hobson

Děkuji vedoucí diplomové práce paní Ing. Janě Knedlové za odborné vedení, připomínky, rady a lidský přístup, který mi poskytla při vypracování diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří Doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za ochotu, vstřícnost a cenné rady při praktické části diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE V PRAXI	12
1.1 PRINCIP LASERU	12
1.2 SOUČÁSTI LASERU	14
1.3 POUŽITÍ LASERU	15
2 POUŽITÍ LASERU V PRAXI.....	16
2.1 KLASIFIKACE LASERŮ PODLE RŮZNÝCH KRITÉRIÍ	17
2.2 VYUŽITÍ LASERU PODLE ČASOVÉHO REŽIMU	18
2.3 PRŮMYSLOVÉ ZNAČENÍ A LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ.....	18
2.4 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ A NAVAŘOVÁNÍ	19
2.5 LASEROVÉ VRTÁNÍ A ŘEZÁNÍ	20
2.6 LASEROVÉ MÓDY	21
3 PLASTY VE STROJÍRENSTVÍ	23
3.1 DĚLENÍ PLASTŮ	24
3.2 POLYMETYLMETAKRYLÁT-PMMA	24
3.3 POLYETHYLEN-PE.....	25
3.4 POLYAMID 66-PA66.....	26
4 METROLOGIE A JAKOST VE STROJÍRENSTVÍ	27
4.1 CHYBY MĚŘENÍ A JEJICH PŘÍČINY	28
4.2 ROZDĚLENÍ CHYB MĚŘENÍ.....	28
4.3 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	30
4.4 DRUHY DRSNOSTI.....	31
4.5 PARAMETRY PROFILU NEROVNOSTI.....	32
4.6 NEJVĚTŠÍ VÝŠKA VÝSTUPKU PROFILU RP.....	32
4.7 NEJVĚTŠÍ HLOUBKA PROHLUBNÍ PROFILU RV.....	33
4.8 NEJVĚTŠÍ VÝŠKA PROFILU RZ	33
4.9 CELKOVÁ VÝŠKA PROFILU RT.....	34
4.10 PRŮMĚRNÁ ARITMETICKÁ ÚCHYLKA POSUZOVANÉHO PROFILU RA.....	34
4.11 MATERIÁLOVÝ POMĚR RMR	35
4.12 ZNAČENÍ DRSNOSTI	36
4.13 PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	37
4.13.1 Měření pomocí dotykového profilometru	37
4.13.2 Bezdotykové měření pomocí snímače CLA	39
5 CÍL PRÁCE.....	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
6 POPIS A PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ	43
6.1 LASEROVÁ TISKÁRNA ILS 3NM	43
6.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ TAYLOR HOBSON TALYSURF CLI 500	44
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	47

8	NAMĚŘENÍ HODNOT	51
9	VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH INFORMACÍ.....	54
9.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO RA PMMA PRO VÝKON 20 %	54
9.1.1	Krabicové diagramy Ra, kontinuálního a pulzního režimu	54
9.1.2	Popisné charakteristiky Ra kontinuálního a pulzního režimu	56
9.1.3	Grafy časové řady Ra pro kontinuální a pulzní režim	56
9.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO RZ PMMA PRO VÝKON 20 %	58
9.2.1	Krabicové diagramy Rz, kontinuálního a pulzního režimu	58
9.2.2	Popisné charakteristiky Rz kontinuálního a pulzního režimu	60
9.2.3	Grafy časové řady Rz pro kontinuální a pulzní režim	60
9.3	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO RMR PMMA PRO VÝKON 20 %	62
9.3.1	Krabicové diagramy Rmr, kontinuálního a pulzního režimu.....	62
9.3.2	Popisné charakteristiky Rmr kontinuálního a pulzního režimu	64
9.3.3	Grafy časové řady Rmr pro kontinuální a pulzní režim	64
9.4	VYHODNOCENÍ RA KRABICOVÝMI DIAGRAMY PRO JEDNOTLIVÉ ŘEZNÉ RYCHLOSTI KONTINUÁLNÍHO A PULZNÍHO REŽIMU	66
9.4.1	Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 100%	66
9.4.2	Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 80%	67
9.4.3	Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 60%	68
9.4.4	Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 40%	69
9.4.5	Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 30%	70
9.4.6	Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 20%	71
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	78
	SEZNAM TABULEK	81
	SEZNAM PŘÍLOH	82

ÚVOD

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

Aby se s tímto trendem dal udržet krok, musí se vyvíjet i technologie, které ve své podstatě tento pokrok umožňují. Laserové technologie jsou jednou oblastí z mnoha, které značnou měrou přispívají ke zkvalitnění života dnešních moderních lidí, aniž by si to uvědomovali.

Laser je velice složité zařízení, kterému většina lidí nerozumí a neustále se vyvíjí, jejich dokonalost narůstá a tím roste i jejich působení. Společně s dobou se lasery rozšiřují do různých oborů, poslední dobou čím dál specifitějších. Uplatňují se především ve vědě, průmyslu, medicíně, chemii, biologii, energetice, výpočetní technice.

Počátek laseru nebyl nějak výrazný. Zprvu existovala Einsteinova teorie, že by za vhodných podmínek mohlo vzniknout světlo neobvyklého záření. Dalších 40 let trvalo, než se takovéto záření sestrojilo. První funkční laser předvedl Theodore Harold Maiman již

16. května 1960. Jako aktivní prostředí používal krystal rubínu, do kterého promítal záblesky obyčejného světla.

Hned roku 1961 bylo záření takového laseru použito k léčení očních a kožních onemocnění. Dnes se s lasery setkáváme velmi často, aniž bychom si to sami uvědomovali. Za vytvoření laseru získali tvůrci patent a Nobelovou cenu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE V PRAXI

Od sestrojení prvního funkčního laseru tedy uplynulo více než 50 let. Každá aplikace má své požadavky. Díky těmto požadavkům se objevilo mnoho dalších typů laserů, které odpovídá širokému poli jejich možnému využití. Dnes už lasery mohou vypadat naprosto odlišně například jako miniaturní elektronická součástka nebo jako několik desítek dlouhé skleněné vlákno, popřípadě jako komplikovaná chemická aparatura. Může svou energii čerpat z obyčejné tužkové baterie, stejně jako třeba z jaderného výbuchu. Energetický potenciál laseru je opravdu mimořádný a předpokládá se, že prostřednictvím laserového paprsku bude možné uvolnit také energie skryté v jádru atomu.[1]

Laser se postupem času stal nepostradatelným nástrojem nejen vědy a výzkumu, ale i odvětví průmyslu, medicíny.

Všechny lasery mají jako zdroj druh světla, jež se běžně v přírodě nevyskytuje. Jedná se o monochromatické světlo, které má podobu úzkého směřovaného paprsku a lze jej zaostřit na malý průměr. [2]

1.1 Princip laseru

Slovo LASER je akronym anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze přeložit jako zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního optického záření, které vzniká v důsledku extrémní monochromatickosti a rovněž i vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Žádné jiné záření, než záření generované laserem tyto vlastnosti nemá. [2]

K zesílení světla dochází opakovanými průchody fotonů optickou dutinou vymezenou zrcadly tzv. rezonátorem.

První funkční laser byl sestrojen v roce 1960 americkým fyzikem T. H. Maimanem. Šlo o rubínový laser zobrazený na obr. 1, s vlnovou délkou 694,3 nm. Ve srovnání s dnešními lasery nebyl příliš efektivní. Využíval jen tři energetické hladiny krystalu rubínu, a proto mohl pracovat pouze v pulsním (pulsy s vysokou opakovací frekvencí) režimu. [2]

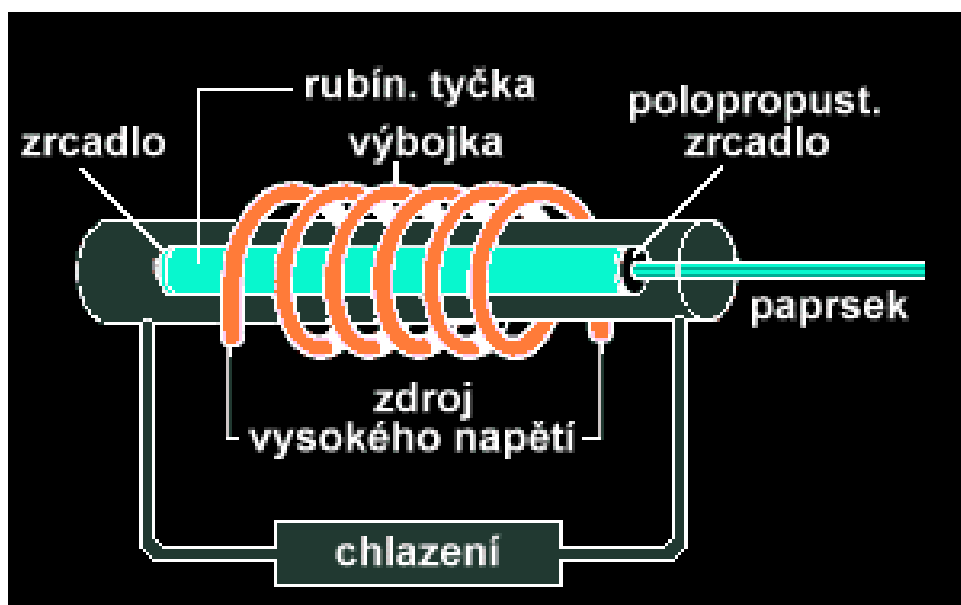
Tento nedostatek se podařilo odstranit s využitím více energetických hladin to znamená, že pokud bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu, bude se optické záření řetězovou reakcí zesilovat. Náhodná emise pak bude zanedbatelná vzhledem

k emisi stimulované, což má v konečném důsledku vliv na koherentnost a monochromaticnost záření. [1]

Začaly se tak objevovat další lasery lišící se svou vlnovou délkou záření, výkonem, účinností ale i různou konstrukcí.

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

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

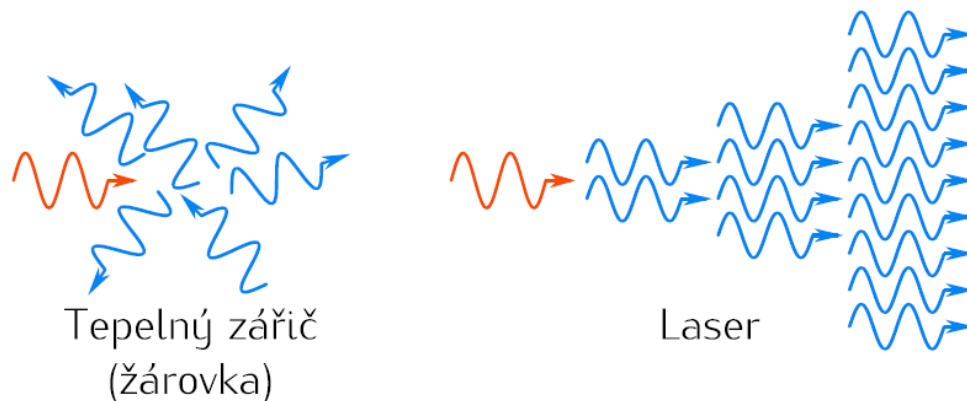


Obr. 1 Schéma rubínového laseru [1]

Od běžných světelných zdrojů se laserové světlo odlišuje v následujících vlastnostech:

- Záření je koherentní, tzn., že vlny emitované z různých míst aktivního prostředí mají pevný fázový vztah
- Záření se v prostoru nešíří všemi směry, ale v úzkém svazku. Zaostřením tak lze dosáhnout extrémně vysoké hustoty výkonu. [2]

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



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

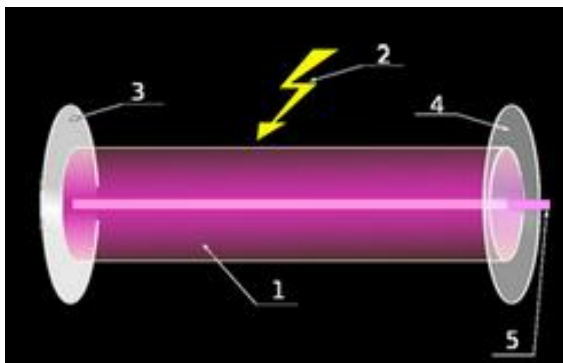
Důležitým parametrem při volbě laseru pro konkrétní aplikaci je kvalita jeho svazku. Mírou kvality laserového svazku je jeho schopnost být zaostřen.

1.2 Součásti laseru

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

Druhou skupinou je aktivní prostředí. Zde se tak může jednat o plyn nebo směs plynů, monokrystal, polovodič nebo volné elektrony. Kromě již zmiňovaného aktivního prostředí, ve kterém dochází ke stimulované emisi, patří mezi nezbytné součásti i třetí skupina a tou je příslušenství. Pod tímto označením si lze představit chladič, měření výkonu, kalibrace zařízení a čerpací zařízení nebo řídicí počítač. [3]

Na obrázku (Obr. 3) je schéma optického rezonátoru používaný u laseru.



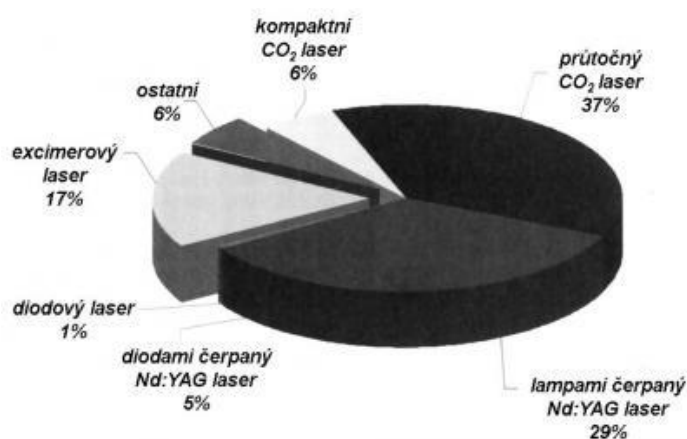
Obr. 3 Schéma optického rezonátoru [3]

Popis částí laserového rezonátoru:

1. Aktivní prostředí
2. Zdroj záření
3. Nепropustné zrcadlo
4. Polopropustné zrcadlo
5. Laserový paprsek

1.3 Použití laseru

V celé řadě oborů se dnes můžeme setkat s laserem například laserové ukazovátka, různé snímače používané v bezpečnostní technice, laserová vodováha a mnoho dalších. V neposlední řadě se také používá v lékařství, astronomii, chemii, energetice, ve výpočetní technice, dálkovém řízení. Každý z těchto oborů využívá jiný typ laseru a podle toho mají svůj podíl na trhu, uvedené v obrázku (Obr. 4). [5]



Obr. 4 Podíl na trhu-typy laserů [5]

2 POUŽITÍ LASERU V PRAXI

Vývoj laseru i jeho aplikace se neustále rozšiřují a inovují. Laserovou technologii definujeme jako opracování materiálu založené na:

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

Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. [5]

Ve strojírenství se používá pro dělení, svařování kovových i nekovových materiálů od 0,1 mm do tloušťky až 25 mm, vrtání, tepelné zpracování, značení a gravírování, povrchové úpravy, popisování výrobků, povlakování, a pro laserovou podporu konvenčního obrábění.

V elektrotechnice pro výrobu tištěných obvodů, oddělování kontaktů, vrtání mikro otvorů pro vodiče apod.

V textilním průmyslu pro dělení syntetických tkanin, v chemickém pro řezání a svařování plastů.

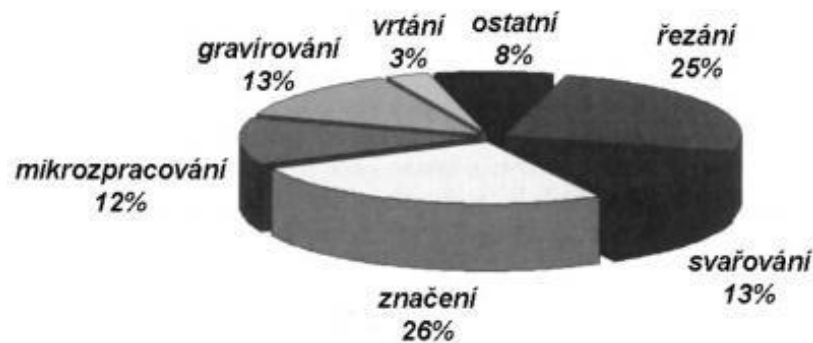
V lékařství umožňují lasery operace bez krevních ztrát – tkáň je odpařena. Dále lasery v infračervené oblasti spektra urychlují hojivé procesy. Korekce očních vad pomocí ultrafialového laseru metodou studené ablace, zlepšila život mnoha lidem, kteří museli nosit silné dioptrické brýle. [4]

Rozdělení podle procent je na obr. 5., alespoň co se týče strojírenské oblasti. Obrobitelnost materiálu laserem je dána zejména těmito vlastnostmi:

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

Obrobitelnost materiálu laserem je tím lepší, čím větší je pohltivost materiálu a menší jeho tepelná vodivost a odrazivost. [5]

Na obrázku (Obr. 5) je znázorněno jaký podíl v procentech tvoří jednotlivé technologie při obrábění laserem.



Obr. 5 Procento rozdělení jednotlivých technologií [5]

2.1 Klasifikace laserů podle různých kritérií

Hlavní dělení laserů je podle typu aktivní látky, vlnové délky, časového režimu, způsobu buzení, výkonu, účelu a dalších parametrů.

- podle skupenství aktivní látky: pevnolátkové, polovodičové, kapalinové a plynové, plazmatické
- podle vlnové délky: IČ, VIS, UF, RTG
- podle typu energetických hladin: molekulární, elektronové, jaderné
- podle časového režimu: impulsní, pulsní, kontinuální
- podle typu buzení: optické, elektrický výboj, chemická reakce
- podle výkonu: nízko výkonové, vysoko výkonové
- podle druhu chlazení aktivního prostředí: vzduch, voda – vzduch, voda – voda

Laser ve smyslu konkrétního technického provedení existuje v mnoha podobách od miniaturní laserové diody po terawattové systémy ve velkých halách. Proto je nutná základní kategorizace. Nejčastěji se dělí lasery podle aktivní látky a vlnové délky, tomu odpovídá i způsob buzení. Tím je většinou určen typ energetických hladin. Časový režim se volí vzhledem k požadované aplikaci, je řízen v elektrickém zdroji nebo uvnitř rezonátoru (Q-switch, mode-locking) Klasifikace podle výkonu souvisí s rozdělením laserů do bezpečnostních tříd v souladu s vládními vyhláškami. Typ chlazení je závislé na výkonu a účinnosti laseru, odvádí přebytečné teplo, ve které se promění nevyužitá energie buzení.[4]

2.2 Využití laseru podle časového režimu

Dle režimu generace (délky generovaného impulsu) lze pracovat v kontinuálním nebo pulsním režimu.

Kontinuální – spojitý režim – laser vyzařuje nepřetržitě po dobu delší než 2.5×10^{-1} s.

Pulsní – zářivá energie je vyzařována ve formě impulsů ne delších než 2.5×10^{-1} s a s opakovací frekvencí rovnou 1 s^{-1} nebo nižší x vyšší. [6]

Pulsní režim umožňuje dosáhnout velké hustoty energie pro zvýšení absorpce záření v materiálech a velkou odrazivostí, snížení objemového ohřevu materiálu v důsledku krátké doby interakce paprsku s materiálem a provedení řady vysokorychlostních operací při schopnosti rychlého zažhání a zhasínání paprsku. [20]

2.3 Průmyslové značení a laserové gravírování

Pro průmyslové značení či popis materiálu se využívají laserové systémy s nejnižším výkonem pohybujícím se v řádech několika málo desítek wattů, který je pro zanechání čitelné stopy na povrchu materiálu zcela dostačující. Vyšší vlnová délka CO_2 laserů je velmi vhodná pro popis organických materiálů (dřevo, kůže apod.) nebo materiálů s podobnou krystalickou strukturou, zatímco nižší vlnové délky pevnolátkových laserů dobře reagují s kovovými a mnohými plastovými materiály. Při proceduře značení se působením laserového paprsku částečně mění struktura značeného materiálu, částečně však také dochází k jejímu odnímání (vypařování). Výsledkem pak je na materiálu požadovaná kontrastní stopa. Protože stopa zaostřeného laserového paprsku fungující jako značící nástroj má minimální rozměry (dnes je možné pomocí laserové technologie vytvořit vzor i na vlasové struktuře), dokáže vytvářet neuvěřitelně detailní a propracované vzory. Díky přiloženému softwaru s CAD rozhraním lze snadno a rychle vytvářet, měnit či jednoduše importovat značící vzory ze souborů typu dxf, plt, cdr a dalších. Laserové značení má však i celou řadu dalších výhod. Protože laser na povrch značeného objektu žádný materiál nepřidává, naopak ho odnímá a mění jeho vlastnosti, značení se stává trvalým, nesmazatelným a nízkonákladovým, protože ke své práci nepotřebuje žádný spotřební materiál, pouze elektrickou energii nepřesahující v případě vláknových laserů příkon 250 W. Laserové značení je bezdotykové, fyzicky materiál nijak nezatěžuje, a proto značený objekt není třeba žádným způsobem upínat. [9]



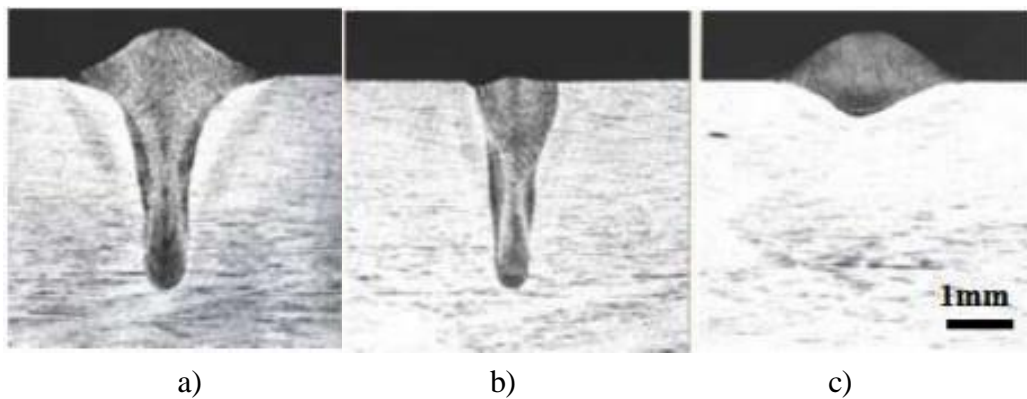
Obr. 6 Ukázka gravírování [9]

2.4 Laserové svařování a navařování

Pro laserové svařování či navařování se používají hlavně pevnolátkové lasery s pulzním režimem. Výkon těchto systémů se v tomto případě již nepohybuje v desítkách, ale ve stovkách wattů. Laserový paprsek je schopen při zaostření dodávat takovou vstupní energii na jednotku délky, která umožňuje vytvořit hluboký a úzký svar s minimálním teplotně ovlivněným pásmem a malým vnitřním pnutím materiálu, a to i u materiálů s tloušťkou až 12 mm. Laserem lze svařovat materiály, které jsou pomocí konvenčních metod svařitelné jen s obtížemi, jakož i svařovat na místech těžko dostupných pro jiné technologie. Kromě toho je ale možné materiály jinak svařitelné běžnými metodami svařovat pomocí laserové technologie mnohem rychleji a kvalitněji. Díky bezkontaktní práci paprsku nedochází ke znečištění svaru materiálem elektrod, a protože setrvačnost paprsku je velmi malá, je laserové svařování velmi vhodné i k automatizaci.

Laserové navařování je velmi vhodnou metodou pro snižování výrobních nákladů při opravách a údržbě nástrojů či forem, neboť se díky pokročilé technologii stává velmi efektivním a bezproblémovým. Řízení procesu opravy a vedení laserového paprsku k opravovanému místu je řešeno synchronizací pulzu laserového paprsku, přídavného materiálu a rychlosti posuvu. Díky minimálním rozměrům laserové stopy lze opět navařovat tak jemné detaily, hrany či tvary, které jsou jinou technologií neopravitelné.

<http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html> [9]

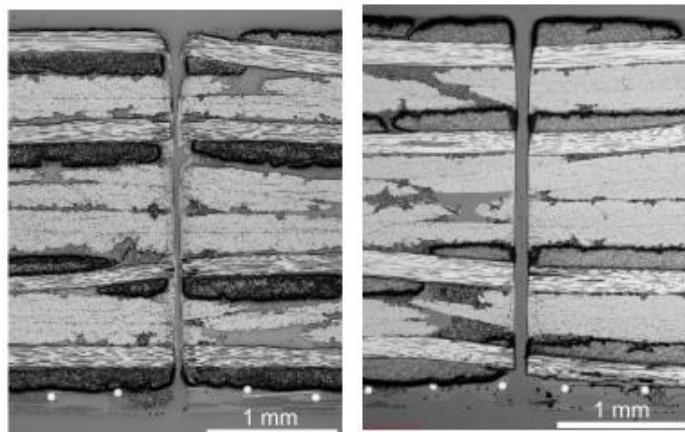


Obr. 7 a) Tvar hybridního svaru; b) Laserem generovaná „keyhole“;
c) Obloukové svařování [7]

2.5 Laserové vrtání a řezání

Díky vyšší účinnosti a výkonu při vysoké kvalitě svazku vláknových a diskových laserů jsou dosahovány vyšší řezné rychlosti, užší spára řezu a při vrtání vysoké hodnoty poměru hloubky ku průměru otvoru s minimální kuželovitostí. Příkladem je úzká spára řezu a vysoká řezná rychlost 150 mm/s při dálkovém řezání uhlíkových kompozitů o síle 3 mm kontinuálním vláknovým laserem o výkonu 3 kW (Obr. 7 - a) ve srovnání s opracováním pulsním režimem Nd:YAG laserem rychlostí 0,66 mm/s (Obr. 7 - b) [7]

K dělení materiálu, tj. k různému řezání a vrtání, jsou využívány CO₂, pevnolátkové Nd:YAG nebo vysokovýkonné diodové lasery označované zkratkou HPDL. Hodnoty výkonů se v těchto případech pohybují v tisících wattů. Řezání materiálu je prováděno třemi kroky: přímým spalováním materiálu, odtavením materiálu s následným vyfukováním vzniklé taveniny z místa řezu asistenčním plynem a odpařováním řezané hmoty. Pomocí laserové technologie lze dělit materiály velmi přesně, a to i křehké či lehce deformovatelné. Díky možnosti ovládnutí laserového paprsku je možné vytvářet i velmi komplikované tvary s vysokou kvalitou řezu. [7]



Obr. 8 a) Řezání vláknovým laserem; b) Řezání Q-switch laserem [9]

2.6 Laserové módy

Módová struktura (TEM transverse electromagnetic mode). V příčném průřezu paprsek vytváří buď jednoduchou stopu základní mod, nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické na obr. 9. Uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru a to má za následek tvar módu. Mód laseru určuje jeho vhodnost a využitelnost pro průmyslové použití. Největší hustoty energie, při dané výstupní intenzitě energie můžeme dosáhnout u laseru pracujících v modu TEM₀₀ [21]

	řez A v rovině kolmé na směr paprsku	řez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
1				TEM ₀₀ Gauss (řezání)
2				TEM ₀₁ (svařování, kalení)
3				TEM ₂₁
4				TEM ₃₂ (málo používané)
5				multimód (řezání)
6				multimód (nevhodně pro řezání)

Obr. 9 Módy laseru [21]

Uvedené vlastnosti laserového paprsku umožňují při jeho fokusaci vhodnou optickou soustavou soustředit do jednoho bodu mimořádně velkou hustotu energie, což má za následek natavení a odpaření materiálu, čímž se dosáhne požadovaného efektu zpracování.

Porovnání laserové technologie s ostatními technologiemi dle intenzity záření je uvedeno v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1 Hustota dosahovaných výkonů při různých technologiích [21].

Zdroj energie	Dosahovaná hustota výkonu [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]
Elektrický oblouk	$1\cdot 10^5$
Kyslíko-acetylenový plamen	$1\cdot 10^4$
Plazmový paprsek	$1\cdot 10^5$
CO ₂ laser	$1\cdot 10^9$
Nd laser	$1\cdot 10^{14}$
Elektronový paprsek	$4\cdot 10^8$

Průměr nefokusovaného paprsku bývá řádově několik milimetrů, z tohoto důvodu není vhodný pro aplikace, kde se nevyžaduje tepelně ovlivněná oblast, jako jsou technologie řezání či sváření. Vhodně zaostřený paprsek pro řezání CO₂ laserem s výkonem do 1 kW má průměr 0,1 mm, a může dosahovat hustoty energie až do $1,4\text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$ [21].

Z důvodu dosažení co nejlepšího toku energie paprsku $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ v místě jeho dopadu musíme paprsek co nejlépe fokusovat. Zároveň je nutné udržovat materiál vůči řezací hlavě a paprsku v relativně přesné pozici, aby se tento paprsek nedostal pod hloubku ostrosti, kde hustota toku energie klesá [21].

3 PLASTY VE STROJÍRENSTVÍ

Použití plastů v těžkém strojírenství má ve srovnání s jinými strojírenskými odvětvími, orientovanými především do oblasti spotřebního zboží, má své zvláštnosti. Jde většinou o aplikace podrobené velmi náročným provozním podmínkám - vysokému mechanickému namáhání včetně dynamického, vysokým teplotám, vlivu chemikálií, prašnému prostředí a často i povětrnostním vlivům.

Důležitá je i skutečnost, že ve většině případů jde o aplikace kusové nebo malosériové výroby, orientované často na velkorozměrné díly. Z těchto důvodů jejich realizace neumožňuje použití většiny běžných plastikářských zpracovatelských technologií, a do popředí tak vystupují plastové polotovary, zpracovávané třískovým obráběním, nebo polotovary odlévané, dokončované do potřebného tvaru rovněž většinou obráběním. U tvarově složitějších součástí se k jejich výrobě používají CNC stroje či jiné progresivní technologie - např. řezání vysokotlakým vodním paprskem. V některých případech lze pro individuální nebo malosériovou výrobu dílů, případně větších výrobků využít speciální laminační technologie, jako jsou např. metody ručního kladení, strojního nanášení, přesného navíjení a tažení, kterými jsou zpracovávány polymerní kompozity na bázi tvrditelných pryskyřic a výztuží ze skleněných, uhlíkových či aramidových vláken. [10]

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

Ve stále větší míře se prosazují ve stavbě chemických a energetických strojů a zařízení (součásti čerpadel, odsířovacích jednotek apod.) a v konstrukci výrobních strojů (např. včetně obráběcích strojů). Polymerní a kompozitní materiály umožňují dosáhnout nejen základního požadavku společného pro téměř všechny aplikace, tj. snížení hmotnosti, ale umožňují i mnohem větší "svobodu konstruování" a tím i lepší podmínky pro inovace. [11]

3.1 Dělení plastů

Vycházíme-li z praktického způsobu členění plastů pro strojírenskou konstrukci, lze je rozdělit komoditní plasty, konstrukční plasty, které jsou dražší, ale mají lepší mechanické vlastnosti a drahé speciální plasty. Ekonomická hlediska preferují levné plasty široké spotřeby tedy komoditní plasty. Zde je příklad některých plastů. [11]

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

3.2 Polymetylmetakrylát-PMMA

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

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

Modul pružnosti v tahu je vysoký a pohybuje se mezi 3000-3300 MPa. Pevnost v tahu je mezi 70-80 MPa. [12]



Obr. 10 Výrobek z PMMA

3.3 Polyethylen-PE

Polyethylen je lehčí než voda, používá se v rozsahu teplot od -50°C do 85°C . Je výborným elektroizolačním materiálem a odolává většině chemikáliím. Pro jednoduché zpracování a výborné vlastnosti se dobře uplatňuje v nejrůznějších oblastech. Vyrábí se z něj desky a fólie. Používá se v obalové technice (balení potravin a spotřebního zboží). V domácnosti se používají polyethylenové nádoby, různé vaničky, apod. Nalezneme ho v součástkách chladniček a vysavačů, v rozhlasových a televizních přijímačích a jinde. Měkký polyethylen je ohebný i za mrazu, proto jej lze použít k výrobě různých hadic a potrubí. [13]

Rozlišují se dva základní druhy polyethylenu: PE-LD (s nízkou hustotou) a PE-HD (s vysokou hustotou). PE-HD má vysoký stupeň krystality, což způsobuje jeho vysokou chemickou odolnost a odolnost proti rozpouštědlům. Podmínkou vysokého stupně krystality je linearita a stereoregularita řetězců, čehož se dosahuje při polyinzerci.

V poslední době se PE-HD používá při výrobě kompozitního materiálu na bázi dřeva - woodplastic, který se používá jako náhrada dřeva v mnoha oborech.

Modul pružnosti se pohybuje od 2600-2900 MPa. Pevnost v tahu je mezi 60-85 MPa.

Polyethylen je v současnosti nejpoužívanějším polymerem na světě. Jeho roční produkce je odhadována na více než 60 milionů tun. [14]



Obr. 11 Výrobek z PE

3.4 Polyamid 66-PA66

Polyamid 66 je těžší než voda, Používá se v rozsahu -30 až 120° C. Je to odolný, pevný a trvanlivý materiál. Velmi dobře se zpracovává všemi běžnými způsoby jako je vstřikování, vytlačování, vyfukování. Obecně se využívá na výrobu fólií a vláken, zejména je pak vhodný pro spojovací součástky a další technické komponenty. Vzhledem k samomazným vlastnostem je ideální pro kluzná ložiska. Přijímá přibližně 2% vzdušné vlhkosti (méně než polyamid-6). Modul pružnosti se pohybuje kolem 3000 MPa. Pevnost v tahu je někde kolem 70 MPa. Nylon má jednu zajímavou vlastnost a to takovou, že je samozhášecí. [15]



Obr. 12 Výrobek z PA 66

4 METROLOGIE A JAKOST VE STROJÍRENSTVÍ

Metrologie je vědní obor, který zahrnuje poznatky týkající se měření, jejich praktického provádění a hodnocení jejich výsledků. Samotný pojem měření je v laické veřejnosti vnímán dosti vágně a nepřehledně. Měření nás přitom provází od narození až do smrti (porodní hmotnost, délka – rozměry naší poslední tělesné schránky). Měření tělesné – měření a sledování teploty, měření času, měření kupní síly apod. [17]

Metrologické metody a nástroje jsou natolik potřebné v jakosti, že se odborník v jakosti neobejde bez určitých metrologických znalostí. Metrologie je základní metodou objektivního poznání reality pomocí kvantitativních (tedy měřitelných) znaků jakosti.

Oblast jakosti a oblast metrologie se rozvíjejí ve vzájemných souvislostech nejrůznějšího druhu. Neustálé zlepšování jakosti měřicích přístrojů a zařízení umožňuje zvyšovat přesnost měření technických a fyzikálních veličin či znaků (zmenšování nejistoty měření). Také umožňuje rozvoj nových metod měření a rozšiřování palety měřených znaků např. zjišťovat u drsnosti povrchů i tvary profilu nerovností, které jsou rozhodující pro mechanické i estetické vlastnosti povrchů. Zdokonalování jakosti řešení měřicích přístrojů a soustav přineslo v minulosti měřicí přístroje »3D«, tj. měření rozměrů v trojrozměrném prostoru, bez pracného ustavování měřeného kusu do přesné polohy, a pak následně i automatizaci tohoto měření. Zlepšování jakosti měřicích přístrojů a zařízení zlepšuje jejich funkční schopnosti – hlavně přesnost měření a nejistotu měření. [16]

4.1 Chyby měření a jejich příčiny

Účelem měření je buď určit takové veličiny, jichž by mohlo být použito k vyjádření přírodních zákonů nebo k naměření hodnot nutných pro hospodářský styk, nebo se měření používá k odměřování hodnot, které byly z technických důvodů předepsány a musí být dodrženy, tedy ke kontrole.

Abychom zjistili hodnotu nějaké veličiny, musíme provádět měření. Zařízení, jímž měříme, nazýváme měřicí nebo kontrolní prostředek; jímž může být míra, měřidlo, měřicí přístroj nebo měřicí stroj. Tato zařízení však nejsou nikdy dokonalá, proto se nám nepodaří určit velikost měřené veličiny zcela bez chyb. Opakujeme-li totiž měření za stejných podmínek, vidíme, že výsledky měření se od sebe více či méně liší. Je to způsobeno nepřesností vlastního měřicího zařízení a nedodržením konstantních podmínek, při nichž se měří. Vidíme, že mezi hodnotou naměřenou a hodnotou skutečnou vzniká rozdíl. Tento rozdíl nazýváme chybou měření.

4.2 Rozdělení chyb měření

Hrubé chyby

Hrubé chyby jsou zpravidla velké, jejich příčinou je nesprávně provedené měření, dále chyby vzniklé nesprávným čtením údaje, použitím měřicího přístroje, na němž je při měření nějaká závada, nesprávnou manipulací s přístrojem apod. Jsou takové velikosti, že měření s těmito chybami vznikají velké rozdíly v naměřených hodnotách. Zjistí-li se existence těchto chyb, pak je při zpracování výsledku měření vylučujeme.

Chyby náhodné

Náhodné chyby jsou způsobovány náhodnými vlivy, které jsou nepravidelné, působí náhodně podle okamžitých podmínek jednotlivých měření. Přes svoji nahodilost podléhají určitým zákonitostem, které objevil Gauss. Zjistil totiž, že výsledky při velkém počtu měření jsou rozloženy podle zákona, který nejčastěji označujeme jako normální zákon rozdělení. Pomocí těchto zákonitostí může být velikost náhodné chyby odhadnuta, popřípadě lze stanovit meze, uvnitř kterých téměř s jistotou leží skutečná hodnota měřené veličiny. Vzdálenost těchto mezí charakterizuje přesnost měření.

Předpokládáme-li, že hrubá chyba neexistuje, je možno psát

$$y = x_0 + \Delta + \delta \quad (1)$$

Kde: y – naměřená hodnota

x_0 – skutečná hodnota měřené veličiny,

Δ – systematická chyba,

δ – náhodná chyba

Skutečná hodnota měřené veličiny potom z (1) je

$$x_0 = y - \Delta - \delta \quad (2)$$

Kde systematická i náhodná chyba mohou mít znaménko jak kladné, tak záporné.

Chyby systematické

Chyby systematické vznikají z příčin, které systematicky ovlivňují výsledek měření. Jsou způsobeny soustavnými vlivy působícími trvale a jednoznačně co do smyslu i do velikosti. Jejich charakteristickou vlastností je, že jejich velikost může být pro každý konkrétní případ stanovena – jsou ovladatelné. Charakterem jsou systematické chyby osobní (zaokrouhlování čtených hodnot na vyšší hodnoty) nebo věcné (konstrukční nepřesnosti přístroje).

Znamé systematické chyby mají určitou hodnotu a určité znaménko. Systematickou chybu stanovenou z hrubého výsledku měření můžeme vyloučit odpovídající korekcí. Korekce odpovídá hodnotě systematické chyby hrubého výsledku měření a má opačné znaménko.

Korigovaná hodnota = naměřená hodnota – systematická chyba, nebo naměřená hodnota + korekce. Neznámé systematické chyby mají neurčité znaménko (\pm), a proto se nedají použít ke korekci neměřené hodnoty, ale jsou zahrnuty do nejistoty měření. Při výpočtu nejistoty se s nimi zachází jako s náhodnými chybami.

Systematické chyby můžeme podle jejich příčiny rozdělit na

- Chyby přístroje
- Chyby normálu
- Chyby způsobené pozorováním
- Chyby způsobené vlivem měřící síly a tlaku
- Chyby způsobené vlivem měřené součásti

- Chyby způsobené vlivy okolí

Za předpokladu, že neexistuje náhodná chyba měření, tj. $\delta=0$, platí pro skutečnou hodnotu měřené veličiny [18]

$$x_0 = y - \Delta \quad (3)$$

a velikost systematické chyby

$$\Delta = y - x_0 \quad (4)$$

4.3 Měření drsnosti povrchu

Požadavky na nové stroje stavějí stále více do popředí otázku měření drsnosti povrchu. Z těchto požadavků to bývá nejčastěji zvýšení výkonnosti, spolehlivosti, životnosti a zvláště vyměnitelnosti. Zavedením jednotné lícovací soustavy s jemně odstupňovanou řadou druhu uložení se objevila potřeba jemněji předepisovat kvalitu obrobené součásti. Je tedy na konstruktérovi, aby volil vhodně drsnost povrchu. Volba vhodné drsnosti povrchu ovlivňuje přesnost chodu, velikost opotřebení, vrubovou pevnost, mazací podmínky, schopnost odolávat účinkům koroze atd. a ovlivňuje také cenu výrobku.

Problém drsnosti povrchu je značně složitý. Drsnost povrchu můžeme považovat také za fyzikální stav. Například při obrábění působí v povrchové vrstvě vysoké tlaky a vysoké teploty, což může způsobit i změnu struktury této vrstvy. Vede to například ke ztužení materiálu nebo k dalším fyzikálním nebo chemickým změnám.

Obrobený povrch se vždy uchyluje od ideální drsnosti a ideálního geometrického tvaru. Drsností povrchu rozumíme rozměrově nepatrné nepravidelnosti povrchu (vyvýšeniny a prohlubně, důlky, rýhy atd.) Tyto nepravidelnosti vznikají jako stopy po břitech nástrojů, po brusných zrnech, vznikají i odléváním, tvářením atd.

Drsnost povrchu je souhrn nerovností skutečného povrchu s roztečí menší, než je odpovídající mezní rozteč nerovností. Tyto nerovnosti mohou být měřeny jako úchytky zjištěného profilu od vztažné čáry v mezích stanoveného úseku. Při měření drsnosti povrchu se vychází z rovinných řezů povrchem.

Geometrický profil – řez geometrickým povrchem rovinou vhodně položenou k tomuto povrchu.

Skutečný profil – řez skutečným povrchem rovinou vhodně položenou k jeho geometrickému povrchu.

Zjištěný profil – řez zobrazeným povrchem rovinou vhodně položenou k jeho geometrickému povrchu.

Střední čára – je čára, která je základnou pro vyhodnocování zjištěného profilu a k níž se vztahují číselné úchytky tohoto profilu.

Rozteč nerovností – je vzdálenost nerovností zjištěného povrchu.

Délka měřeného úseku L je nejmenší délka úseku zjištěného profilu, nutná pro stanovení charakteristických číselných hodnot drsnosti povrchu.

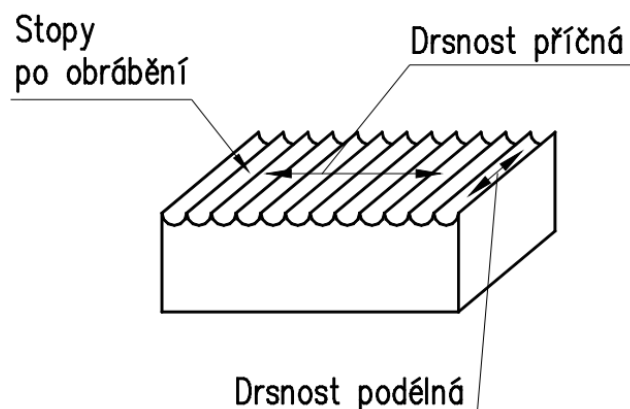
4.4 Druhy drsnosti

Drsnost povrchu u obrobených povrchů tvoří stopy po řezném nástroji, u neobrobených například hladkost formy pro odlévání.

Rozeznáváme drsnost:

- příčnou – je měřená kolmo na stopy po nástroji, je největší a proto ji obvykle měříme;
- podélnou – je měřená ve směru stop po nástroji, je nejmenší.

Tam, kde stopy po nástroji neumíme určit, měříme obvykle ve dvou kolmých směrech a bereme tu větší hodnotu. [19]



Obr. 13 Druhy drsností [19]

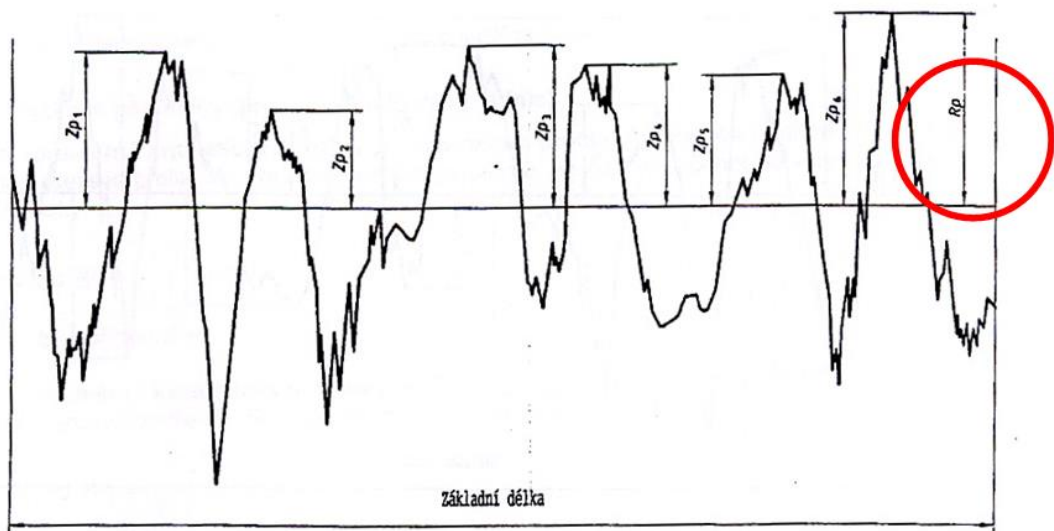
4.5 Parametry profilu nerovnosti

Dělí se na:

- Amplitudové (výškové) parametry, které se určují pouze velikostí vrcholů nebo prohlubní, resp. Obojí, bez ohledu na rozteč (např. R_a)
- Frekvenční parametry (v podélném směru), které se určují pouze při roztečích nepravidelností podél plochy (např. průměrná šířka prvků profilu R_{sm})
- Hybridní parametry, které jsou určeny kombinací amplitudy a rozteče (např. střední vlnová délka)

4.6 Největší výška výstupku profilu R_p

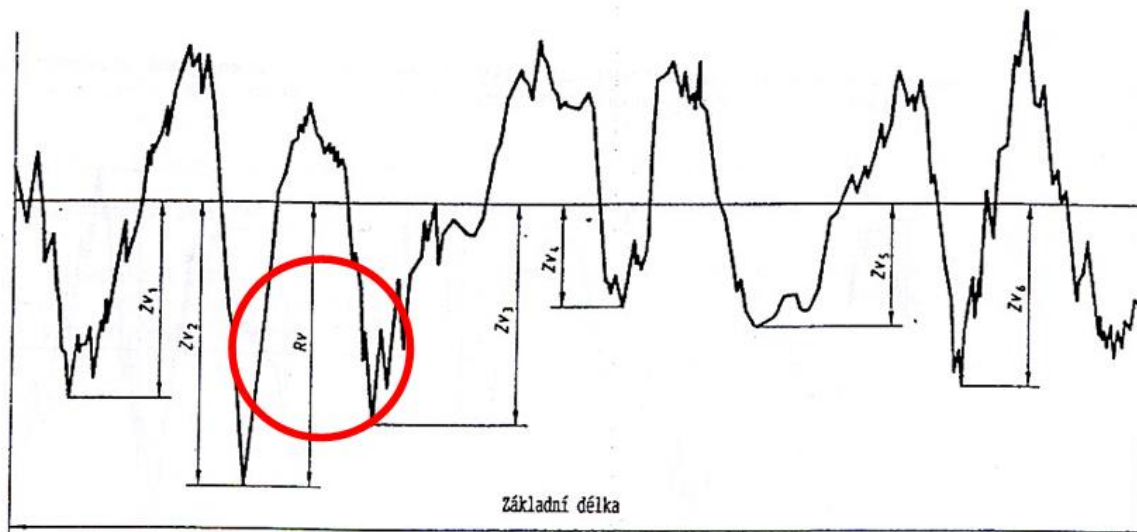
Největší výška výstupku profilu je největší výška výstupku profilu v rozsahu největší délky. [27]



Obr. 14 Největší výška výstupku profilu R_p [27]

4.7 Největší hloubka prohlubní profilu R_v

Největší hloubka prohlubně profilu je největší hloubka prohlubně v profilu v rozsahu základní délky [27]



Obr. 15 Největší hloubka prohlubně profilu R_v [27]

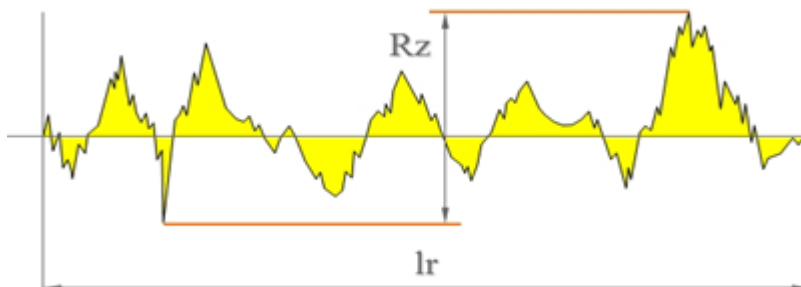
4.8 Největší výška profilu R_z

Největší výška profilu R_z je vzdálenost mezi čarou výstupků profilu R_p a čarou prohlubní profilu R_v v rozsahu základní délky.

$$R_z = R_p + R_v \quad (6)$$

Kde R_p – je výška největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky,

R_v – hloubka největší prohlubně profilu v rozsahu základní délky



Obr. 16 Největší výška profilu R_z [18]

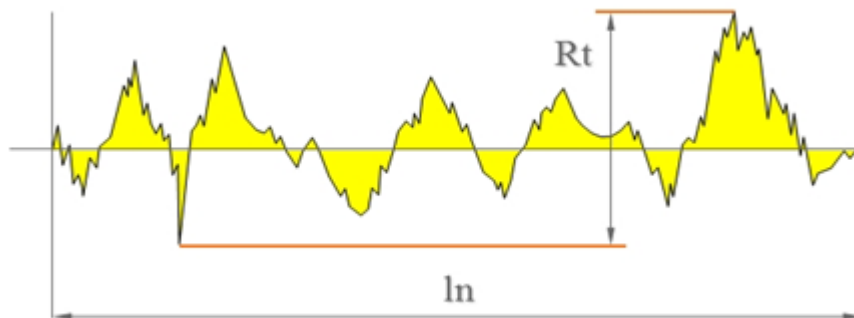
4.9 Celková výška profilu R_t

Celková výška profilu je součet výšky Z_p největšího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

$$R_t = Z_{p_{max}} + |Z_{v_{max}}| \quad (7)$$

Kde $Z_{p_{max}}$ – je výška největšího výstupku profilu v rozsahu vyhodnocované délky,

$Z_{v_{max}}$ – hloubka největší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky



Obr. 17 Celková výška profilu R_t

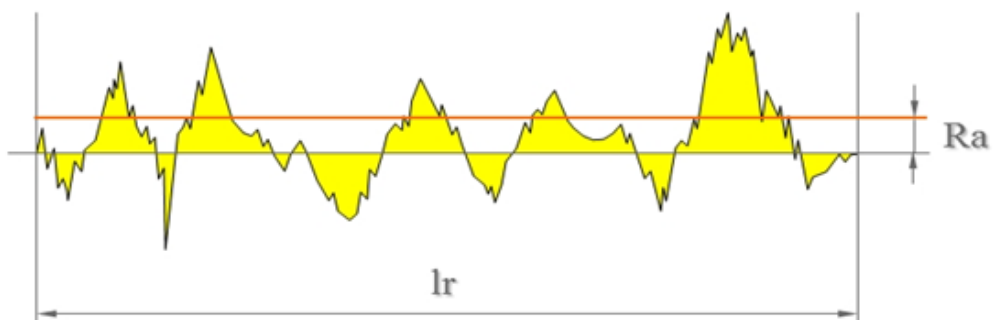
4.10 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a je aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (8)$$

Kde l_r – je rozsah základní délky

$Z(x)$ – průměr absolutních hodnot v rozsahu základní délky



Obr. 18 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [18]

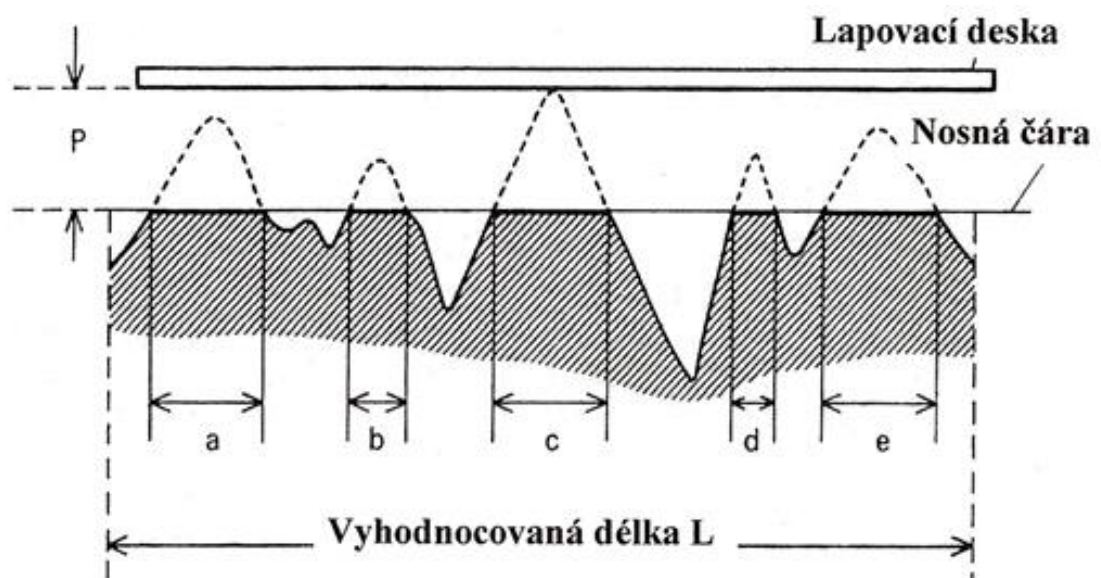
4.11 Materiálový poměr Rmr

Materiálový poměr označovaný symbolem Rmr je poměr (vyjadřovaný pomocí procent) délky nosné plochy v kterékoliv hloubce profilu k celkové délce profilu.

$$Rmr = \frac{a+b+c+d+e}{L} \times 100 \% \quad (9)$$

Kde L – vyhodnocovaná délka

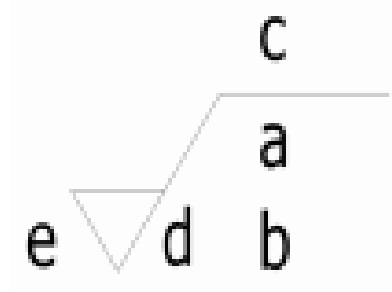
a, b, c, d, e – nosná plocha



Obr. 19 Materiálový poměr Rmr [27]

4.12 Značení drsnosti


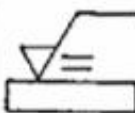

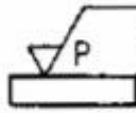

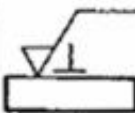

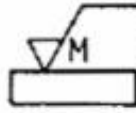
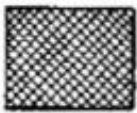
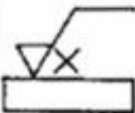

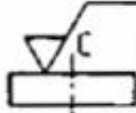
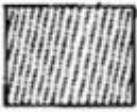
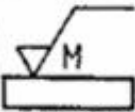

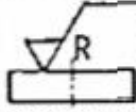
Značení drsnosti povrchu v technické dokumentaci určuje norma ČSN EN ISO 1302.



Obr. 20 Značka drsnosti [22]

Popis obrázku (Obr. 20):

- a) požadavek na strukturu povrchu
- b) případné další požadavky na strukturu povrchu
- c) výrobní proces (způsob opracování, povlakování...)
- d) orientace nerovností
- e) přídavek na obrábění

SMĚR NEROVNOSTÍ	OZNACENÍ	SMĚR NEROVNOSTÍ	OZNACENÍ
1 		5 	
2 		6 	
3 		7 	
4 		8 	

Obr. 21 Orientace nerovností [22]

Popis obrázku (Obr. 21):

1- rovnoběžný s obrysovou čarou

2-kolmý k obrysové čáře

3-zkřížený, šikmo k obrysové čáře

4, 6-libovolný

5-bodový např.po elektrojiskrovém obrábění

7-přibližně kruhový ke středu povrchu

8-směřující ke středu povrchu (např. přibližně cykloidální)

4.13 Přístroje na měření drsnosti

Pro kontrolu a měření parametrů povrchu se používají laboratorní i dílenské měřící přístroje a zařízení:

- Mechanické
- Elektro – mechanické (piezoelektrické, indukční)
- Optické (interferenční, světelné řezy)

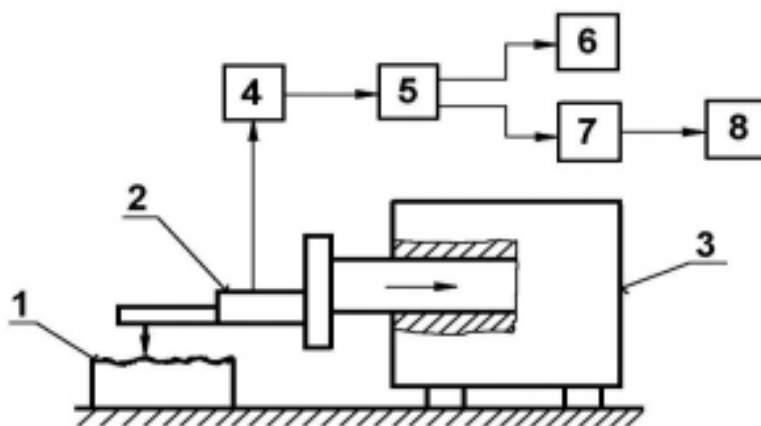
Dále jsou metody kontroly povrchu :

- Kvalitativní – vzorkovnice, mikroskopy
- Kvantitativní – profilometry, interferometry [25]

4.13.1 Měření pomocí dotykového profilometru

Při tomto způsobu měření se porovnává kontrolovaná plocha se vzorovou (etalonovou) komparačními měřidly. Výsledkem je rozdíl drsností porovnávaných povrchů. Do této skupiny měřidel patří mechanické komparátory, pneumatické komparátory, elektrické komparátory a fotoelektrické komparátory. Metoda umožňuje zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti a lze ji využít pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovnosti povrchu. [26]

Na obrázku (Obr. 22) je uvedeno schéma dotykového profilometru pro měření drsnosti povrchu.



Obr. 22 Dotykový profilometr [26]

Popis profilometru:

- 1 – měřená součást
- 2 – snímací hlavice s měřicím hrotem
- 3 – posuvový mechanismus
- 4 – zesilovač
- 5 – filtr
- 6 – registrační jednotka
- 7 – jednotka zpracovávající měřicí signál
- 8 – zobrazovací jednotka

Popis zařízení

Mechanická část:

- stolek, na který se umísťuje měřená součást,
- rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje určitou konstantní rychlostí a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu,
- přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku, popř. pneumaticky.

Elektronická část:

- transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu, měřené plochy převede na elektrický signál, který se zpracovává (číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu). [26]

4.13.2 Bezdotykové měření pomocí snímače CLA

Takový měřicí přístroj může být reprezentovaný například přístrojem Taylor Hobson Talysurf CLI.

Přístroje Talysurf CLI jsou vysoce účinnými měřicími prostředky k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením. Systém CLI nabízí možnosti měření a analýzy povrchu ve třech osách, s využitím dotykové nebo bezdotykové měřicí techniky. Snadno ovladatelné a výkonné měřicí přístroje, vhodné i pro kontrolu velkého počtu součástí, jsou připraveny provádět analýzu dat při hodnocení struktury povrchu z jednoho profilu řezu (2D) i profilu plochy povrchu (3D).

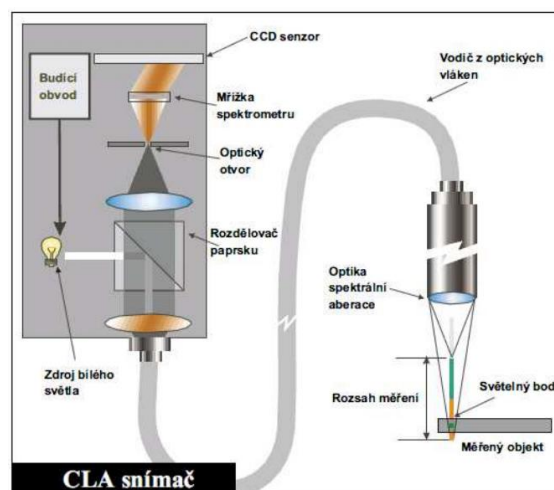
Hlavní předností přístrojů je univerzálnost jejich využití, která vyplývá z možností systému měřit buď indukčním dotykovým způsobem Form Talysurf, nebo bezdotykovým způsobem reprezentovaným laserovou triangulační sondou a CLA konfokálním snímačem (Chromatic Length Aberration – CLA).

Uvedené tři způsoby měření zajišťují prakticky neomezené možnosti měření struktury povrchu z hlediska jakosti, přesnosti a druhu materiálu součástí. Navíc je systém CLI vybaven automatickým posuvem ve všech osách (X, Y, Z), s rychlostí až do 30 mm/s, což umožňuje rychlé automatické měření. Připravenost přístroje pro kontrolu širokého sortimentu součástí dokumentuje i velikost měřicího prostoru (max. 200 x 200 x 200 mm) a nosnost stolu (max. 20 kg). Praktickou předností Talysurf CLI je spojení tradičního 2D a prostorového hodnocení 3D do jednoho výkonného přístroje. I když je systém CLI speciálně konstruován pro měření 3D, je současně vybaven mechanickými i analytickými pro-

středky pro komplexní měření 2D. Lze tak jedním přístrojem monitorovat výzkum a vývoj, provádět studijní analýzy (např. opotřebení), rutinní inspekci i řídit výrobní procesy. Vedle zřejmého ekonomického přínosu má uživatel stále možnost porovnávat výsledky měření se všemi, kteří ještě používají jen tradiční měření 2D. Univerzálnost systému Talysurf CLI zajišťuje možnost využít na jednom přístroji až čtyři různé měřící hlavy ke kontrole všech kombinací materiálů a kvality povrchů součástí. Základem programového vybavení přístrojů Talysurf CLI je firemní program Talymap, který zabezpečuje veškeré řídicí, kontrolní, vyhodnocovací i informační služby. Výkonný program pro analýzu dat zahrnuje standardní funkce vyhodnocení struktury povrchu 2D a 3D, včetně vyjmutí profilu 2D z povrchu 3D, měření ploch a objemů, výšky a vzdálenosti stupňů, analýzy výstupků, nosného podílu, velikost a hustotu zrn, atd. Významná je vybavenost zařízení pro automatizaci měření. Možnost programování automatického měření dávek součástí zefektivní jejich kontrolu. Použití nabízených měřících postupů nejen urychlí proces analýzy, ale současně zajistí jednotnou formu prezentace výsledků měření. [24]

Princip snímače CLA:

Bílé světlo je rozkládáno a optikou se spektrální aberací je směřováno na kontrolovaný povrch. Optika rozloží světlo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena jen určitá vlnová délka. Světlo odražené z povrchu prochází otvorem, který propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr vychýlí světlo na CCD senzor, kde je každému bodu přiřazena prostorová poloha. [25]



Obr. 23 Princip snímače CLA [25]

5 CÍL PRÁCE

Z desky PMMA se za pomoci CO_2 laseru vypálily dva testovací vzorky a na nich se vygravírovala definovaná místa o stejném výkonu P [W] a jiné řezné rychlosti f [mm/s]. Vzorky byly vypáleny pulzním a kontinuálním režimem na laseru ILS 3NM. Na vzorcích byly měřeny drsnosti bezkontaktním způsobem přístrojem Taylor Hobson Talysurf CLI 500, kde se projeví řezné podmínky na zkoumaném povrchu.

Cílem práce je tedy porovnání kontinuálního a pulzního režimu při obrábění CO_2 laserem.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 POPIS A PARAMETRY POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

Pro přípravu zkušebních vzorků bylo využito školních zařízení – CO₂ laser ILS 3NM, pro vyřezání zkušebních vzorků a gravírování a Taylor Hobson Talysurf CLI 500 pro bezkontaktní měření struktury povrchu.

6.1 Laserová tiskárna ILS 3NM

Laserový systém ILS 3NM je zařízení vhodné pro značení, gravírování a řezání různých druhů materiálů, jako jsou plasty, pryž, sklo, dřevo, kov, keramika aj. Zdrojem laserového záření je CO₂. Zařízení má pojezdový stůl a otevírací čelní dvířka, která slouží pro značení nekonečných desek. Laser se ovládá pomocí softwaru Corel Draw. K počítači se zařízení připojuje stejně jako tiskárna. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2). [23]



Obr. 24 Laser ILS 3NM ve školních dílnách [23]

Tab. 2 Technické parametry laserové tiskárny ILS 3NM [23]

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 stroje
Napájení	~110 / ~240 V
Chlazení	Vzduchové

6.2 Měřicí přístroj Taylor Hobson Talysurf CLI 500

Talysurf CLI 500 je nejmenší provedení (měřicí prostor 50x50x50 mm ; délka posuvu 50 mm) charakterizované ekonomickou a prostorovou efektivností. Je určen především pro měření malých součástí. Pro instalaci přístroje stačí půdorysná plocha stolu 500x310 mm. I Talysurf CLI 500 je připraven automaticky provádět měřicí operace a uvolnit pracovní kapacitu operátora. [24]



Obr. 25 Příklad přístroje Taylor Hobson CLI 500

V tabulce (Tab. 3, Tab. 4, Tab. 5) jsou uvedeny technické údaje pro zařízení Taylor Hobson CLI 500.

Tab. 3 Technické specifikace přístroje

Talysurf CLI 500 (funkce, velikost, hmotnost)	
Prostor měření D x H x V	50 x 50 x 50 mm
Délka posuvu na osách X – Y - Z	50 mm
Osově rozlišení (datová rozteč X - Y)	0,5 μm
Rozměry D x H x V	500 x 310 x 450 mm
Nosnost	10 kg
Hmotnost	55 kg
Rychlost měření	30; 15; 10; 5; 1; 0,5 mm/s
Rychlost polohování (osy X – Y)	30 mm/s maximum

Tab. 4 Přímost dráhy posuvu

Talysurf CLI 500				
Přímost dráhy posuvu				
(délka jednoho profilu)				
	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm
Výstupek – prohlubeň (Pt) nekorigováno	0.6 μ m	0.1 μ m	0.2.5 μ m	5 μ m
Výstupek - prohlubeň (Pt) korigováno0.3 μ m	0.3 μ m	0.4 μ m	0.7 μ m	1.2 μ m

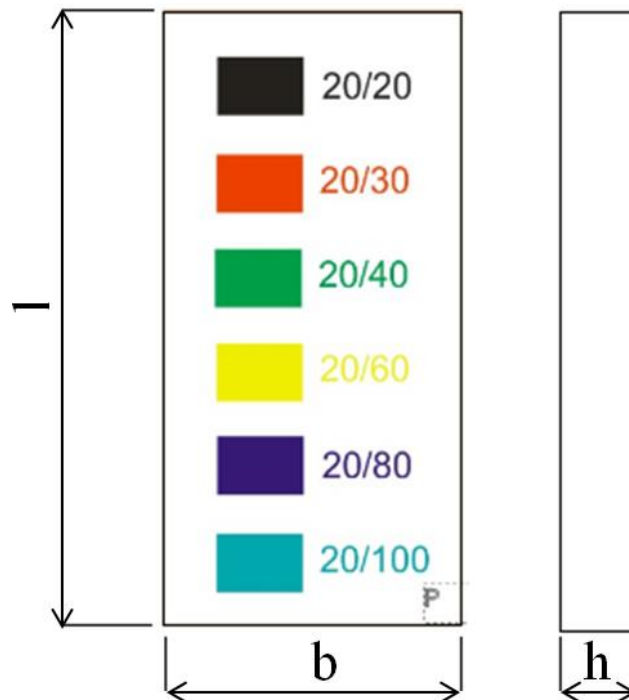
Tab. 5 Typ a vlastnosti snímače

Talysurf CLI 500				
Typ a vlastnosti snímače				
	Rozsah	Vertikální rozlišení	Příčné rozlišení	Sklon měření
Laserový triangulační snímač 2000 Hz frekvence snímání	10 mm	1 μ m	30 μ m	40°4
Laserový triangulační snímač 2000 Hz frekvence snímání	30 mm	3 μ m	70 μ m	25°4
CLA konfokální snímač 5000 Hz frekvence snímání	3 mm	100 mm	5 μ m	13°
CLA konfokální snímač 5000 Hz frekvence snímání	1 mm	3 nm	2 μ m	20°
CLA konfokální snímač-HE 5000 Hz frekvence snímání	300 μ m	10 nm	1 μ m	25°
Form Talysurf indukční snímač s diamantovým hrotem R 2 μ m	2,5-0,5-0,1 mm	40-10-2 nm	2 μ m	45°5

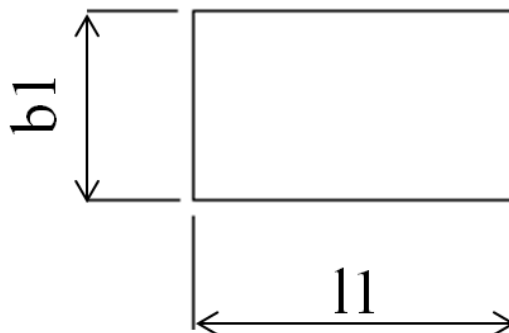
7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Zkušební vzorky byly vypáleny pro měření drsnosti povrchu z běžně dostupného konstrukčního materiálu PMMA ve formě desky. Uvnitř vypáleného tělesa byla dále gravírovaná místa. Veškeré rozměry vypalovaných vzorků, byly voleny s ohledem na možnosti měřicího přístroje.

Označení rozměrů a číselné hodnoty jsou uvedeny na obrázcích (Obr. 26, Obr. 27) a tabulce (Tab. 6).



Obr. 26 Rozměry tělesa k vypálení



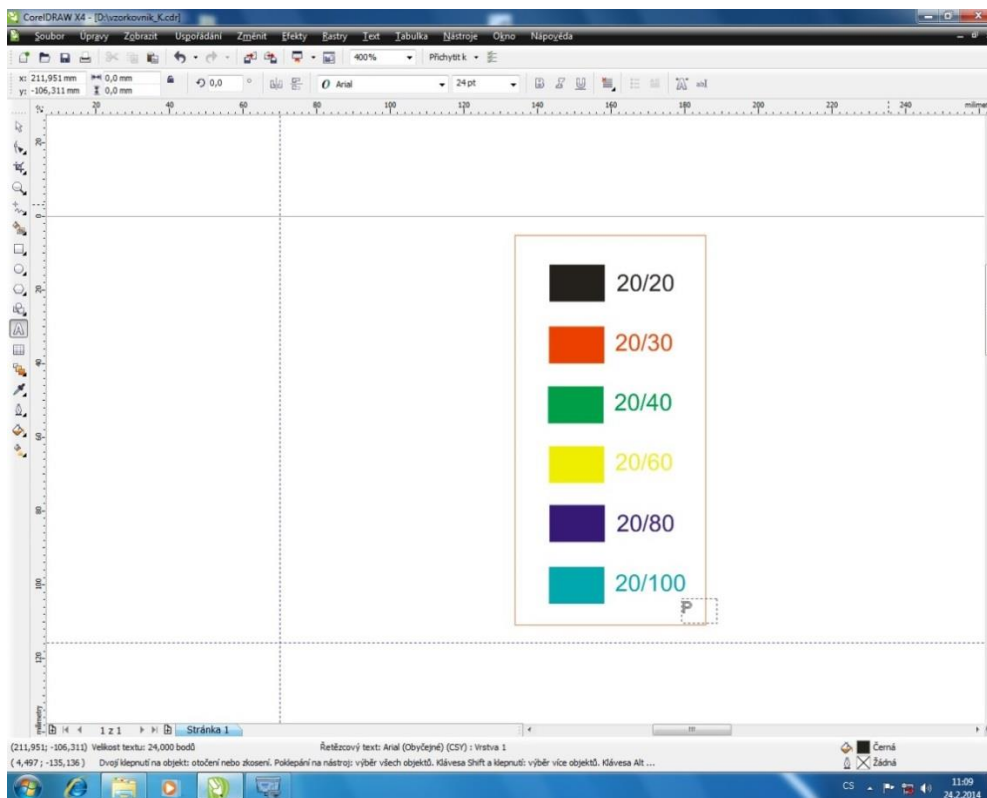
Obr. 27 Rozměry tvaru ke gravírování

Rozměry k přípravě vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6).

Tab. 6 Rozměry tělesa pro měření

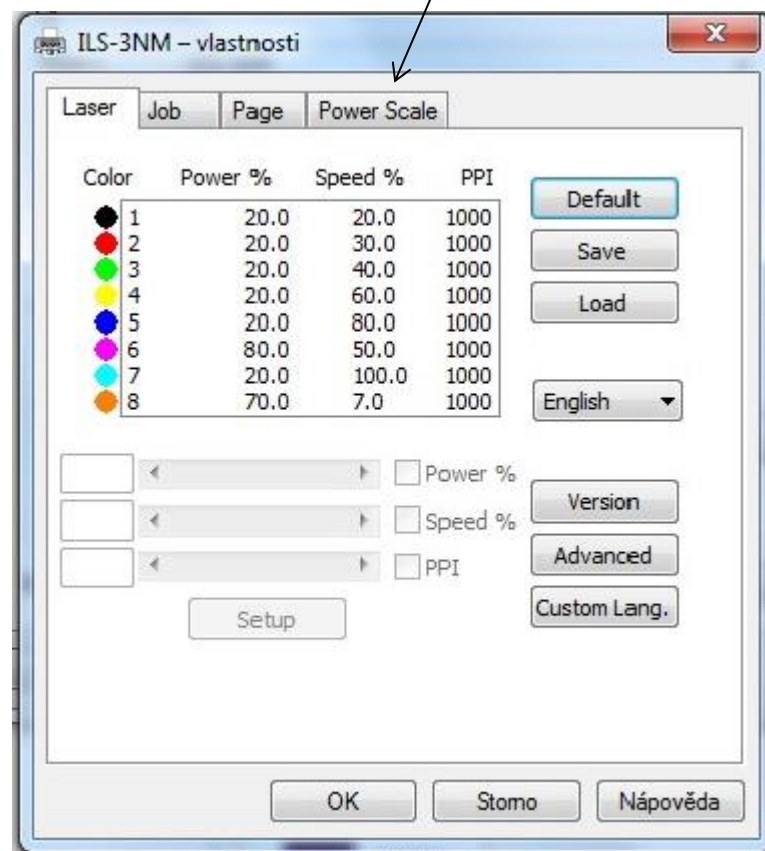
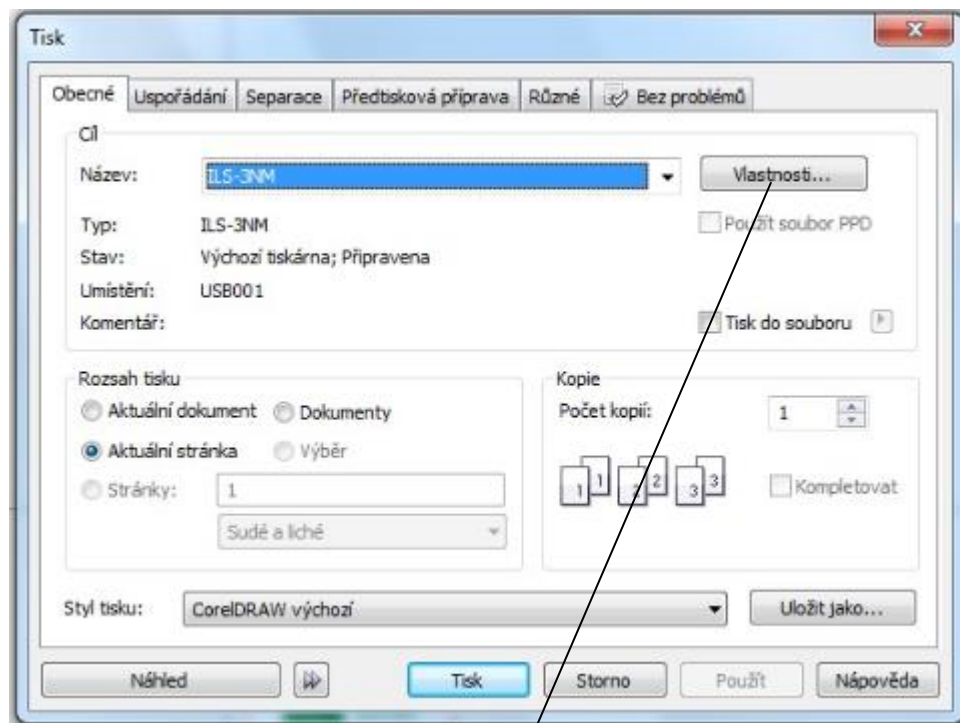
Zkušební těleso		
Rozměry v (mm)		
b	šířka	58
l	délka	108
h	tloušťka	4
b1	šířka	12
l1	délka	18

Vzorky byly navrženy v programu Corel Draw, který komunikuje s laserem ILS 3NM. V Corel Draw je třeba mít správně nadefinovanou plochu, která by měla odpovídat velikosti tiskové plochy laseru tj. 600 mm x 495 mm.



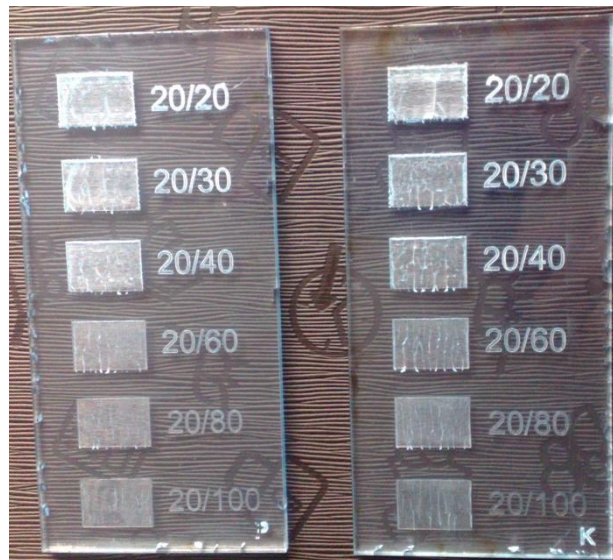
Obr. 28 Návrh zkušebních tělísek

Ke každé barvě se dají přiřadit různé řezné rychlosti i výkon laseru a tyto parametry lze zadat v nastavení laseru.



Obr. 29 Nastavení parametrů vypalování a gravírování

Po nastavení parametrů laseru výkonu P [W] a řezné rychlosti f [mm/s] se musela provést kalibrace laseru a fokusace čočky podle přiloženého návodu ke stroji. Po té mohl být odeslán příslušný soubor pro vypálení, vyzkoušel se nejprve na nečisto, pro případné odhalení nedostatků (např. špatné vložení materiálu). Na obrázku jsou vidět již vypálená tělesa.



Obr. 30 Vypálené vzorky

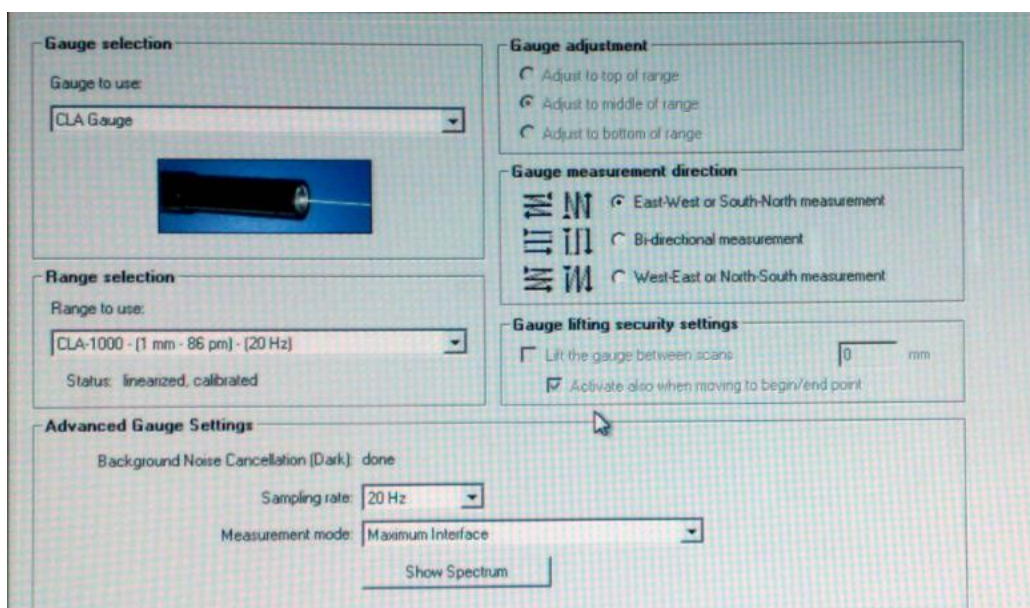
8 NAMĚŘENÍ HODNOT

Připravené vzorky se změřily na Tylor Hobson Talysurf CLI 500. Po umístění zkoumaného tělesa na měřicí přístroj se spustí příslušný software Talymap, z jehož pomocí lze přístroj efektivně ovládat.



Obr. 31 Vzorek připravený k měření

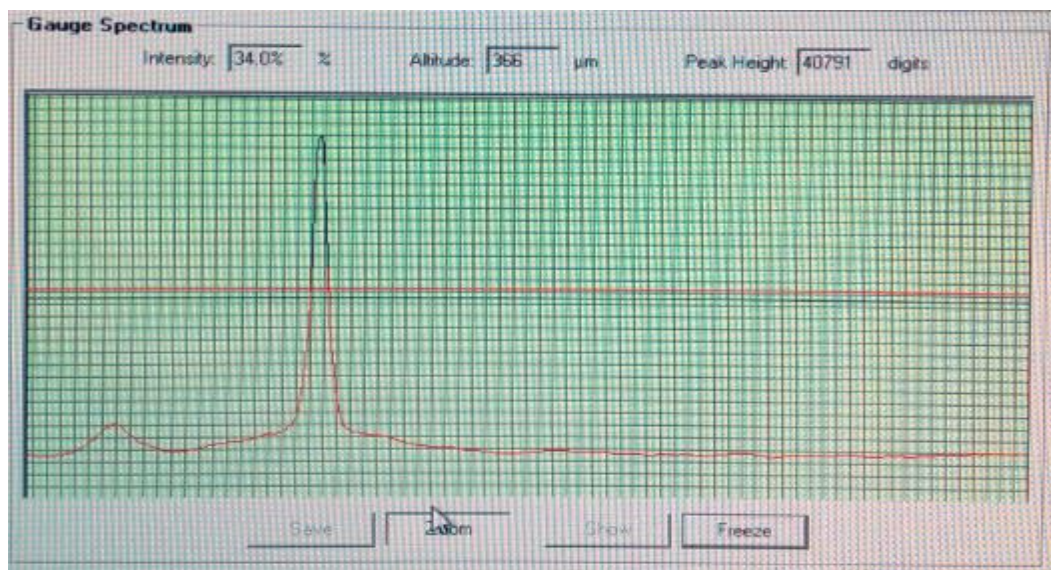
Po provedení kalibrace byly nastaveny parametry měření a vytvořil se program pro snímání daného povrchu.



Obr. 32 Nastavení parametrů měření

Na každém snímaném poli se provedlo deset měření a to vždy, na jiném místě, podle nastavení programu.

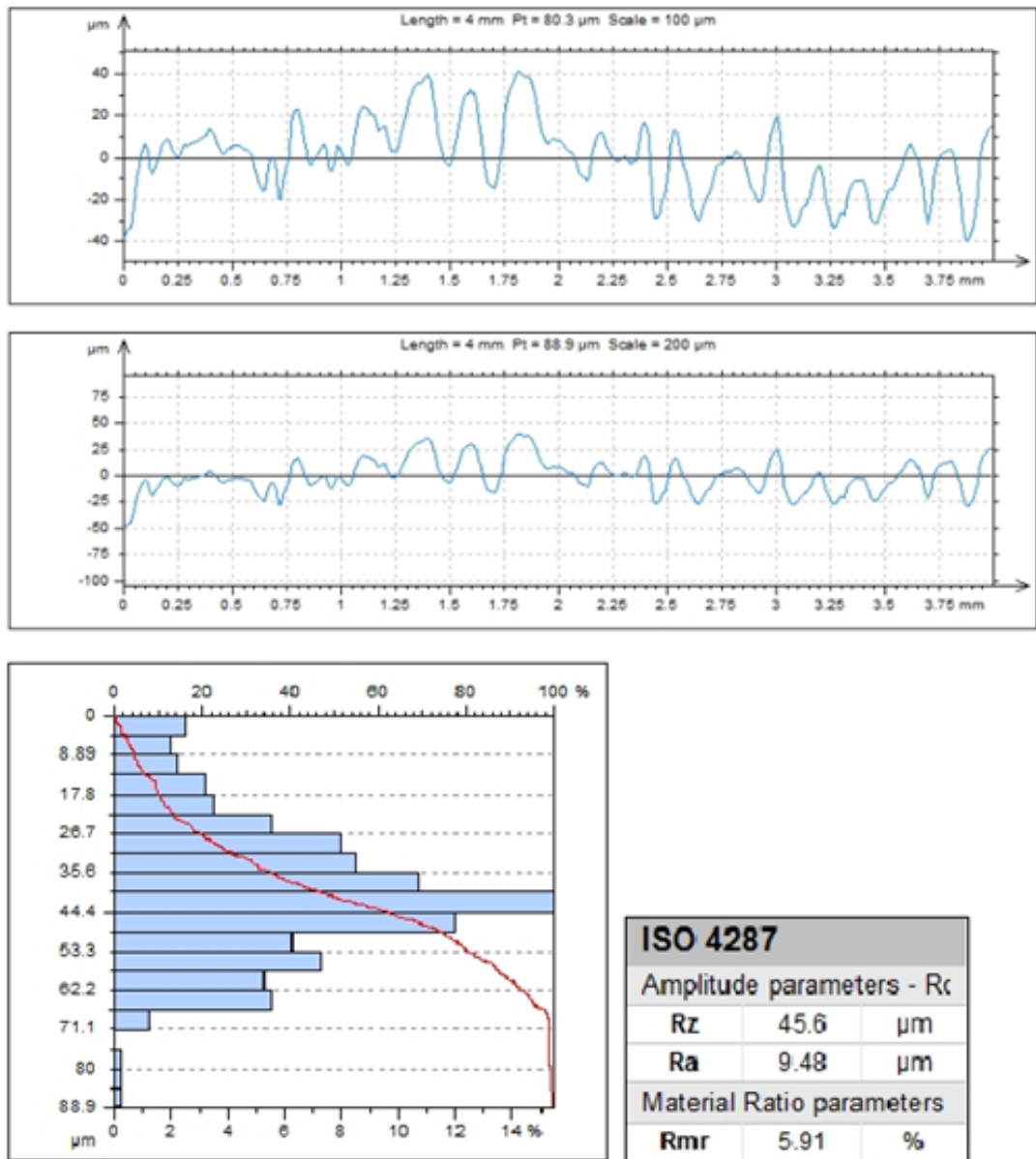
Po každém ukončeném měření se muselo ručně přejít do dalšího měřené pole a nastavit odrazivost, která by měla být větší než 50 %, což se kvůli materiálu z PMMA úplně nepodařilo dodržet.



Obr. 33 Nastavení odrazivosti

Byly připravené dva vzorky kontinuálním a pulzním režimem a měření bylo celkem na šesti polích po deseti měřeních u každého pole – 20 %/20 %, 20 %/30 %, 20 %/40 %, 20 %/60 %, 20 %/80 %, 20 %/100 %. Po dokončení měření se provedlo vyhodnocení pomocí software Talymap. Podle normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 byly naměřeny parametry Rz, Ra, Rmr (naměřené hodnoty jsou v přílohách P I - P XII viz. CD). V software bylo provedeno vyrovnání povrchu metodou nejmenších čtverců.

Na obrázku je ukázka výsledků ze softwaru Talymap k přístroji Taylor Hobson Taylsurf CLI 500.



Obr. 34 Ukázka výsledků z Talymapu pro kontinuální režim; výkon 20% a řeznou rychlost 30 %

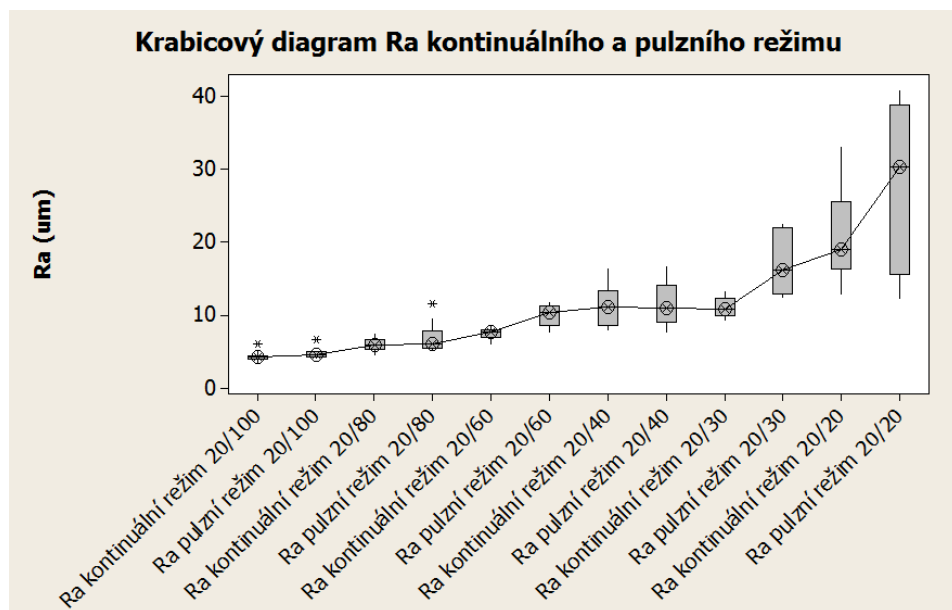
9 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH INFORMACÍ

Pro grafické vyhodnocení jsem použil software MINITAB 15.

9.1 Vyhodnocení výsledků pro Ra PMMA pro výkon 20 %

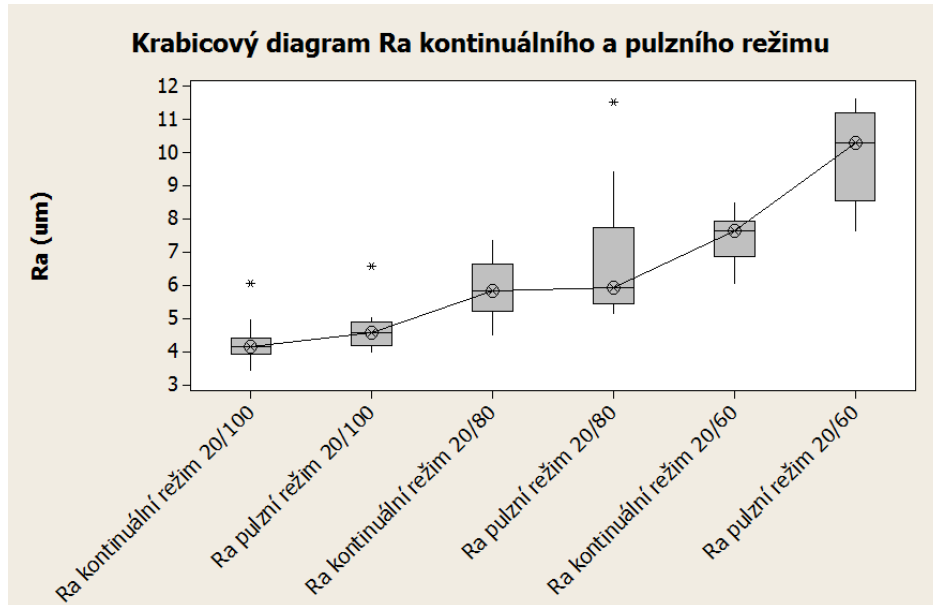
V následujících grafech je porovnání režimu kontinuálního a pulzního. Je patrné zvětšování rozptylu se zvyšující se rychlostí řezu a také se zvyšují hodnoty mediánu pro drsnost povrchu. Na obrázcích (Obr. 35, Obr. 36, Obr. 37) jsou graficky znázorněny mediány, rozptyly a interkvartilová rozpětí.

9.1.1 Krabicové diagramy Ra, kontinuálního a pulzního režimu

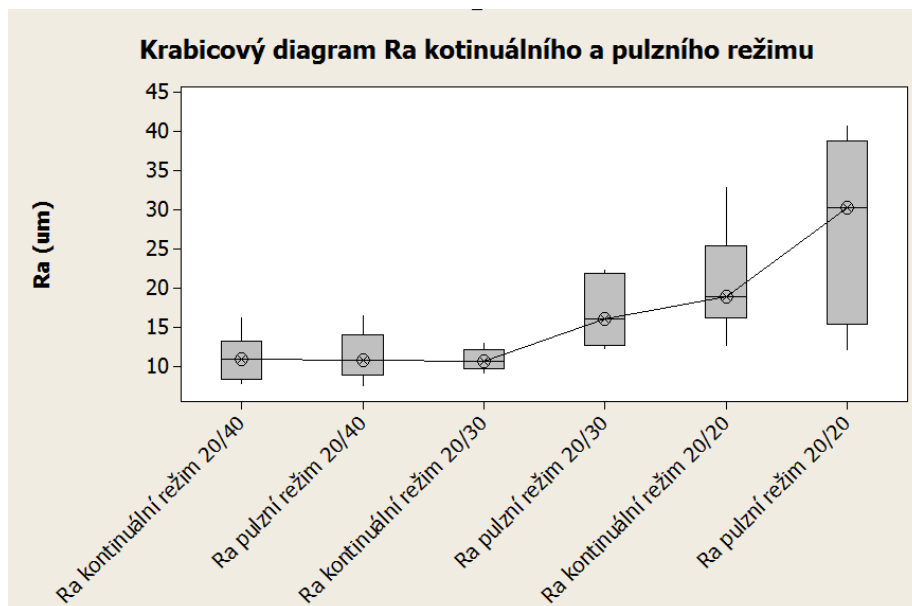


Obr. 35 Krabicové diagramy pro Ra kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření

Kvůli vysokému rozptylu hodnot na obrázku (Obr. 35) bylo nutné rozdělit krabicový diagram na dva pro větší přehlednost.



Obr. 36 Krabicové diagramy pro Ra kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření ve zvětšeném měřítku



Obr. 37 Krabicové diagramy pro Ra kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření ve zvětšeném měřítku

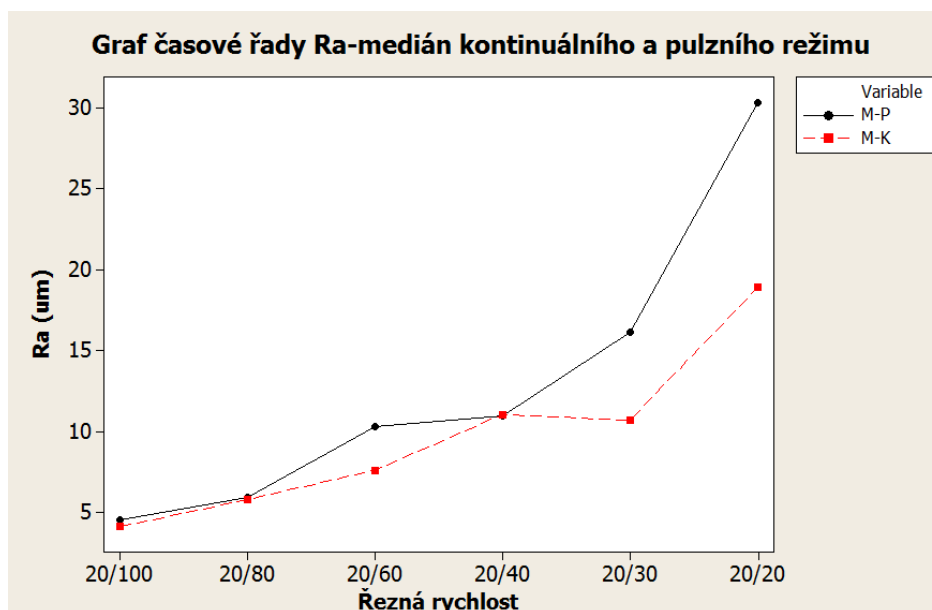
9.1.2 Popisné charakteristiky Ra kontinuálního a pulzního režimu

V programu MINITAB 15 byla provedena deskriptivní statistika k výpočtu hodnot, které program vyhodnotil do tabulky. Vidíme zde hodnoty průměru, rozptyl, minima, maxima a medián.

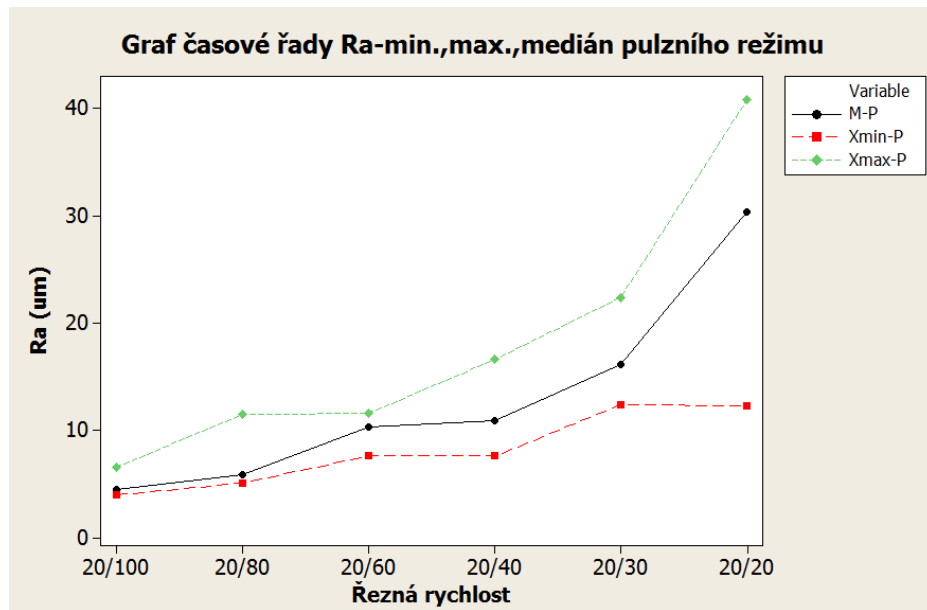
Variable	Mean	StDev	Minimum	Median	Maximum
Ra kontinuální režim 20/	4,277	0,727	3,430	4,125	6,050
Ra pulzní režim 20/100	4,683	0,744	3,970	4,540	6,570
Ra kontinuální režim 20/	5,864	0,895	4,480	5,805	7,330
Ra pulzní režim 20/80	6,797	2,089	5,120	5,920	11,500
Ra kontinuální režim 20/	7,437	0,737	6,040	7,620	8,460
Ra pulzní režim 20/60	9,844	1,504	7,620	10,300	11,600
Ra kontinuální režim 20/	11,108	2,799	7,880	11,050	16,300
Ra pulzní režim 20/40	11,501	2,978	7,610	10,950	16,600
Ra kontinuální režim 20/	10,971	1,331	9,330	10,700	13,100
Ra pulzní režim 20/30	17,24	4,07	12,40	16,15	22,40
Ra kontinuální režim 20/	21,07	6,71	12,80	18,95	33,00
Ra pulzní režim 20/20	27,74	10,71	12,30	30,35	40,80

Obr. 38 Popisné charakteristiky Ra kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření

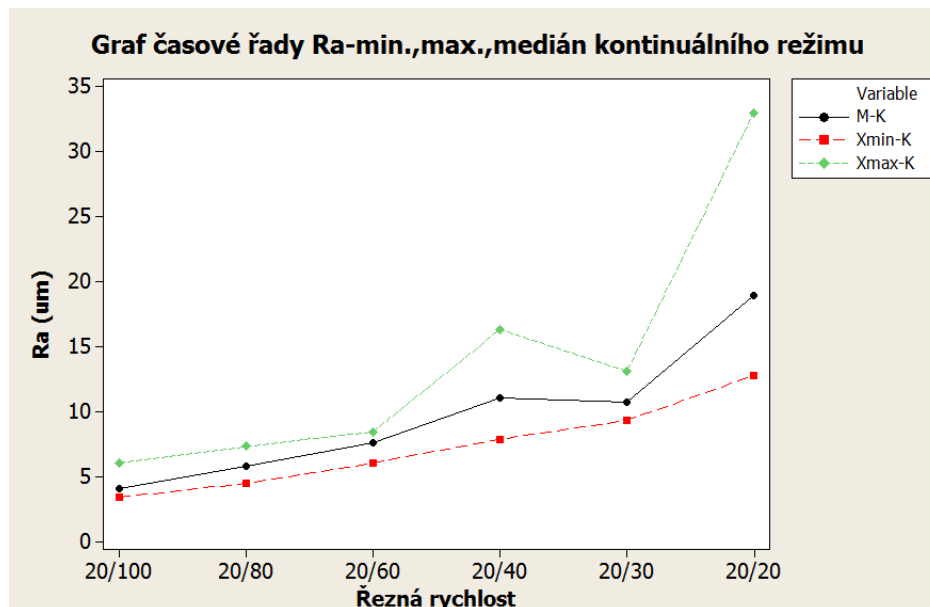
9.1.3 Grafy časové řady Ra pro kontinuální a pulzní režim



Obr. 39 Graf časové řady pro porovnání mediánu kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření



Obr. 40 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu pulzního režimu bezkontaktního měření

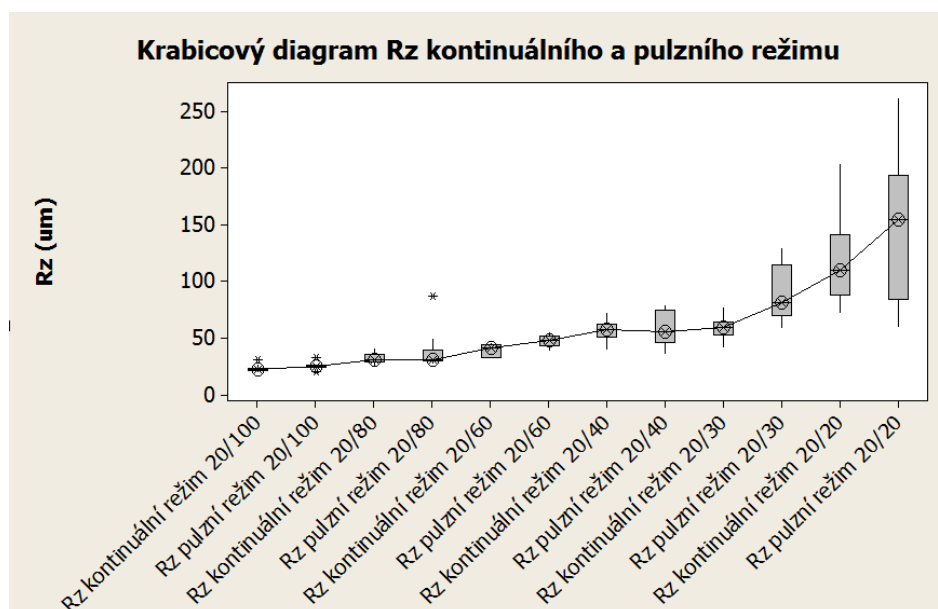


Obr. 41 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu kontinuálního režimu bezkontaktního měření

9.2 Vyhodnocení výsledků pro Rz PMMA pro výkon 20 %

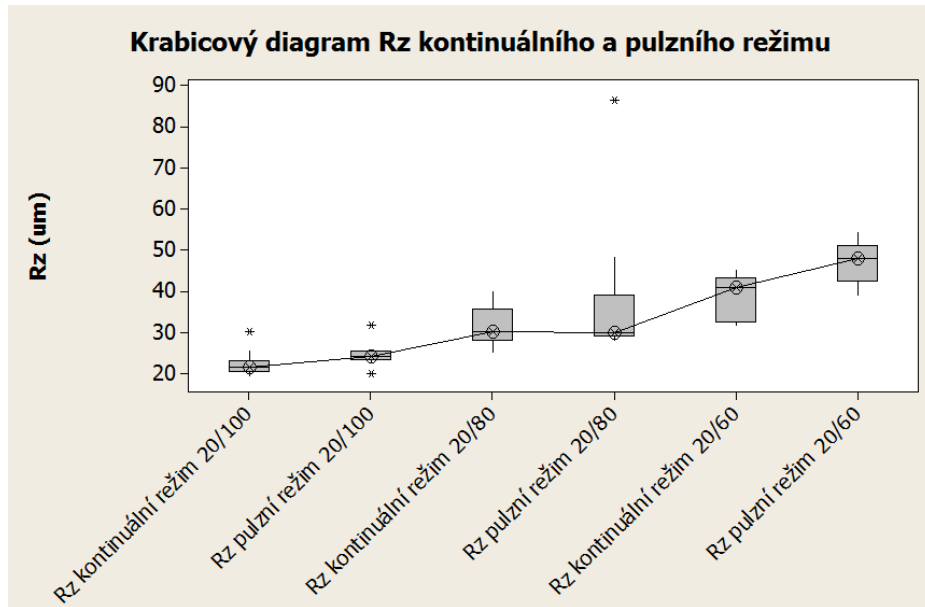
V následujících grafech je porovnání režimu kontinuálního a pulzního. Je patrné zvětšování rozptylu se zvyšující se rychlostí řezu a také se zvyšují hodnoty mediánu pro drsnost povrchu. Tyto grafy mají velmi podobný průběh jako grafy pro drsnost povrchu Ra. Na obrázcích (Obr. 42, Obr. 43, Obr. 44) jsou graficky znázorněny mediány, rozptyly a interkvartilová rozpětí.

9.2.1 Krabicové diagramy Rz, kontinuálního a pulzního režimu

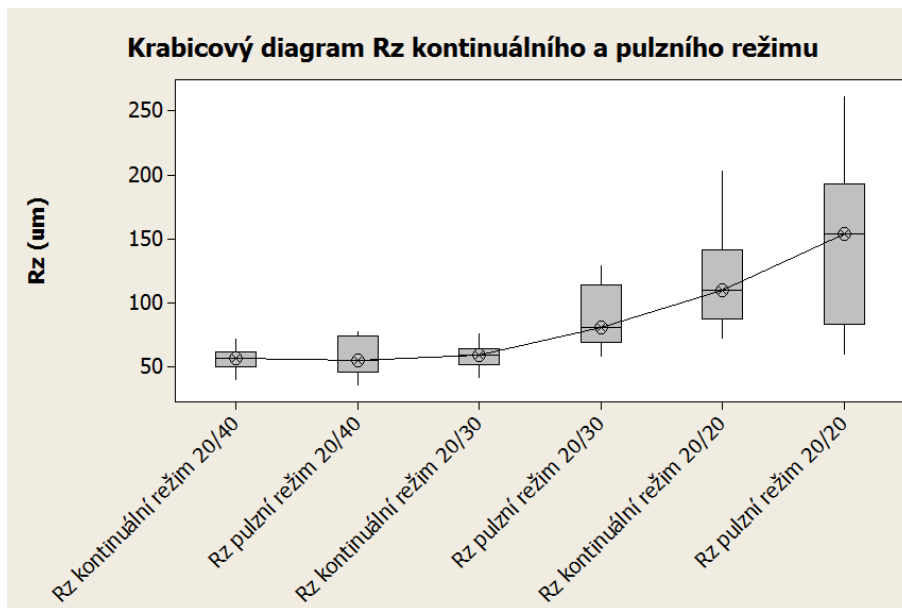


Obr. 42 Krabicové diagramy pro Rz kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření

Kvůli vysokému rozptylu hodnot na obrázku (Obr. 42) bylo nutné rozdělit krabicový diagram na dva pro větší přehlednost.



Obr. 43 Krabicové diagramy pro Rz kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření ve zvětšeném měřítku



Obr. 44 Krabicové diagramy pro Rz kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření ve zvětšeném měřítku

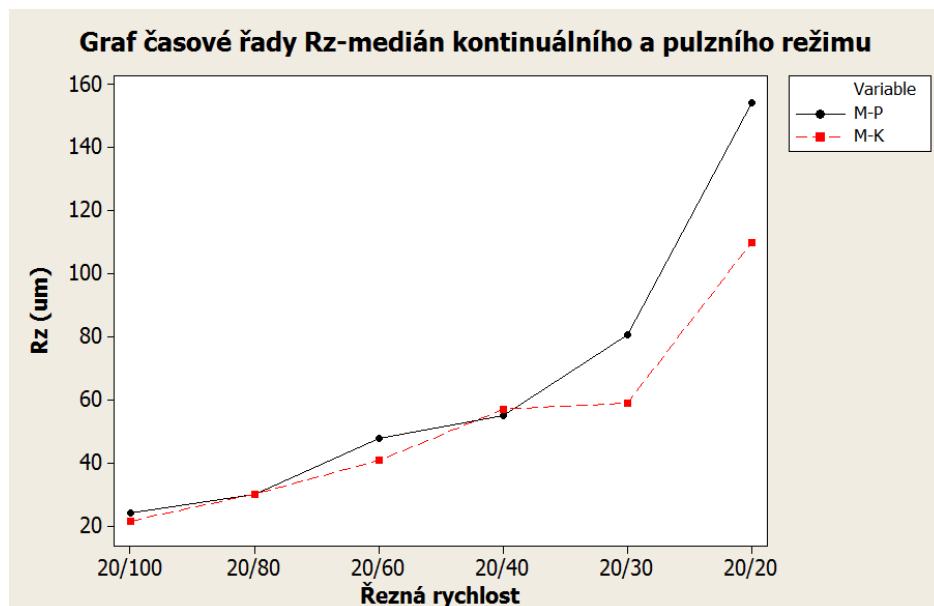
9.2.2 Popisné charakteristiky Rz kontinuálního a pulzního režimu

V programu MINITAB 15 byla provedena deskriptivní statistika k výpočtu hodnot, které program vyhodnotil do tabulky. Vidíme zde hodnoty průměru, rozptyl, minima, maxima a medián.

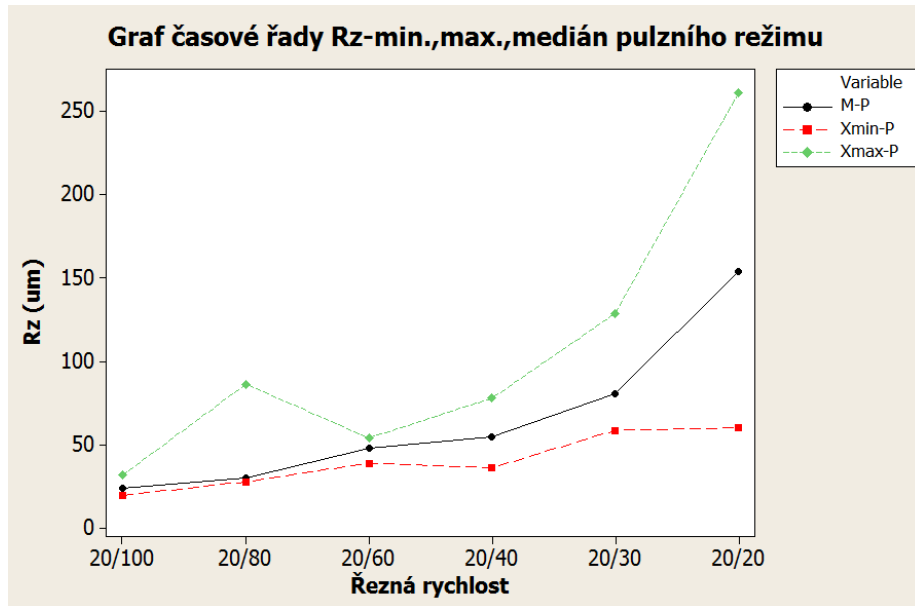
Variable	Mean	StDev	Minimum	Median	Maximum
Rz kontinuální režim 20/	22,49	3,21	19,60	21,70	30,30
Rz pulzní režim 20/100	24,710	3,017	19,900	24,250	31,900
Rz kontinuální režim 20/	31,68	4,76	25,30	30,25	40,00
Rz pulzní režim 20/80	38,00	18,08	28,00	30,05	86,50
Rz kontinuální režim 20/	39,23	5,00	31,90	40,90	45,10
Rz pulzní režim 20/60	46,96	5,28	39,20	47,95	54,30
Rz kontinuální režim 20/	56,39	9,42	40,30	57,10	71,90
Rz pulzní režim 20/40	57,89	15,20	36,40	55,20	78,10
Rz kontinuální režim 20/	58,53	10,03	41,80	59,05	75,90
Rz pulzní režim 20/30	88,02	23,06	58,90	80,65	129,00
Rz kontinuální režim 20/	119,5	44,4	72,7	110,0	203,0
Rz pulzní režim 20/20	149,4	70,1	60,4	154,0	261,0

Obr. 45 Popisné charakteristiky Rz kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření

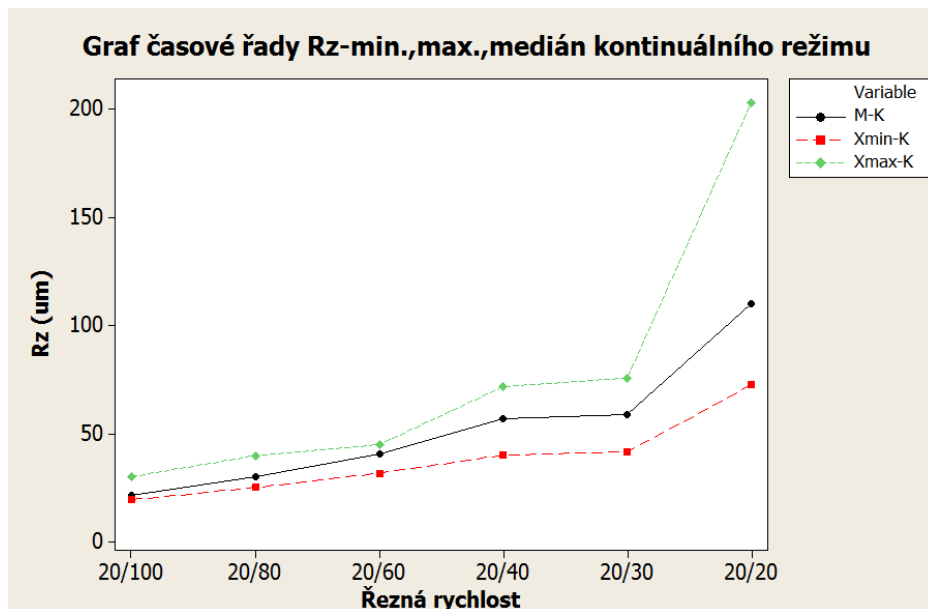
9.2.3 Grafy časové řady Rz pro kontinuální a pulzní režim



Obr. 46 Graf časové řady pro porovnání mediánu kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření



Obr. 47 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu pulzního režimu bezkontaktního měření

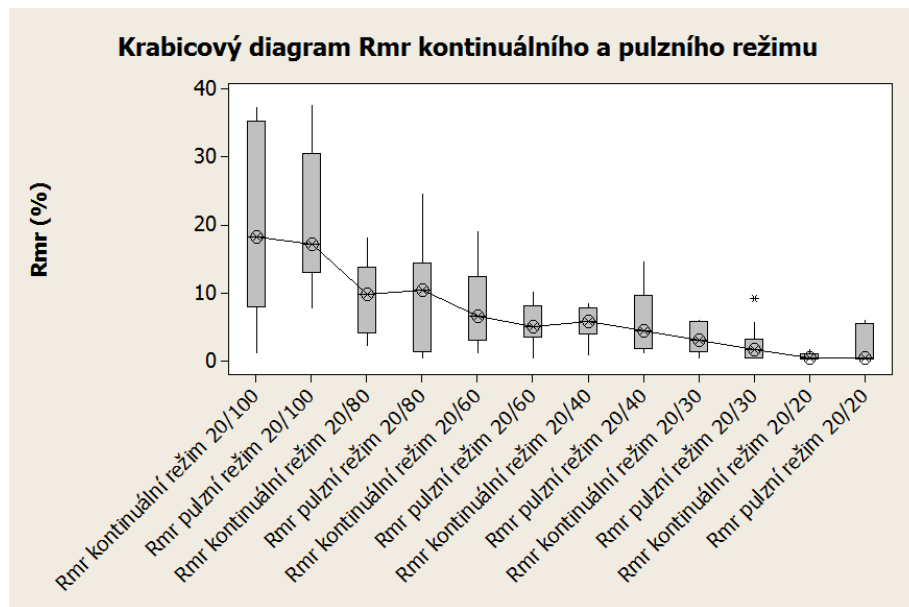


Obr. 48 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu kontinuálního režimu bezkontaktního měření

9.3 Vyhodnocení výsledků pro Rmr PMMA pro výkon 20 %

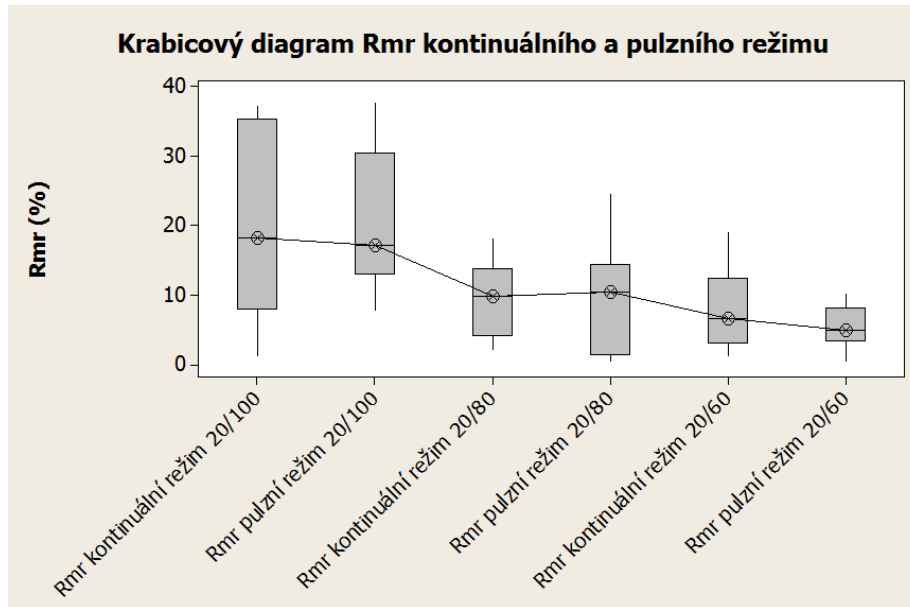
V následujících grafech je porovnání režimu kontinuálního a pulzního. Je patrné zvětšování rozptylu se zvyšující se rychlostí řezu a také se zvyšují hodnoty mediánu pro drsnost povrchu. Tyto grafy mají obrácený průběh oproti předchozím grafům znázorňující Ra, Rz. Na obrázcích (Obr. 49, Obr. 50, Obr. 51) jsou graficky znázorněny mediány, rozptyly a interkvartilová rozpětí.

9.3.1 Krabicové diagramy Rmr, kontinuálního a pulzního režimu

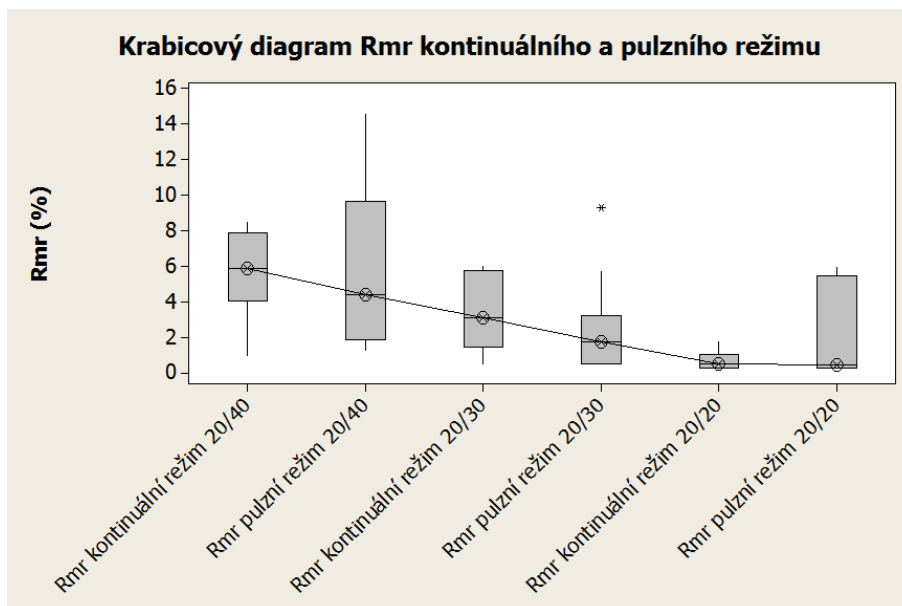


Obr. 49 Krabicové diagramy pro Rmr kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření

Kvůli vysokému rozptylu hodnot na obrázku (Obr. 49) bylo nutné rozdělit krabicový diagram na dva pro větší přehlednost.



Obr. 50 Krabicové diagramy pro Rmr kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření ve zvětšeném měřítku



Obr. 51 Krabicové diagramy pro Rmr kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření ve zvětšeném měřítku

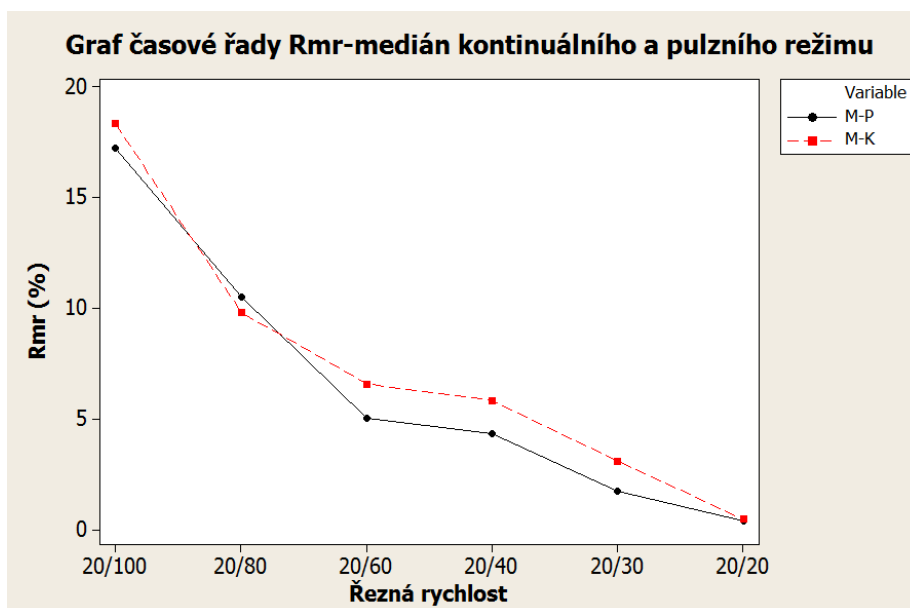
9.3.2 Popisné charakteristiky Rmr kontinuálního a pulzního režimu

V programu MINITAB 15 byla provedena deskriptivní statistika k výpočtu hodnot, které program vyhodnotil do tabulky. Vidíme zde hodnoty průměru, rozptyl, minima, maxima a medián.

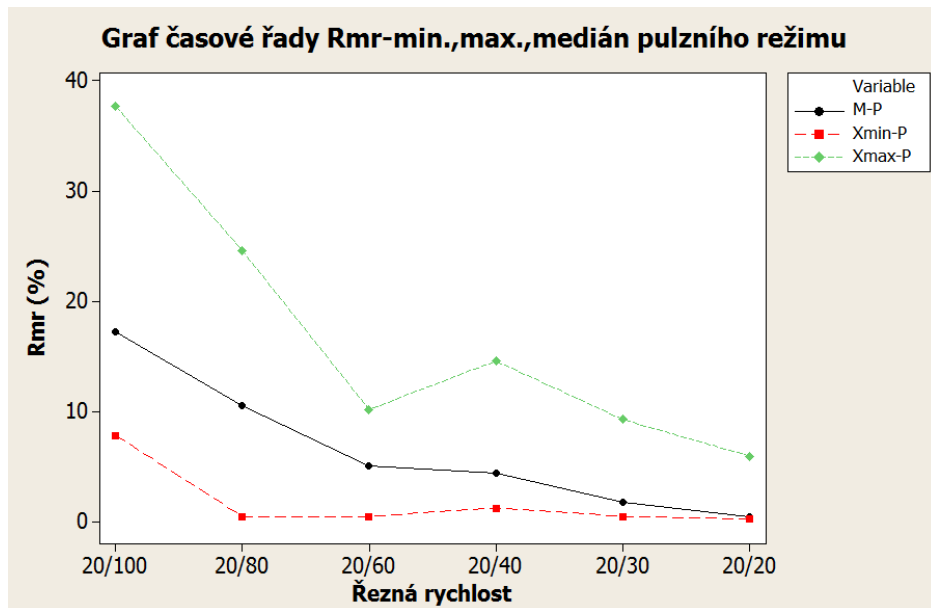
Variable	Mean	StDev	Minimum	Median	Maximum
Rmr kontinuální režim 20	19,56	13,33	1,25	18,35	37,30
Rmr pulzní režim 20/100	20,38	9,93	7,84	17,25	37,70
Rmr kontinuální režim 20	9,61	5,71	2,24	9,84	18,20
Rmr pulzní režim 20/80	9,61	8,13	0,50	10,53	24,60
Rmr kontinuální režim 20	8,24	6,02	1,25	6,61	19,00
Rmr pulzní režim 20/60	5,542	3,143	0,499	5,050	10,200
Rmr kontinuální režim 20	5,754	2,436	0,998	5,865	8,480
Rmr pulzní režim 20/40	5,98	4,61	1,25	4,39	14,60
Rmr kontinuální režim 20	3,462	2,213	0,499	3,120	5,990
Rmr pulzní režim 20/30	2,559	2,841	0,499	1,750	9,290
Rmr kontinuální režim 20	0,674	0,515	0,249	0,499	1,750
Rmr pulzní režim 20/20	2,007	2,537	0,249	0,436	5,970

Obr. 52 Popisné charakteristiky Rmr kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření

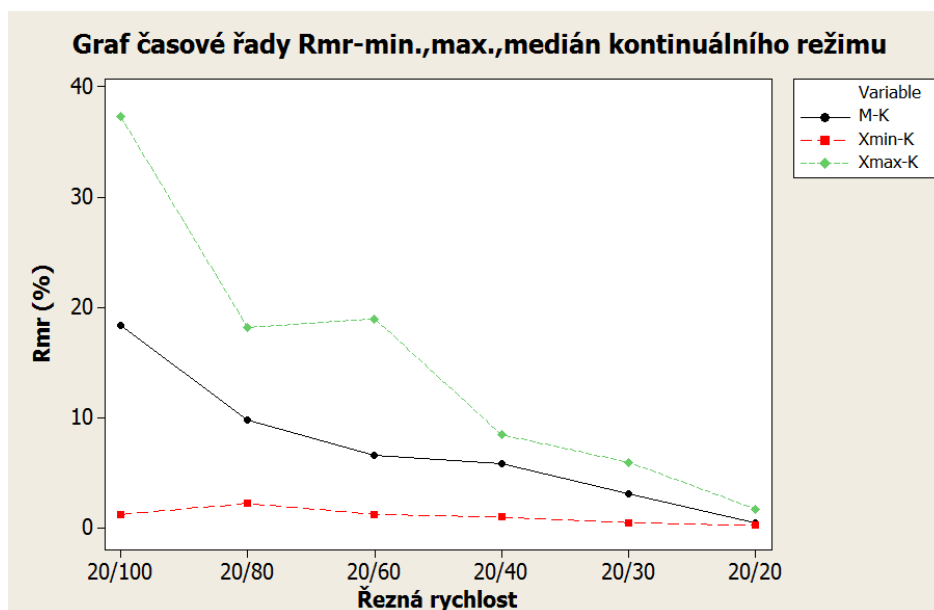
9.3.3 Grafy časové řady Rmr pro kontinuální a pulzní režim



Obr. 53 Graf časové řady pro porovnání mediánu kontinuálního a pulzního režimu bezkontaktního měření



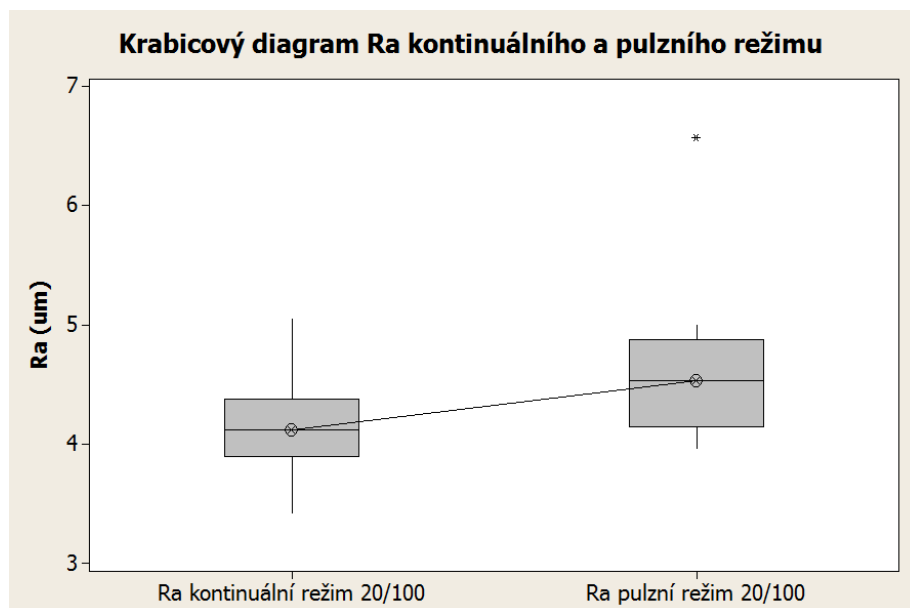
Obr. 54 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu pulzního režimu bezkontaktního měření



Obr. 55 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu kontinuálního režimu bezkontaktního měření

9.4 Vyhodnocení Ra krabicovými diagramy pro jednotlivé řezné rychlosti kontinuálního a pulzního režimu

9.4.1 Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 100%



Obr. 56 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 100%

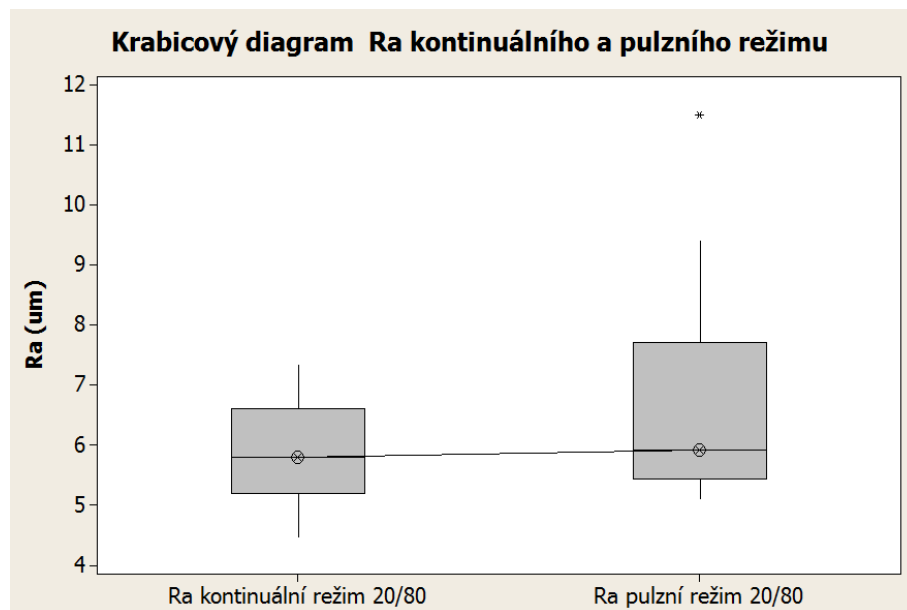


Kontinuální režim výkon 20 % řezná rychlost 100 %

Pulzní režim výkon 20 % řezná rychlost 100 %

Obr. 57 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu

9.4.2 Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 80%



Obr. 58 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 80%

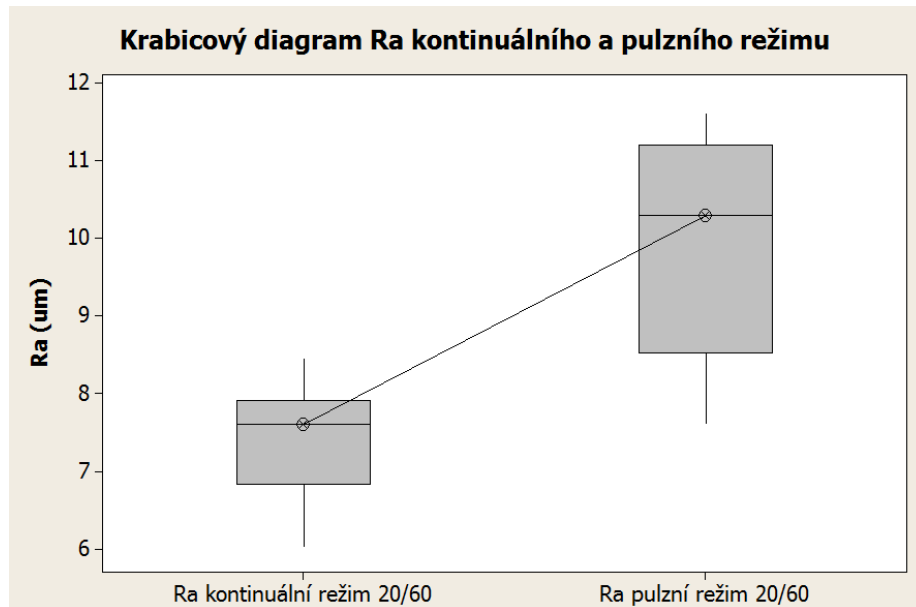


Kontinuální režim výkon 20 % řezná rychlost 80 %

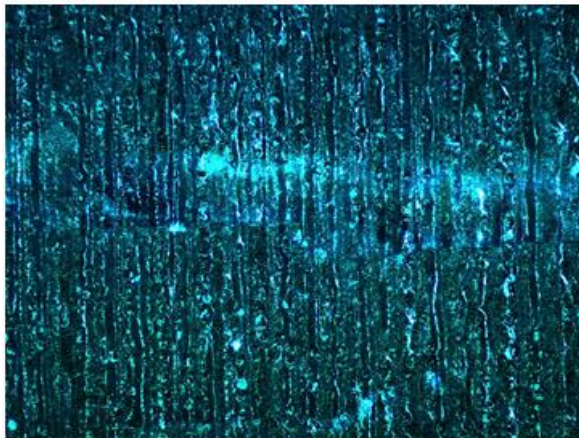


Pulzní režim výkon 20 % řezná rychlost 80 %

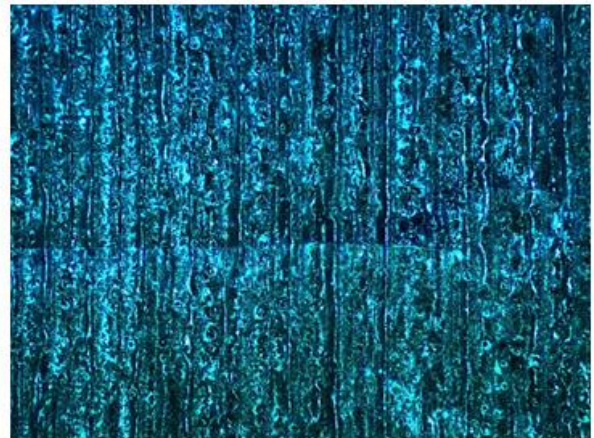
Obr. 59 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu

9.4.3 Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 60%

Obr. 60 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 60%

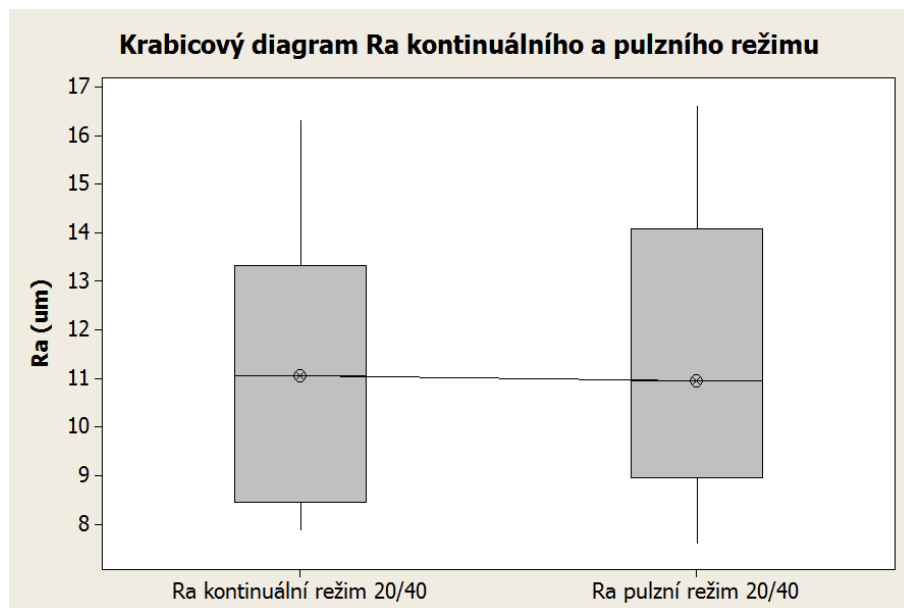


Kontinuální režim výkon 20 % řezná rychlost 60 %



Pulzní režim výkon 20 % řezná rychlost 60 %

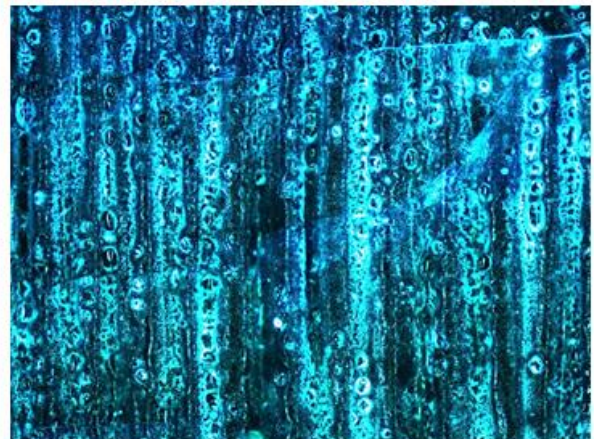
Obr. 61 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu

9.4.4 Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 40%

Obr. 62 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 40%



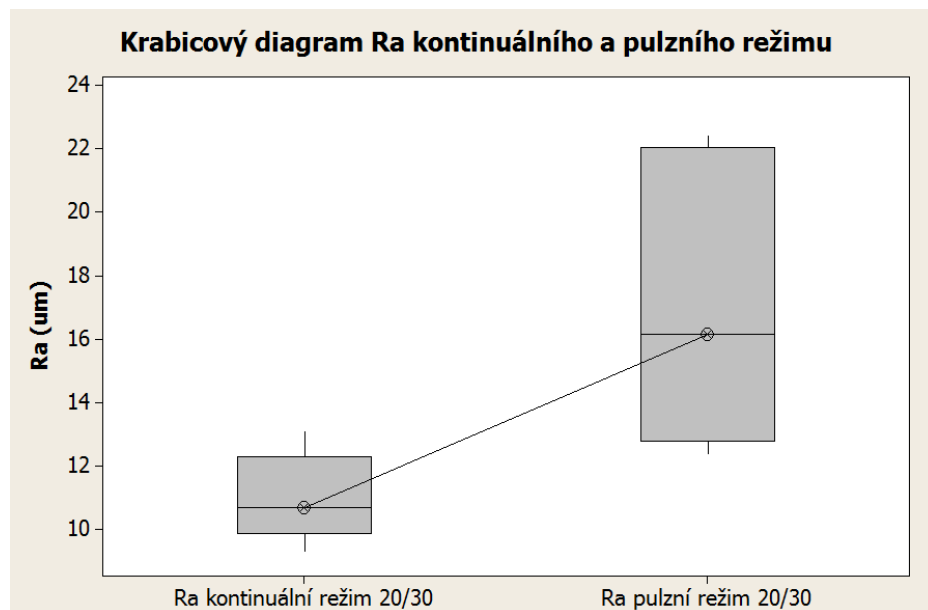
Kontinuální režim výkon 20 % řezná rychlost 40 %



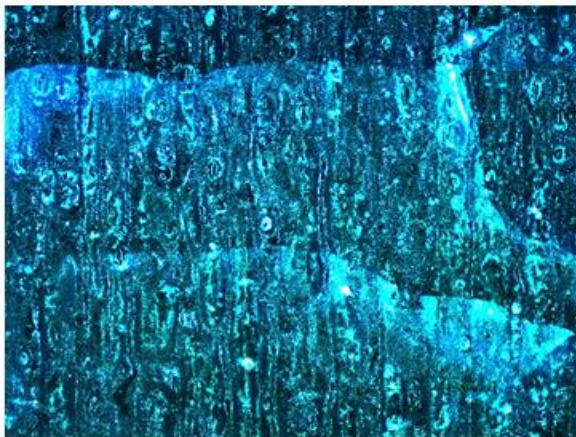
Pulzní režim výkon 20 % řezná rychlost 40 %

Obr. 63 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu

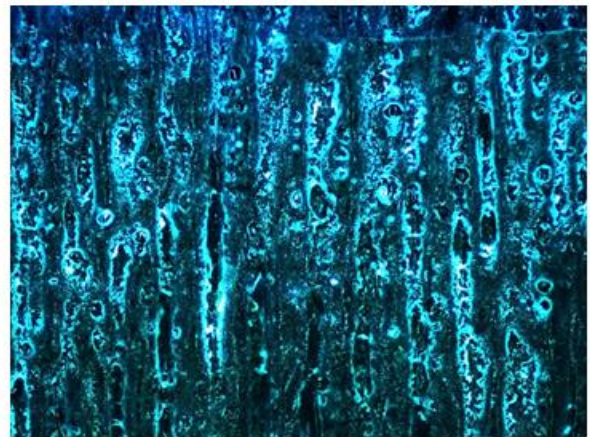
9.4.5 Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 30%



Obr. 64 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 30%

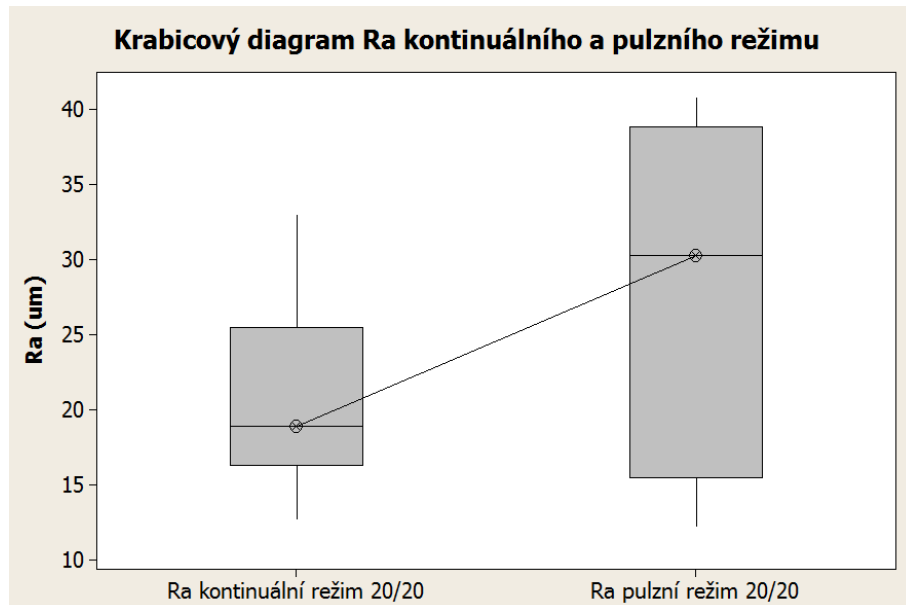


Kontinuální režim výkon 20 % řezná rychlost 30 %

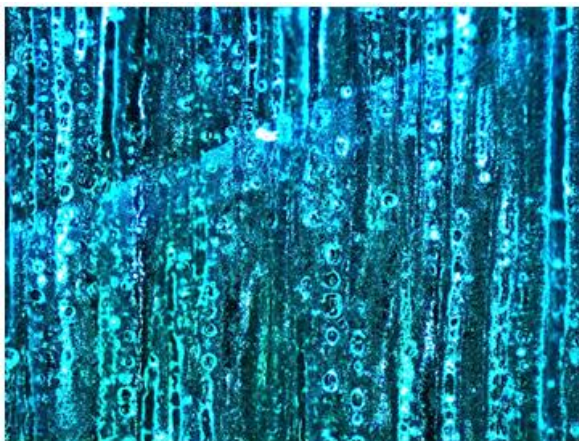


Pulzní režim výkon 20 % řezná rychlost 30 %

Obr. 65 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu

9.4.6 Krabicový diagram pro drsnost povrchu Ra, výkon 20%, řezná rychlost 20%

Obr. 66 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 20%



Kontinuální režim výkon 20 % řezná rychlost 20 %



Pulzní režim výkon 20 % řezná rychlost 20 %

Obr. 67 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala měřením drsnosti bezkontaktním způsobem na laboratorním přístroji Taylor Hosbson CLI 500. Zkušební vzorky byly vypáleny na školním laseru

ILS 3NM. Vzorky byly vypáleny pulzním a kontinuálním režimem za konstantního výkonu 20 W a odlišných řezných podmínek pro gravírování (maximum posuvu 1524 mm/s):

20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %. Výrobce uvádí u zařízení laseru ILS 3NM nejvhodnější pro řezání plastů zástupce PMMA. Na vyrobených vzorcích z PMMA bylo provedeno měření drsnosti dle norem - Rz, Ra, Rmr.

U materiálu PE při nižších rychlostech docházelo k rozteklým obrysům a mírnému ohoření. Se zvýšením rychlostí se rozteklá místa zlepšila, ale i tak se nedal vzorek adekvátně testovat na jakost povrchu. V poslední řadě byl vyzkoušen materiál PA 11, kde se vypálená místa slila.

Pro návrh vzorku mě sloužil program Corel Draw, který je nastavený pro komunikaci s laserovým zařízením ILS 3NM.

Z laboratorních měření povrchu jsem vyhodnotil data, která díky velkým interkvartilovým rozpětím a různých hodnotách mediánu prozradila, že gravírování za konstantního výkonu a různých řezných rychlostí lze doporučit z hlediska drsnosti povrchu použití kontinuálního režimu oproti režimu pulznímu. Pulzní režim způsoboval při nižších řezných rychlostech vyšší teplotní ovlivnění obráběné plochy, což se negativně projevilo na laboratorních měřeních kvůli slitým místům. Odchytky se zvětšovaly tím více, čím se zmenšovala řezná rychlost paprsku. Doporučil bych pro přesnější měření a matematickou statistiku zvětšit výběrový soubor pro zpřesnění vizuálních výsledků a komparační metodu právě o tyto výsledky rozšířil.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠULC, Jan. Lasery a jejich aplikace [online]. 2002 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [2] LAPČANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. In: Laserové technologie v praxi [elektronická skripta]. 2010 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [3] Princip laseru. KACHTÍK, Lukáš. [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://lasery.wz.cz/princip.html>
- [4] Laserové technologie v praxi. CHMELÍČKOVÁ, RNDr. Hana. Portál moderní fyziky [online]. 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/laserove-technologie-v-praxi-1>
- [5] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční technologie. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, č. 3 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [6] Laser. ČVUT PRAHA. [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Laser%20a%20deleni%20laseru.pdf>
- [7] CHMELÍČKOVÁ, Hana. Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací [online]. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 20 s. [cit. 2014-04-05]. ISBN 978-80-244-3076-8.
- [8] ŠMÍD, Ing. Jiří. Ultrakrátké pulzy na Laser - World of Photonics. MM Průmyslové spektrum [online]. 2013, roč. 2013, č. 7 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/ultrakratke-pulzy-na-laser-world-of-photonics.html>
- [9] KRUTINA, Ing. Jiří. Laserové technologie v průmyslu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2010, roč. 2010, č. 3 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-v-prumyslu.html>
- [10] Plasty v těžkém strojírenství. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001, roč. 2001, č. 11 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-v-tezkem-strojirenstvi.html>

- [11] STEIDL, Prof. Ing. Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005, roč. 2005, č. 1 [cit. 2014-0-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens.html>
- [12] MLEZIVA, Josef. POLYMERY- výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
- [13] Plasty-druhy a možnosti využití. Svět casemoddingu [online]. 2007 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.modding.cz/?p=68>
- [14] Polyethylen. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylen>
- [15] Informace o materiálech. In: [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: http://www.plastovesoucastky.com/datadocs/materialy_CZ.pdf
- [16] JANEČEK, Zdeněk. Jakost - potřeba moderního člověka: výstup z projektu podpory jakosti č. 5/16/2004 [online]. Vyd. 1. Praha: Národní informační středisko pro podporu jakosti, 2004, 101 s. [cit. 2014-04-05]. Průvodce řízením jakosti. ISBN 80-020-1687-4. Dostupné z: http://www.businessinfo.cz/files/archiv/dokumenty/061019_jakost-moderni-potreba.pdf
- [17] DVORŮÁK, Dalibor a Ladislav SKLENÁK. Úvod do metrologie. Ostrava: Ostravská univerzita, 2012. Dostupné z: http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/148_%C3%9Avod%20do%20metrologie.pdf
- [18] MLČOCH, Lubomír. Řízení kvality a strojírenská metrologie. 1. vyd. Praha: STNL, 1987. ISBN 04-223-87
- [19] PROCHÁZKA, Ing. Karel. Měření drsnosti povrchu 1 [online]. Opava, 2011 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-18.pdf. Střední škola průmyslová a umělecká.
- [20] MORÁVEK, Ing. Rudolf. Nekonenční technologie obrábění. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 55-088-99.

- [21] DUŠEK, Bc. Přemysl. Aplikace laseru při obrábění dřeva [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/23803/2013_DP_DUSEK_107166.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička,
- [22] ŠŇUPÁREK, Petr. Drsnost povrchu [online]. Ostrava [cit. 2014-04-05]. Dostupné z:
http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf
- [23] DOLEŽAL, Jaroslav. Studium vlivu polymeru na mechanické vlastnosti při laserovém obrábění. Zlín, 2012. Dostupné
z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22134/dole%C5%BEal_2012_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. UTB Zlín. Vedoucí práce Ing. Jana Knedlová.
- [24] NOVÁK, Ing. Zdeněk. IMECO TH. Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson. Brno, 2012, 17 s. Dostupné z:
http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf
- [25] JURENA, Bc. Pavel. Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem. Zlín, 2011. Dostupné
z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16302/jurena_2011_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. UTB Zlín. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Vladimír Pata.
- [26] GAJDOŠÍK, David. Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytu-toyo SJ 210. České Budějovice, 2013. Dostupné
z: http://theses.cz/id/xoi08h/BP_Gajdok.pdf. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
- [27] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)-Struktura povrchu: Profilová metoda- Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut,

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina
y	Naměřená hodnota
Δ	Systematická chyba
δ	Náhodná chyba
x_0	Skutečná hodnota měřené veličiny
R_p	Největší výška výstupku profilu
R_v	Největší hloubka profilu
R_z	Největší výška profilu
R_t	Celková výška profilu
$Z_{p_{\max}}$	Výška největšího výstupku profilu v rozsahu vyhodnocované délky
$Z_{v_{\max}}$	Hloubka největší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky
R_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
l_r	Rozsah základní délky
$Z(x)$	Průměr absolutních hodnot v rozsahu základní délky
R_{mr}	Materiálový poměr
L	Vyhodnocovaná délka
l	Délka
b	Šířka
h	Tloušťka
b_l	Šířka
l_l	Délka
P	Výkon
f	Řezná rychlost
$M - P$	Medián pro pulzní režim
$M - K$	Medián pro kontinuální režim

$x_{\min} - P$	Minimum pro pulzní režim
$x_{\max} - P$	Maximum pro pulzní režim
$x_{\min} - K$	Minimum pro kontinuální režim
$x_{\max} - K$	Maximum pro kontinuální režim

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma rubínového laseru [1].....</i>	13
<i>Obr. 2 Srovnání emise záření běžného tepelného zdroje a laseru [1]</i>	14
<i>Obr. 3 Schéma optického rezonátoru [3]</i>	15
<i>Obr. 4 Podíl na trhu-typy laserů [5]</i>	15
<i>Obr. 5 Procento rozdělení jednotlivých technologií [5]</i>	17
<i>Obr. 6 Ukázka gravírování [9]</i>	19
<i>Obr. 7 a) Tvar hybridního svaru; b) Laserem generovaná „keyhole“;</i>	20
<i>Obr. 8 a) Řezání vláknovým laserem; b) Řezání.....</i>	21
<i>Obr. 9 Módy laseru [21].....</i>	21
<i>Obr. 10 Výrobek z PMMA</i>	25
<i>Obr. 11 Výrobek z PE.....</i>	26
<i>Obr. 12 Výrobek z PA 66.....</i>	26
<i>Obr. 13 Druhy drsností [19].....</i>	31
<i>Obr. 14 Největší výška výstupku profilu R_p [27]</i>	32
<i>Obr. 15 Největší hloubka prohlubně profilu R_v [27]</i>	33
<i>Obr. 16 Největší výška profilu R_z [18].....</i>	33
<i>Obr. 17 Celková výška profilu R_t.....</i>	34
<i>Obr. 18 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [18]</i>	34
<i>Obr. 19 Materiálový poměr R_{mr} [27].....</i>	35
<i>Obr. 20 Značka drsnosti [22]</i>	36
<i>Obr. 21 Orientace nerovností [22]</i>	36
<i>Obr. 22 Dotykový profilometr [26]</i>	38
<i>Obr. 23 Princip snímače CLA [25].....</i>	40
<i>Obr. 24 Laser ILS 3NM ve školních dílnách [23].....</i>	43
<i>Obr. 25 Přístroj Taylor Hobson CLI 500</i>	45
<i>Obr. 26 Rozměry tělesa k vypálení.....</i>	47
<i>Obr. 27 Rozměry tvaru ke gravírování.....</i>	47
<i>Obr. 28 Návrh zkušebních tělísek.....</i>	48
<i>Obr. 29 Nastavení parametrů vypalování a gravírování</i>	49
<i>Obr. 30 Vypálené vzorky</i>	50
<i>Obr. 31 Vzorek připravený k měření</i>	51
<i>Obr. 32 Nastavení parametrů měření.....</i>	51

<i>Obr. 33 Nastavení odrazivosti</i>	52
<i>Obr. 34 Ukázka výsledků z Talymapu pro kontinuální režim; výkon 20% a řeznou</i>	53
<i>Obr. 35 Krabicové diagramy pro Ra kontinuálního a pulzního režimu.....</i>	54
<i>Obr. 36 Krabicové diagramy pro Ra kontinuálního a pulzního</i>	55
<i>Obr. 37 Krabicové diagramy pro Ra kontinuálního a pulzního režimu.....</i>	55
<i>Obr. 38 Popisné charakteristiky Ra kontinuálního a pulzního režimu</i>	56
<i>Obr. 39 Graf časové řady pro porovnání mediánu kontinuálního a.....</i>	56
<i>Obr. 40 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu</i>	57
<i>Obr. 41 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu</i>	57
<i>Obr. 42 Krabicové diagramy pro Rz kontinuálního a pulzního režimu</i>	58
<i>Obr. 43 Krabicové diagramy pro Rz kontinuálního a pulzního.....</i>	59
<i>Obr. 44 Krabicové diagramy pro Rz kontinuálního a pulzního.....</i>	59
<i>Obr. 45 Popisné charakteristiky Rz kontinuálního a pulzního režimu.....</i>	60
<i>Obr. 46 Graf časové řady pro porovnání mediánu kontinuálního a.....</i>	60
<i>Obr. 47 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu</i>	61
<i>Obr. 48 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu</i>	61
<i>Obr. 49 Krabicové diagramy pro Rmr kontinuálního a pulzního režimu</i>	62
<i>Obr. 50 Krabicové diagramy pro Rmr kontinuálního a pulzního.....</i>	63
<i>Obr. 51 Krabicové diagramy pro Rmr kontinuálního a pulzního.....</i>	63
<i>Obr. 52 Popisné charakteristiky Rmr kontinuálního a pulzního režimu</i>	64
<i>Obr. 53 Graf časové řady pro porovnání mediánu kontinuálního a.....</i>	64
<i>Obr. 54 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu</i>	65
<i>Obr. 55 Graf časové řady pro porovnání minim, maxim, mediánu</i>	65
<i>Obr. 56 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 100%.....</i>	66
<i>Obr. 57 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu</i>	66
<i>Obr. 58 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 80%.....</i>	67
<i>Obr. 59 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu</i>	67
<i>Obr. 60 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 60%.....</i>	68
<i>Obr. 61 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu</i>	68
<i>Obr. 62 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 40%.....</i>	69
<i>Obr. 63 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu</i>	69
<i>Obr. 64 Krabicový diagram Ra pro výkon 20% a řeznou rychlost 30%.....</i>	70
<i>Obr. 65 Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu</i>	70

<i>Obr. 66</i> Krabicový diagram <i>Ra</i> pro výkon 20% a řeznou rychlost 20%.....	71
<i>Obr. 67</i> Mikroskopické zvětšení (50x) měřeného povrchu	71

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Hustota dosahovaných výkonů při různých technologiích [21].....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2 Technické parametry laserové tiskárny ILS 3NM [23]</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 3 Technické specifikace přístroje</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 4 Přímost dráhy posuvu</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5 Typ a vlastnosti snímače</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6 Rozměry tělesa pro měření.....</i>	<i>48</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I- P XII: Naměřené hodnoty přístroje Taylor Hobson Talysurf CLI 500 – software Talymap (přílohy viz. CD)