

Výzkum laserového mikro-obrábění polymerních materiálů

Bc. Luboš Ošťádal

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš OŠŤÁDAL**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Výzkum laserového mikro-oblábění polymerních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma
2. Měření a hodnocení vlastností povrchů po oblábění laserem
3. Diskutování a shrnutí dosažených výsledků

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2010**

Ve Zlíně dne 18. ledna 2010


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 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 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 užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové 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 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 19.05.2010

.....

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 nevdělečně 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 výtěku 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 výtěku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Úkolem této diplomové práce je studium vlivu laserového paprsku na různé polymerní materiály. V teoretické části pomocí literárních zdrojů seznamuji s principem laserového záření, jeho aplikací a s vybranými polymerními materiály, na nichž bude sledována interakce laser – materiál. V praktické části aplikuji vybrané metody měření na vyhodnocení „laserové obrobitelnosti“ a porovnání kvality obráběných ploch při různých technologických parametrech zařízení.

Klíčová slova: Laser, polymerní materiály, drsnost povrchu, hloubka drážky, mikrotvrdość.

ABSTRACT

The task of this diploma thesis is to study the effect of the laser beam on various polymeric materials. Theory based on numerous literary sources introduces the principles of laser radiation and its application, and specifies selected polymer materials which will be used for monitoring the interaction of laser - material. In the practical part I apply selected metrics to evaluate the „laser machinability“ and compare quality of machined surfaces with different technological parameters.

Keywords: Laser, polymeric materials, roughness surface groove depth, microhardness.

Poděkování, motto

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. Za její odborné rady, příjemné vedení a ochotu, s kterou se mnou spolupracovala. Nesmím opomenout pana Dr. Ing. Vladimíra Patu, že byl ochoten svůj volný čas věnovat pomoci při měření k této práci.

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

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 LASER.....	13
1.1 ZAŘAZENÍ A DEFINOVÁNÍ LASEROVÉ TECHNOLOGIE	13
1.2 DRUHY LASERU.....	17
1.3 ZÁKLADNÍ ELEMENTY LASERU.....	19
1.3.1 Interakce fotonů s atomy.....	19
1.3.1.1 Spontánní emise.....	19
1.3.1.2 Absorpce	19
1.3.1.3 Stimulovaná emise.....	20
1.3.2 Atomy laseru a laserové čerpání.....	20
1.3.2.1 Optické čerpání	20
1.3.2.2 Elektrické čerpání	21
1.3.2.3 Chemické čerpání	21
1.3.3 Módy (vidy) laseru	22
1.3.3.1 Základní mód	22
1.3.3.2 Vlnový mód	23
1.4 OPTICKÉ ZESÍLENÍ A ZPĚTNÁ VAZBA.....	24
1.4.1 Laserové zesílení	24
1.4.2 Optický rezonátor	25
1.5 SPEKTRÁLNÍ SLOŽENÍ LASERU.....	26
1.6 IMPULZNÍ LASERY	27
1.6.1 Způsoby získávání impulzního záření.....	27
1.6.1.1 Spínání zisku	27
1.6.1.2 Spínání jakosti Q dutiny.....	28
1.6.1.3 Otevírání dutiny	28
2 LASEROVÉ MIKRO-OBRÁBĚNÍ	30
2.1 LASEROVÉ VRTÁNÍ.....	31
2.1.1 Jednorázové a nárazové vrtání.....	32
2.1.2 Trepanace.....	33
2.1.3 Spirálovité vrtání	33
2.2 LASEROVÉ ZNAČENÍ.....	34
2.2.1 Aplikace laserového značení	35
2.2.2 Požadavky pro značící lasery	35
2.2.3 Změna povrchové barvy	36
2.3 RYTÍ A ODTAVOVÁNÍ	37
3 POLYMERY.....	39
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY	39
3.2 MAKROMOLEKULÁRNÍ ŘETĚZCE	39
3.3 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	40
3.3.1 Struktura molekul	40
3.3.2 Nadmolekulární struktura	41
3.3.3 Teplotní působení	41

3.3.4	Další dělení	42
3.4	VZNIK POLYMERŮ.....	42
3.4.1	Syntetické polymery.....	42
3.4.1.1	Polymerace.....	42
3.4.1.2	Polykondenzace	43
3.4.1.3	Polyadice	43
3.4.2	Vznik přírodních polymerů.....	43
3.5	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI POLYMERŮ	44
3.5.1	Fyzikální vlastnosti ovlivňující účinek laseru	44
3.5.1.1	Tepelná kapacita [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$].....	44
3.5.1.2	Tepelná vodivost [λ ; Wm^{-2}]	44
3.5.1.3	Spektrální odrazivost [$\rho(\lambda)$; %].....	44
3.5.1.4	Poměrná pohltivost [α_λ ; Wm^{-3}].....	45
3.6	POLYMERY POUŽITÉ V PRAKTICKÉ ČÁSTI	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
4	CHARAKTERISTIKA VZORKŮ A POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ.....	50
4.1	POLYMERNÍ VZORKY	50
4.2	LASEROVÉ ZAŘÍZENÍ.....	51
4.3	VÝŠKOMĚR PRO HODNOCENÍ HLOUBKY ŘEZU	52
4.4	TVRDOMĚR.....	53
4.5	TALYSURF CLI 500	54
4.6	MITUTOYO SURFTEST SJ-301.....	55
4.7	PROSCOPE HR MIKROSKOP	56
5	MĚŘENÍ HLOUBKY ŘEZU	57
5.1	ZÁMĚR A POSTUP	57
5.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	57
5.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	60
6	DRSNOST OBROBENÉ PLOCHY.....	62
6.1	ZÁMĚR A POSTUP	62
6.1.1	Bezkontaktní měření	62
6.1.2	Kontaktní měření	67
6.1.3	Teorie drsnosti povrchu	67
6.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	70
6.2.1	Průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a	70
6.2.2	Průměrná aritmetická hloubka povrchu R_z	71
6.2.3	Celková výška profilu drsnosti R_t	71
6.2.4	Křivky nosného podílu.....	72
6.2.5	Profil povrchu	73
6.2.6	Analýza materiálu PVC	75
6.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	79
6.3.1	Průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a	79
6.3.2	Střední aritmetická hloubka povrchu R_z	79
6.3.3	Celková výška profilu drsnosti R_t	79
6.3.4	Křivky nosného podílu.....	79
6.3.5	Profil povrchu	80

6.3.6	Analýza materiálu PVC	80
7	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI OPRACOVANÉ PLOCHY	81
7.1	ZÁMĚR A POSTUP	81
7.1.1	Teorie mikrotvrdomosti.....	81
7.1.1.1	Vickersova metoda ČSN EN ISO 6507-1	81
7.1.1.2	Knoopova metoda ČSN ISO 4545.....	82
7.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	83
7.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	87
8	VIZUÁLNÍ HODNOCENÍ OBROBENÉ PLOCHY	88
8.1	ZÁMĚR A POSTUP	88
8.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	88
8.2.1	Plocha 30-ti násobně zvětšená.....	88
8.2.2	Plocha 400 krát zvětšená.....	93
8.3	DISKUZE VÝSLEDKŮ	97
	ZÁVĚR	99
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	101
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	104
	SEZNAM OBRÁZKŮ	106
	SEZNAM TABULEK.....	110

ÚVOD

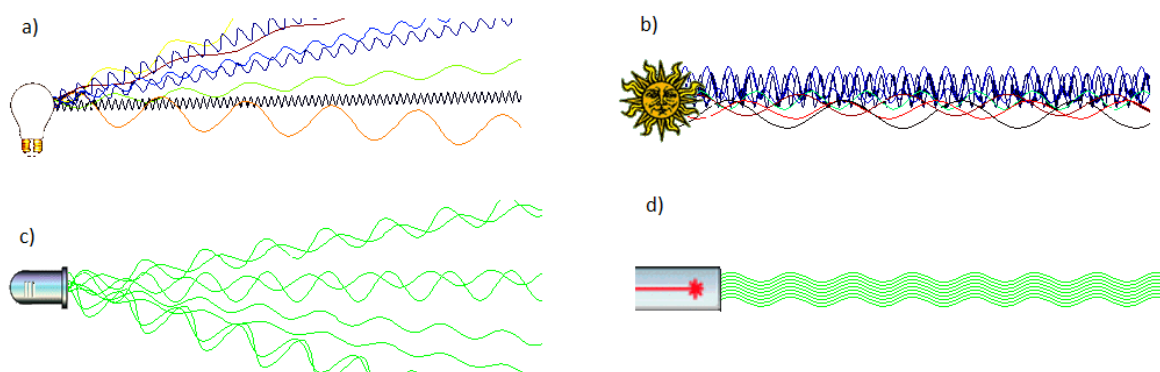
S laserem a jeho využitím se dnes již setkáváme téměř v každém průmyslovém odvětví i všedním životě. Od svého vzniku se uplatnil v celé řadě oborů. Jako přístroj se využívá v lékařství, technologii, chemii, biologii, vojenské technice a automatizaci a také při studiu a vývoji termojaderné fúze jako nového zdroje energie. Tento poměrně mladý obor zahrnuje širokou škálu poznatků z oborů optiky, kvantové mechaniky, termodynamiky a jiných vědních disciplín shrnuté v teoretické části diplomové práce. Interakce laserového paprsku s polymerními materiály je složitý a doposud málo zpracovaný jev, jehož problematika bude naplní části praktické. Za tímto účelem byl stanoven pojem „laserové obrobitelnosti“, který bude nápomocen při vyhodnocování schopnosti různých materiálů nechat se obrábět laserem. Výsledná struktura povrchu bude zmapována vyhodnocením její drsnosti a vizuálním porovnáním jednotlivých vzorků pomocí mikroskopu. Jelikož každá operace, při níž dojde k narušení celistvosti obrobku, zanechá stopu v podobě ovlivnění materiálu, bude také zkoumán vliv paprsku na mechanické vlastnosti povrchové vrstvy a prostřednictvím mikrotvrdosti. Zkoumanými vzorky budou termoplasty i přírodní a syntetické elastomery.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASER

Neboli počáteční písmena (akronym) slov *Light Amplification Stimulace Emise Radiace* je optický zdroj, který vydává fotony v koherentním paprsku. Světlo laseru je typově blízké monochromatickému světlu tzn., že se sestává z jediné vlnové délky vydávané v úzkém svazku. Laserové děje jsou vysvětleny teoriemi kvantové mechaniky a termodynamiky. Jsou objeveny mnohé materiály, jež mají požadované vlastnosti pro laserové médium, potřebné k pohánění laseru a to vedlo k vynálezu různých druhů laserů s odlišnými charakteristikami vhodnými k různým aplikacím. [3, 4, 11]

Obecně řečeno to jsou zařízení, jež zesilují nebo generují světlo stejně jako transformátory a elektronky vytvářejí a zesilují elektronické signály na radiové nebo mikrovlnné frekvence. Záření zde musí být chápáno široce, protože různé druhy laserů mohou zesilovat záření na různých vlnových délkách od velmi dlouhé infračervené oblasti až po viditelné a ultrafialové. Lasery přicházejí v nejrůznějších podobách, za použití různých materiálů, mnoha atomových systémů, druhu čerpání a budicí techniky. Paprsky laserového záření, které emitují nebo zesilují, mají pozoruhodné vlastnosti směrovosti, spektrální čistoty a intenzity. Tyto vlastnosti již vedly k široké škále jeho využití a další budou nepochybně objeveny nebo vyvinuty. [5, 3]



Obr. 1: a) světlo žárovky, b) sluneční záření, c) monochromatické světlo, d) laserové záření (d). Různé barvy představují různou vlnovou délku.

1.1 Zařazení a definování laserové technologie

Rostoucí požadavky přesnosti, jakosti a materiálových vlastností zapříčinily větší zájem o procesy obrábění, při nichž úběr materiálů s mechanickou pevností souvisí jen v jistých případech. Pokud standardní metody nejsou schopny hospodárného úběru, nahrazují se

nekonvenčními metodami obrábění. Jedná se většinou o bezsilové působení na daný materiál a bez vzniku klasických třísek tak, jak je známe z obrábění řezným nástrojem. [14, 22]

Klasifikaci těchto technologií je možné zpracovat podle různých hledisek.

1. podle hlavního energetického zdroje úběru
2. podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa
3. podle převládajícího mechanismu úběru materiálu

Tab. 1: Dělení technologií ad 1.[6]

Fyzikální	Obrábění elektrickým výbojem	Elektrojískrové [EDM]
		Elektrickým obloukem
	Chemické obrábění	Elektrochemické [ECM]
		Chemické [CM]
	Obrábění paprskem koncentrované energie	Laserové [LBM]
		Plazmové [PAM]
		Elektronové [EBM]
Iontové [IBM]		
Mechanické	Ultrazvukem [USM]	Nárazové
		Rotační
	Kapalinovým paprskem [WJM]	
Proudem brusiva [AJM/AFM]		

Přestože původně byly tyto metody vyvinuty jako alternativní způsoby obrábění, představují dnes v mnoha případech běžný způsob opracování nebo tvarování. Jejich použití provází nesporně mnoho výhod, mezi které se zařazují:

- obrobiteľnosť materiálu - mechanické vlastnosti obráběného materiálu nejsou limitující
- tvarová komplexnost dílců - složité i malé rozměry již nepředstavují problém
- automatizace výroby - integrace do systému je jednodušší než u klasických metod

- integrita povrchu a vysoká přesnost
- miniaturizace - stává se významným zdrojem vybraných oblastí průmyslové výroby

Tab. 2: Posouzení vhodnosti použití technologie pro různé druhy materiálu[14]

Materiál	Obrábění								
	Ultrazvukem	Vodním paprskem	Abrazivním paprskem	Elektrochemicky	Chemicky	Elektrojiskrově	Elektro novým paprskem	Laserovým paprskem	Plazmovým paprskem
Kovové materiály									
Hliník	3	2	2	2	1	2	2	2	1
Hořík	2	2	2	1	1	1	2	2	1
Vysokolegované oceli	3	1	1	1	2	1	2	2	1
Titan	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Žáropevné oceli	1	1	1	2	3	1	1	3	3
Nekovové materiály									
Keramika	1	1	1	4	3	4	1	1	4
Plasty	2	2	2	4	3	4	2	2	3
Kompozity	1	1	1	4	2	4	2	2	4

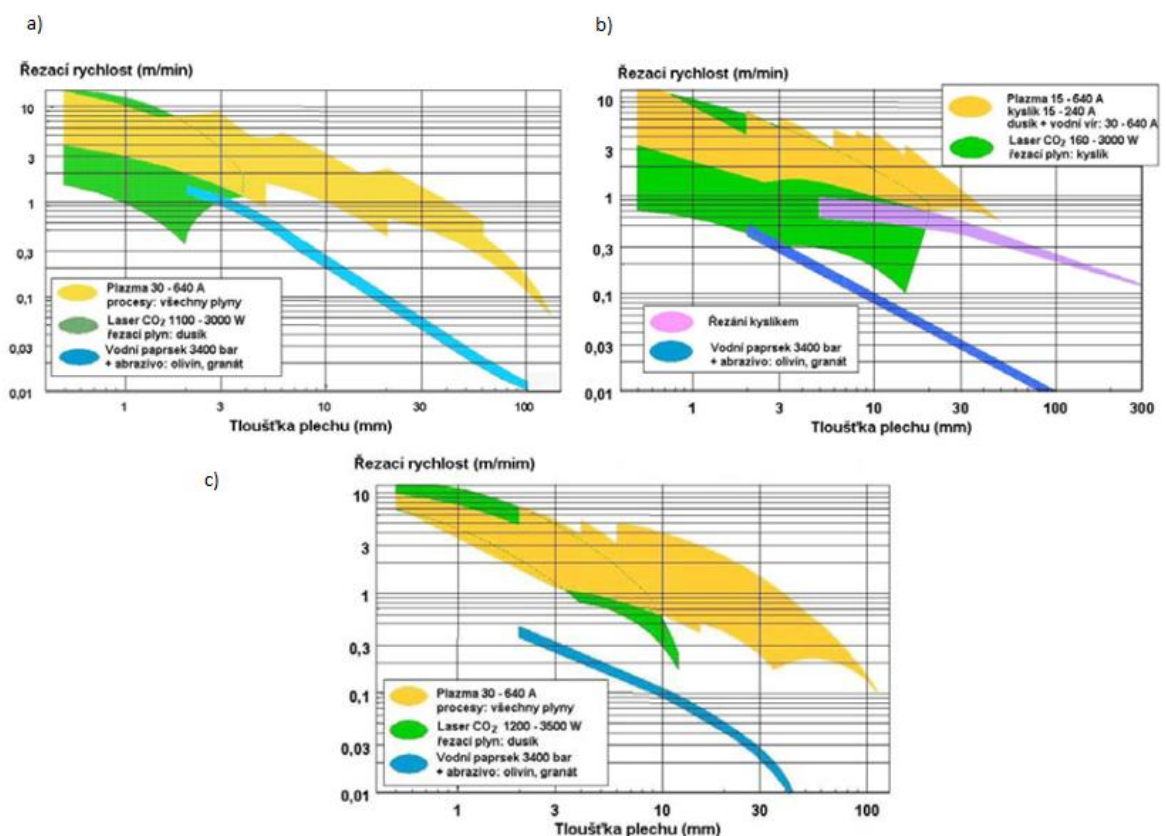
1 - optimální; 2 - vhodné; 3 - méně vhodné; 4 - nevhodné

Tab. 3: Technologické parametry vybraných metod obrábění [14]

Metoda	Drsnost Ra [μm]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [μm]	Úběr [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	Měrná spotřeba energie [$\text{kWh} \cdot \text{cm}^{-3}$]
Elektrojiskrové obrábění	50 - 0,2	6 - 12	10 - 300	10^{-4} - 0,6	0,1 - 1
Obrábění paprskem laseru	50 - 6,3		100	10^{-4}	8 - 13
Obrábění paprskem elektronů	50 - 6,3		beze změn	10^{-2} - 0,4	
Obrábění paprskem plazmy			500 - 800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5 - 1,6	9 - 12	beze změn	0,05 - 0,5	0,1 - 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 - 0,2	6 - 9	beze změn	10^{-2}	0,04 - 0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3 - 0,4	7 - 9	beze změn	10^{-2} - 10	0,07 - 0,8

Pokud budeme srovnávat jednotlivé paprskové metody při jejich nejčastější aplikaci, pak musíme usoudit, že řezání kyslíkem je ve výrobě ocelových konstrukcí vzhledem k různorodosti

rodým tloušťkám materiálu a převážně zpracovávaným nelegovaným ocelím nepostradatelnou metodou. K tomu přispívají také relativně akceptovatelné investiční náklady. Plazmové řezání zajistí vysokou produktivitu přípravy materiálu, a to jak nelegovaných, tak vysokolegovaných ocelí a slitin Al, zejména však menších až středních tloušťek. Investiční náročnost je jen o málo vyšší než technologie řezání kyslíkem. Běžná je konstrukce řezacích strojů kombinujících obě tyto technologie. Investičně náročné laserové řezání je vhodné pro velmi kvalitní řezy vysokými rychlostmi a bez deformace materiálu, ovšem s omezením tloušťky materiálu. Pracovní oblasti jednotlivých metod pro nelegovanou ocel, korozivzdornou ocel a slitiny hliníku jsou zobrazeny na obrázcích.[23]

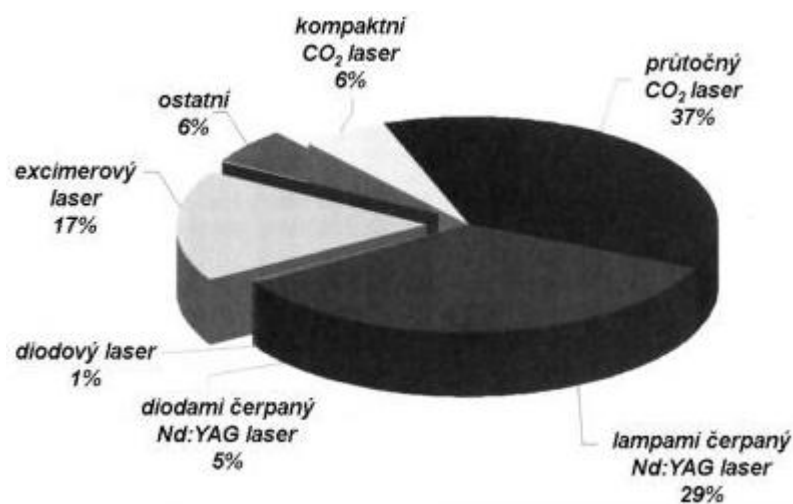


Obr. 2: Pracovní oblasti různých metod pro a) slitiny hliníku, b) nelegovanou ocel, c) vysokolegovanou ocel [23]

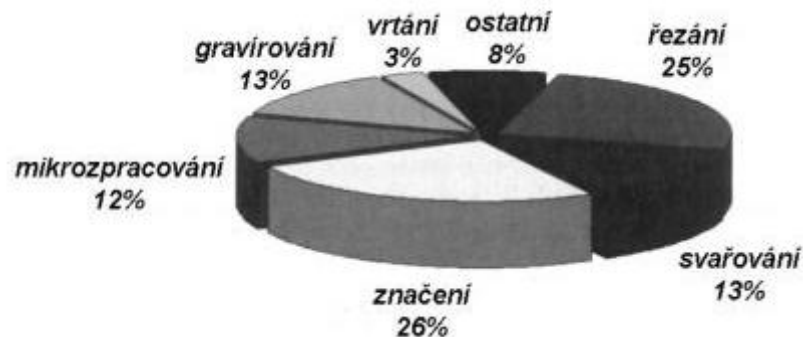
1.2 Druhy laseru

Laserů je v dnešní době dostupná celá řada a každý z nich se liší vlastnostmi, dosahovými výkony i oblastí použití. Můžeme je dělit podle:

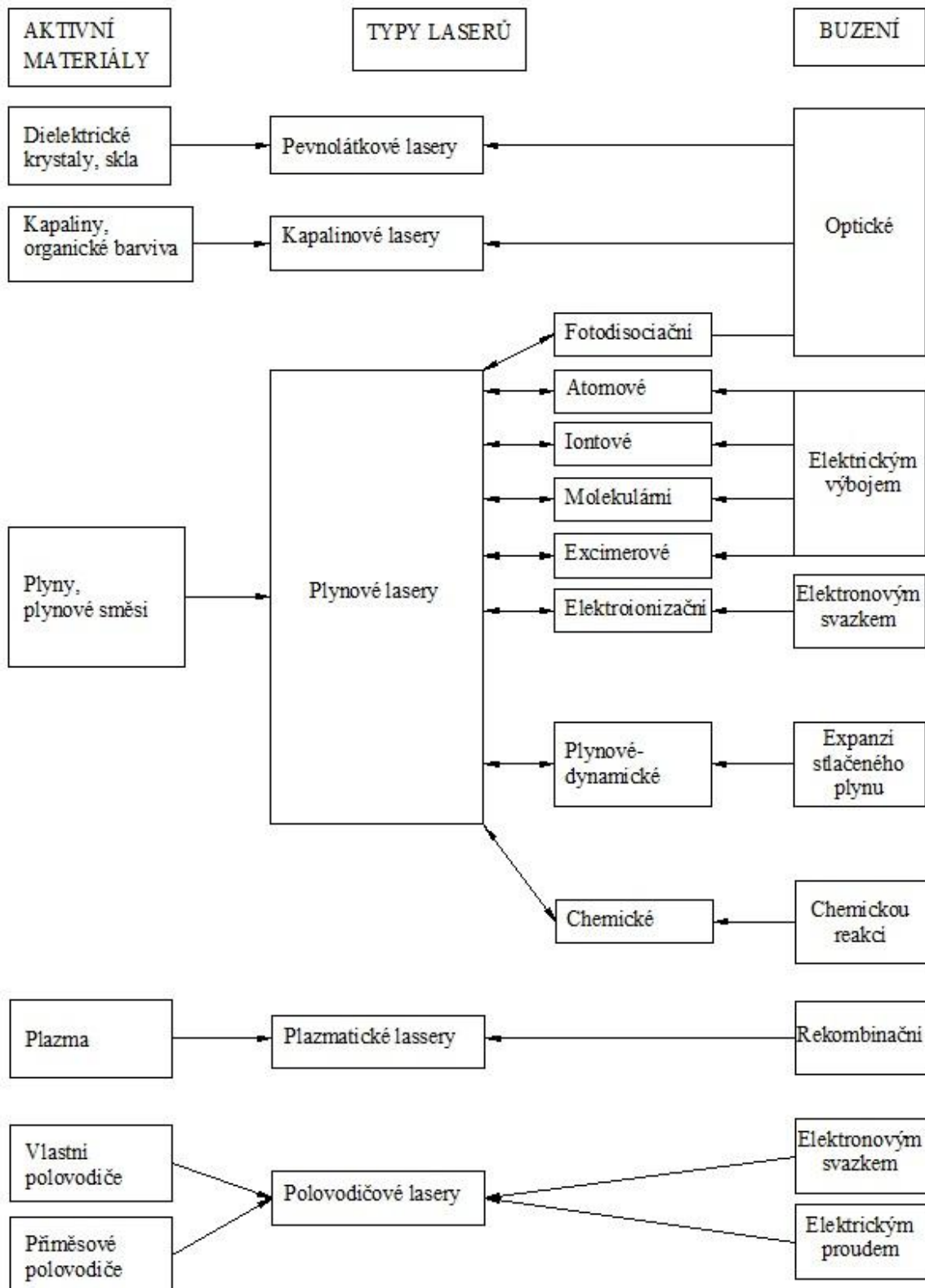
- aktivního prostředí - pevné, plynové, látkové, polovodičové
- vlnové délky - infračervené, ultrafialové, rentgenové záření
- režimu paprsku - kontinuální, pulzní
- výkonu - nízkovýkonové, vysokovýkonové
- konstrukce laserového zařízení - pevný a pohyblivý stůl či obrobek
- použití - tváření, řezání, tepelné zpracování apod.[14]



Obr. 3: Podíl typů laseru na trhu [6]

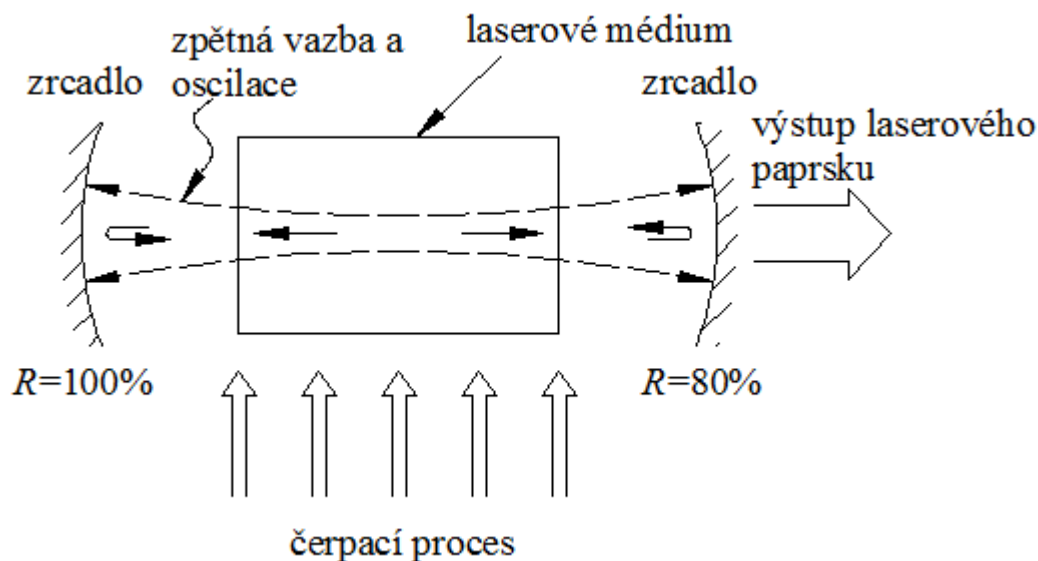


Obr. 4: Procentuální rozdělení jednotlivých technologií [6]



Obr. 5: Přehled typů laserů [6]

1.3 Základní elementy laseru



Obr. 6: Prvky laseru [3]

Podstatné prvky laserového zařízení, jak jde vidět na Obr. 6 jsou:

- laserové médium skládající se z příslušného souboru atomů, molekul, iontů, nebo v některých případech polovodičového krystalu
- čerpací proces budící tyto soubory (molekuly, atd.) do vyšší kvantově-mechanické energetické úrovně.
- vhodné optické prvky zpětné vazby umožňují paprsku záření projít za pomoci laserového média buď jednou (jako u laserového zesilovače) nebo opakovaně odrážet dozadu a dopředu (jako laserový oscilátor) [3]

1.3.1 Interakce fotonů s atomy

1.3.1.1 Spontánní emise

K tomuto jevu dochází tehdy, je-li atom vybuzený na vyšší energetickou hladinu, např. absorpcí fotonu, a po určité době se může spontánně vrátit do základního stavu, resp. na některou střední hladinu, uvolněním energie ve formě fotonu, který tuto energii nese v nějakém náhodném směru. [4, 24]

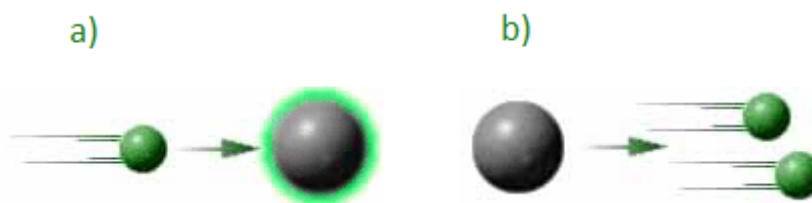
1.3.1.2 Absorpce

Je v podstatě opačný proces spontánní emise, při němž atom (molekula) v nižším energetickém stavu pohltí foton o požadované frekvenci a přejde do vyššího energetického stavu.

Spontánní emise a absorpce jsou opačné a stejně pravděpodobné procesy. O převládajícím ději rozhoduje počet atomů v buď vyšší energetické hladině (probíhá spontánní emise) nebo na nižší energetické hladině (probíhá absorpce). [4, 24]

1.3.1.3 Stimulovaná emise

Pokud je atom nebo iont ve vybuzeném stavu, může se po určité době samovolně vrátit na nižší energetickou hladinu, energie se uvolní ve formě fotonu, který se vydává náhodným prostorovým směrem (spontánní emise). Je však možné, že foton emise je povzbuzen příchozím fotonem, pokud mají vhodnou energii nebo frekvenci - stimulovaná emise. Příchozí foton dopadá na atom a přinutí jej přejít na nižší energetickou hladinu, při čemž vyžáří foton. Původní foton se ovšem nepohlčí a pokračuje dále stejným směrem jako foton, který emisi vyvolal. [4, 24]



Obr. 7: Princip stimulované emise

1.3.2 Atomy laseru a laserové čerpání

Pro jednoduchost budeme od nynějška používat „atomy“ jako obecný termín pro jakýkoliv druh atomů, molekul, iontů nebo polovodičových elektronů, které mohou být použity jako laserové médium.

Čerpat lze různými způsoby včetně metody elektrické, optické a chemické. Čerpací proces není obecně naprosto účinný. Např. při optickém čerpání jsou některé z atomů dodávaných čerpacím systémem nevyužité pro čerpání atomů na horní laserovou hladinu a jsou tedy ztraceny.[3, 5]

1.3.2.1 Optické čerpání

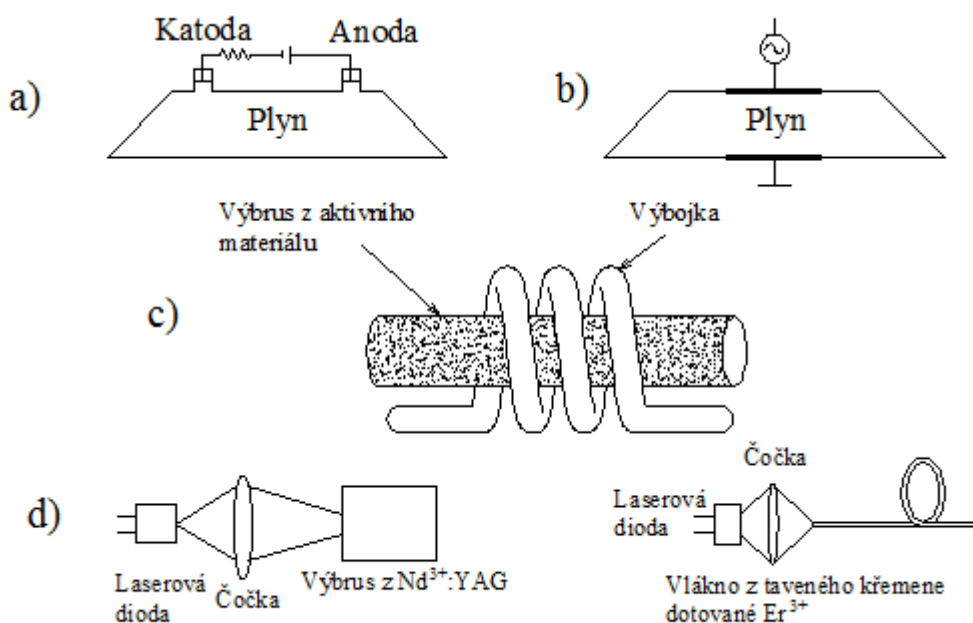
Potřebná energie se dodává ve formě světelného záblesku. Např. v rubínovém laseru je rubínová tyčinka vložena do spirálové výbojky. Jejím zábleskem dojde k přechodu atomů na vyšší hladinu, při jejich návratu do základního stavu se část této energie vyžáří ve formě laserového záblesku. Využívá se u pevnolátkových a kapalinových laserů.

1.3.2.2 Elektrické čerpání

V plynové náplni nebo v párech kovů laseru dochází k elektrickému výboji. Lasery pracují v kontinuálním provozu a jejich výkon se dá měnit změnou objemu plynu jeho plynulou cirkulací

1.3.2.3 Chemické čerpání

Pro čerpání energie do aktivního prostředí se využívá energie exotermických (uvolňující teplo) chemických reakcí. První chemický laser využíval reakce vodíku s chlorem. Později se začala využívat reakce vodíku s fluorem. U jiných typů se využívá energie štěpením (disociací) molekul jódu ultrafialovým zářením.



Obr. 8: Příklady elektrického a optického čerpání

- K čerpání plynových laserů se často používá stejnosměrný proud. Ten může procházet buď ve směru osy laseru a způsobovat při tom podélný výboj nebo v příčném směru. Tento směr je obvyklý u vysokotlakých impulzních laserů, jako je třeba příčně excitovaný laser s CO_2 pracující při atmosférickém tlaku. [TEA (transversely excited atmospheric) CO_2 laser]
- K čerpání plynových laserů se využívá taktéž radiofrekvenční výboj
- Rubínový laser a pevnolátkové lasery s atomy vzácných zemin lze účinně čerpat impulsními výbojkami

- d) Laser $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ nebo laser s vláknem z taveného křemene dotovaného Er^+ lze opticky čerpat polovodičovým diodovým laserem (nebo maticí laserových diod) [3][4][5]

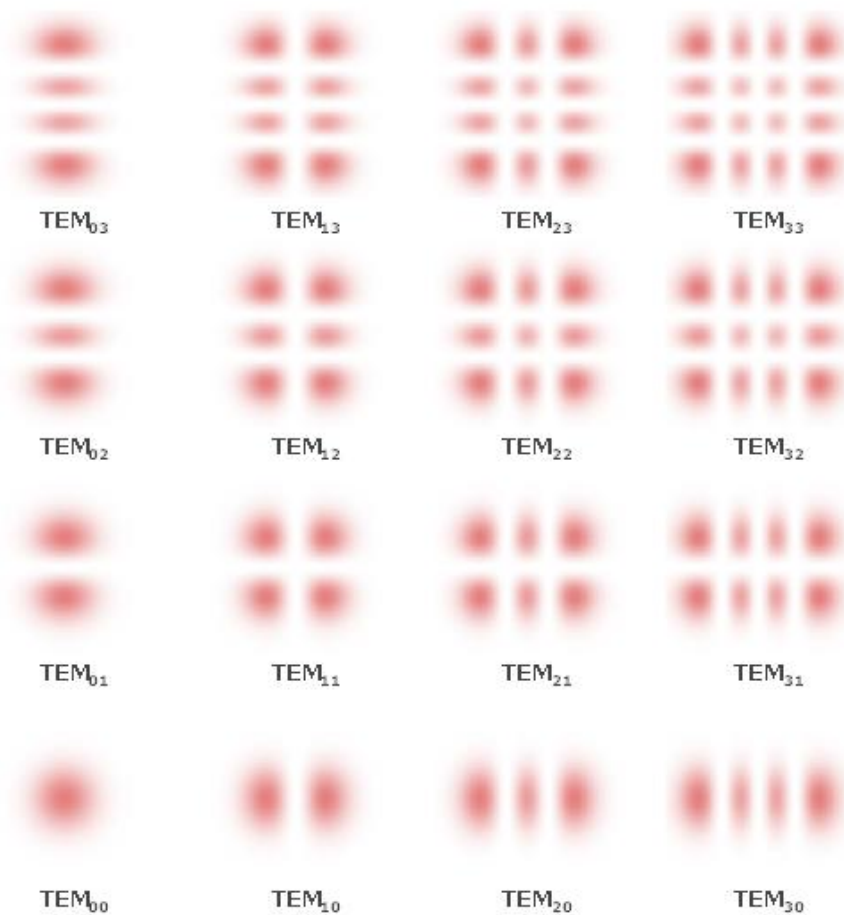
Aby nastal laserový děj, musí čerpací proces produkovat nejen vybuzené atomy, ale i stav inverze populace. To je takový stav, při kterém musí dominovat stimulovaná emise nad absorpcí. K tomu je zapotřebí zajistit, aby na vyšší energetické hladině bylo více nosičů než na nižší hladině. Ukazuje se, že můžeme získat tuto nezbytnou podmínku pro inverzi populace širokou škálou aktivních prostředí, i když někdy jen se značným úsilím. [5]

1.3.3 Módy (vidy) laseru

Pokud se nějaký světelný paprsek šíří ve volném prostoru nebo v transparentním médiu, jeho příčný profil intenzity se obecně mění. Právě podle tohoto příčného profilu se vytváří buďto jednoduchá stopa - základní mód - anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití. [5, 14]

1.3.3.1 Základní mód

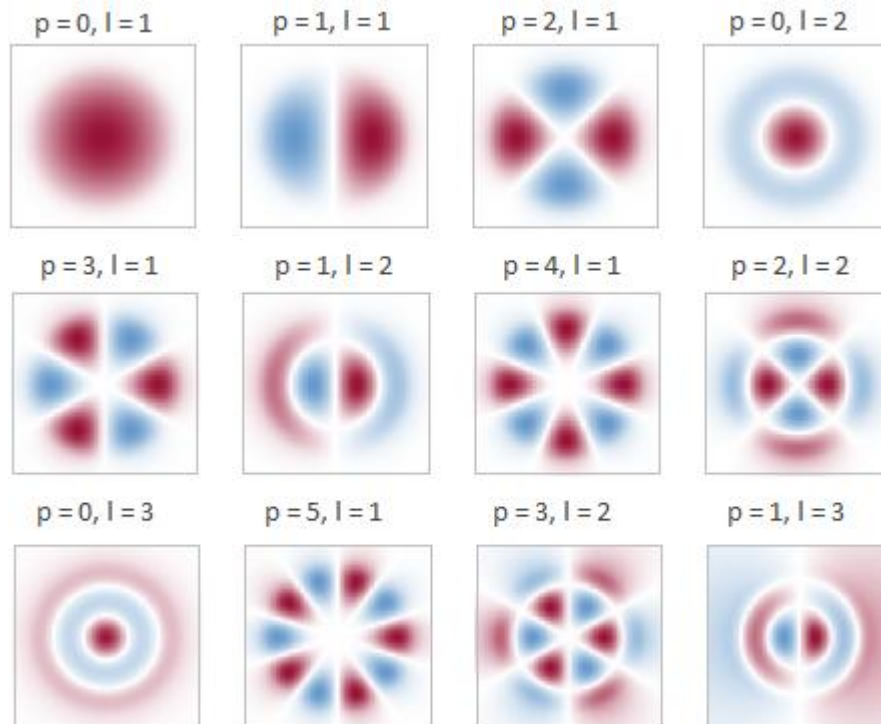
Dosahujeme jimi největší výstupní energetické hustoty energie při dané energii laseru. Nejjednodušší druhy těchto módů jsou Gaussovy módy. Gaussův svazek se zvětšuje či smršťuje v průběhu šíření. Nejčastěji používanými módy jsou Hermit-Gaussův a Laguerre-Gaussův. Označujeme je TEM_{mn} , kde indexy m a n jsou celá čísla označující horizontální a vertikální řady. [5, 14]



Obr. 9: Příklady základního módu [5]

1.3.3.2 Vlnový mód

Nelze zde vytvořit nekonečně mnoho profilů, protože jsme omezeni mírou vlnění okolo jádra. Počet řízených režimů, jejich příčné profily amplitudy a jejich šíření závisí na detailech vlnovodu a na optické frekvenci. Při označení $TEM_{p,l}$ indexy představují radiální a úhlové řady. [5]



Obr. 10: Profily amplitudy. Dvě barvy ukazují různé elektrické pole hodnot [5]

1.4 Optické zesílení a zpětná vazba

Touto částí bych chtěl shrnout vlastnosti dvou hlavních částí laseru - zesilovač a rezonátor

1.4.1 Laserové zesílení

Laserový zesilovač je zařízení, jež přijímá některé vstupní signály a generuje výstupní signál s vyšším optickým výkonem. Vstupy a výstupy jsou laserové paprsky, ať už jako paprsky ve volném prostoru nebo vláknově. Zesílení se dosahuje stimulovanou emisí v atomárních nebo molekulárních systémech při přechodech mezi hladinami s inverzním obsazením (horní hladina je obsazena více než dolní). Šířka čáry atomového přechodu nebo mechanismu nehomogenního zařízení (může to být Dopplerův jev) určuje pásmo zesilovače. Většina optických zesilovačů jsou buď elektricky, nebo opticky čerpány.

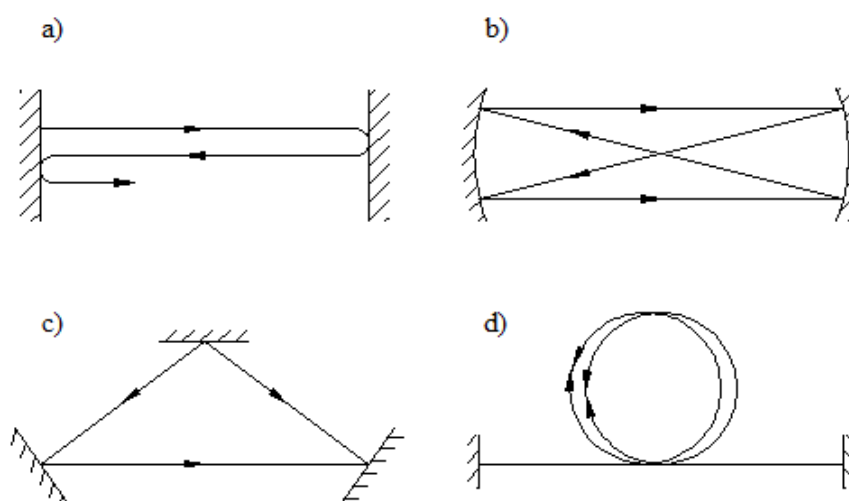
Mezi důležité parametry optického zesilovače patří:

- maximální zisk, který určuje zesilovací činitel - poměr výstupní a vstupní energie
- saturační vstupní síla je definovaná jako optický výkon vstupního signálu

- saturační výstupní síla je definována jako optický výkon výstupního signálu
- energetická účinnost a požadavky na výkon čerpadla [3, 4, 5, 14]

1.4.2 Optický rezonátor

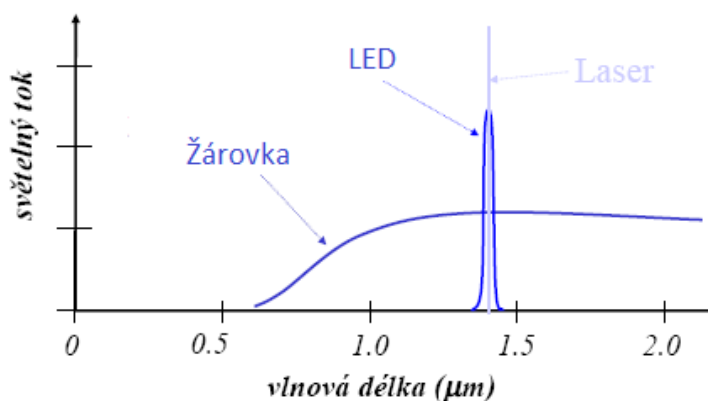
Je obdobou elektronického rezonančního obvodu v optické oblasti - zachycuje a hromadí optické záření o určitých rezonančních frekvencích. Lze na něj nahlížet jako na optickou přenosovou soustavu se zpětnou vazbou - světlo cirkuluje nebo se opakovaně odráží v systému, aniž by ho opustilo. Nejzákladnějším rezonátorem jsou dvě rovnoběžná rovinná zrcadla, mezi nimiž se světlo téměř beze ztrát odráží.



Obr. 11: Optické rezonátory

- a) rezonátor s rovnými zrcadly (planoparalelní)
- b) rezonátor se sférickými zrcadly
- c) kruhový rezonátor
- d) vláknový rezonátor [4]

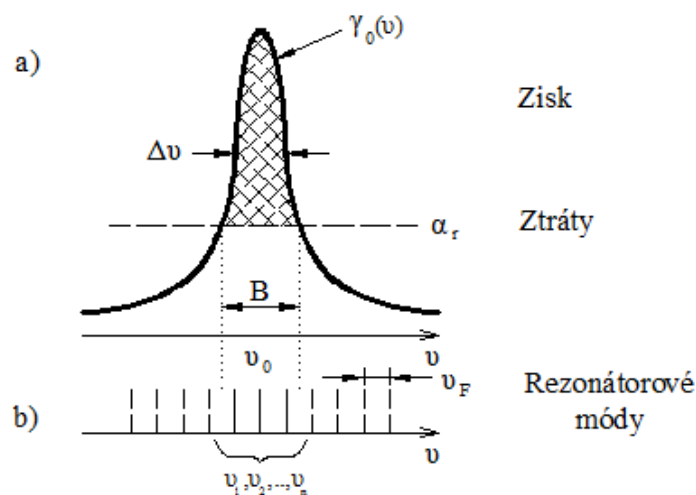
1.5 Spektrální složení laseru



Obr. 12: Spektrální šířka pásma [7]

Záření generované laserem je určeno jak tvarem čáry atomového přechodu aktivního prostředí, tak módy rezonátoru. Jasně to určují podmínky pro dosažení oscilace laseru:

- Podmínka zesílení vyžaduje, aby počáteční koeficient zesílení zesilovače byl větší, než koeficient ztrát, je splněna pro oscilace spadají do spektrálního pásu šířky B okolo atomové rezonanční frekvence ν_0
- Fázová podmínka vyžaduje, aby frekvence oscilací byla frekvencí rezonátorového módu



Obr. 13: Podmínky pro dosažení oscilace laseru

- Laser může oscilovat pouze na frekvencích, na kterých je koeficient zesílení větší než koeficient ztrát (rastrová část)
- Oscilace mohou nastat pouze uvnitř šířky $\Delta\nu$ rezonátorových módů (znázorněné čarami)

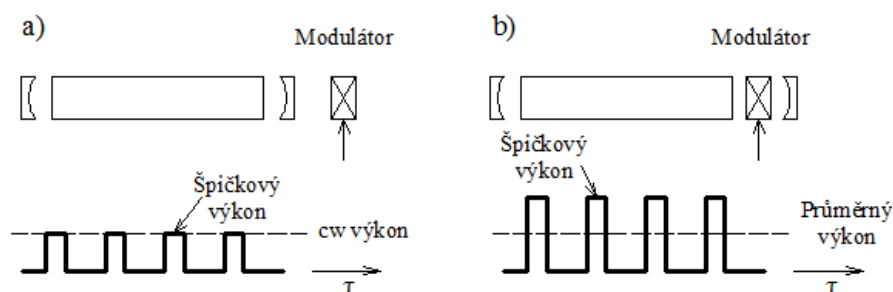
Z tohoto vyplývá skutečnost, že jsou možné oscilace pouze na konečném počtu frekvencí. [4, 5, 12]

1.6 Impulzní lasery

Nejzákladnějším rozdělení z hlediska časového působení laseru může být kontinuální nebo pulzové.

1.6.1 Způsoby získávání impulzního záření

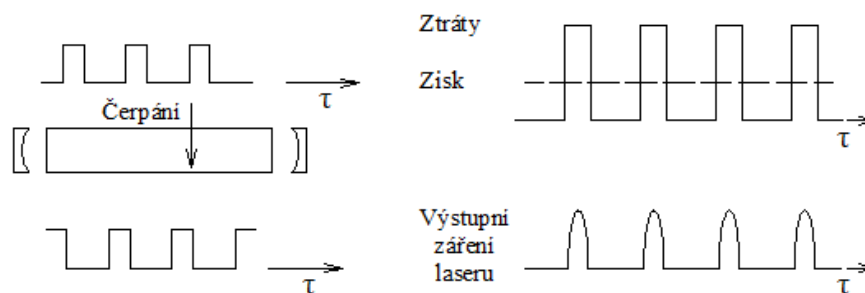
Impulzy laseru lze získat velice prostým způsobem a to použitím kontinuálního (cw) laseru a externí uzávěrky nebo modulátoru, který záření propustí pouze během požadovaného časového intervalu. Ovšem tato metoda má dva základní nedostatky. První je nízká účinnost (energie vyzařovaná v době mezi jednotlivými pulzy se blokuje, tudíž ztrácí) a druhá je skutečnost, že špičkový výkon impulzního laseru nemůže přesáhnout hodnotu stálého výkonu kontinuálního zdroje. Účinnější metodou získávání laseru je zapínání a vypínání samotného laseru s vnitřní modulací. Tzn., že energie nashromážděná v čase mezi pulzy je vyzářena během impulsu. Energie se může hromadit v rezonátoru buď ve formě světla, které je periodicky vypouštěné ven, nebo v atomárním systému ve formě inverzního obsazení a energie se periodicky uvolňuje, když systém může oscilovat. Tímto způsobem se dosahuje špičkových výkonů, větších než u konstantních výkonů kontinuálních laserů.



Obr. 14: Porovnání výstupního záření impulzních laserů a) s vnějším modulátorem a b) s vnitřním modulátorem

1.6.1.1 Spínání zisku

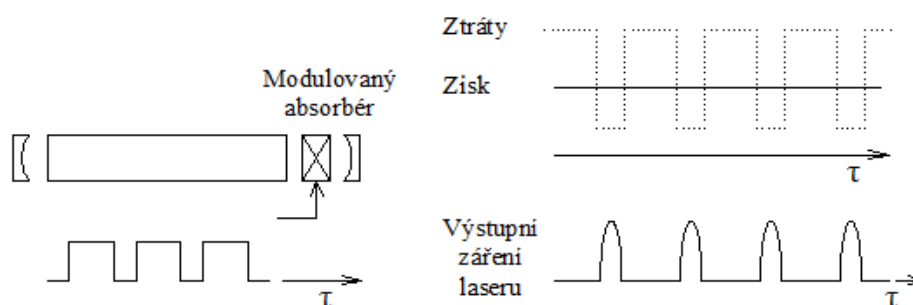
Je to poměrně jednoduchá metoda založená na kontrolovaném zapínání a vypínání čerpání. Během zapnutého čerpání přesáhne koeficient zesílení hodnotu koeficientu ztrát a je vygenerováno laserové záření. Využívá se u většiny polovodičových laserů, protože lze snadno modulovat čerpací elektrický proud



Obr. 15: Spínání zisku

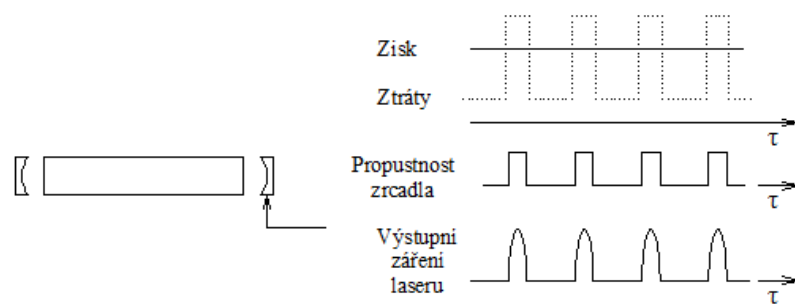
1.6.1.2 Spínání jakosti Q dutiny

Laserové oscilace jsou zde znemožňovány zvýšením ztrát v rezonátoru (zhoršováním činitele jakosti Q rezonátoru). Protože čerpání probíhá stále s konstantním výkonem v čase, hromadí se v době ztrát energie v atomech ve formě akumulované inverzní populace. Když se při sepnutí sníží ztráty, uvolní se inverzní populace vyzářením intenzivního, většinou krátkého, impulsu záření.

Obr. 16: Spínání činitele jakosti Q resonátoru

1.6.1.3 Otevírání dutiny

Zde dochází k hromadění atomů v rezonátoru během doby, kdy laser nemá vyzářovat a na jejich uvolnění během doby vyzářování laseru. Od spínání jakosti Q se liší tím, že se mění propustnost zrcadla. Systém si můžeme představit jako nádobu, do které se nalévá voda. Jakmile je nádoba plná, uvolní se její dno a voda naráz vyteče. Dno se ihned vrátí na své místo a cyklus se může opakovat. V případě laseru nádobě odpovídá rezonátor, přítoku vody konstantní čerpání a dnu výstupní zrcadlo. V době, kdy laser nemá vyzářovat je znemožněn jakýkoliv únik světla, včetně užitečného a tím dochází k zanedbatelným ztrátám a rostoucí optický výkon uvnitř laserového rezonátoru. [3, 4, 5, 6, 7, 14]



Obr. 17: Otvírání dutiny

2 LASEROVÉ MIKRO-OBRÁBĚNÍ

Laserové obrábění je dobře zavedenou a vyspělou technologií pro svou vysokou přesnost zhotovení a neustále se uplatňuje v nových aplikacích. Použití laserů nabízí mnoho různých výhod oproti konvenčním mikro-výrobním a technologickým procesům, včetně:

- široká flexibilita
- neomezuující materiálové vlastnosti
- nekontaktní proces
- schopnost vytvořit rovinné i tvarové plochy
- vysoká přesnost
- mnoho procesová kompatibilita
- 2D a 3D struktura

Laserové mikro-obrábění je charakterizováno jako laserové řezání, vrtání, leptání, broušení materiálů jako jsou plasty, sklo, keramika a tenké kovy s rozměry od 1 mikronu do 1 mm.

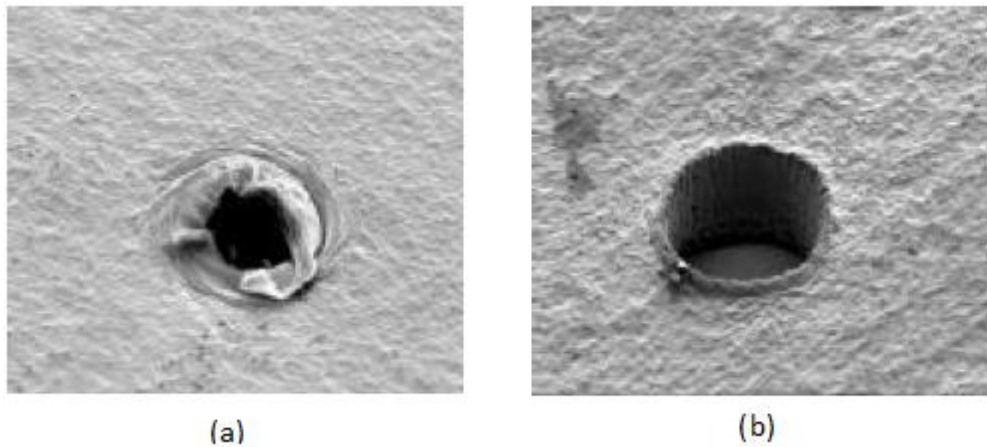
Přestože bylo odtavování materiálu pomocí pulzního zdroje světla studováno již od samotného vynálezu laseru, teprve až zpráva z roku 1982 o rozleptávání polymerů excimerovým laserem dala impuls rozšíření výzkumu zaobírané mikro-obráběním. V uplynulých letech se vědecký a průmyslový výzkum v této oblasti množil ohromující mírou. Pravděpodobně povzbuzený pozoruhodně málo faktory, které ovlivní vlastnosti v okolí zásahu laserového paprsku. Zpracovatelský průmysl nyní využívá laserového mikro-obrábění v mnoha high-tech oblastech, pro které je to nepostradatelná technologie.

Nyní je známo, že čistého odtavování lze rovněž dosáhnout pomocí pulzního laserového zdroje na jiných vlnových délkách, než jsou ultrafialové. Za předpokladu, že jsou fotony absorbovány v mikro hloubkách v čase menším, než je čas potřebný pro šíření tepla od ozařované oblasti, pak pulzní lasery, jako je CO₂, Nd a harmonické mohou být stejně účinné. Pro konkrétní aplikaci nyní výběr laseru zahrnuje kritéria, jako jsou rychlost procesu, spolehlivost, servisní intervaly, kapitálové a provozní náklady celého obráběcího stroje, nikoli jen kvalitou zpracovaných částí.[5, 6, 8]

2.1 Laserové vrtání

Je již velmi dlouho zavedená metoda a její schopnost vrtat díry stále menších průměrů se uplatňuje v mnoha průmyslových odvětvích. Tím, že poskytuje řešení pro kritické problémy při výrobě integrovaných obvodů, pevných disků, displejů, telekomunikačních zařízení dává těmto oblastem klíč k přesnosti, flexibilitě a rychlosti a poskytuje tak možnost k jejich dalšímu vývoji.

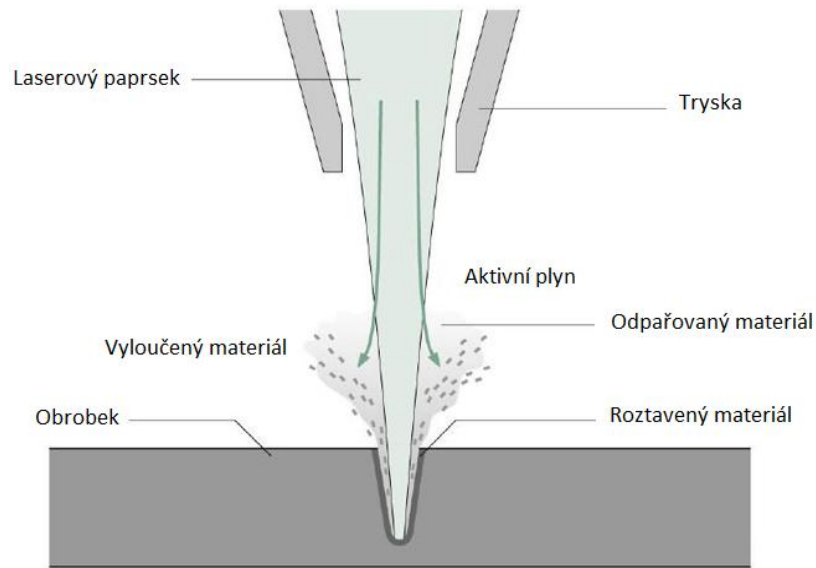
Laserové vrtání se rychle stala levnou alternativou k zastaralým mechanickým způsobům vrtání, jako jsou CNC, děrování, drátové řezání, protahování nebo jiné populární destruktivní metody obrábění. [5, 7, 8, 25]



Obr. 18: Otvor v HDPE vrtán a) rotujícím vrtáčkem o $\phi 100 \mu\text{m}$, b) KrF laserem o $\phi 75 \mu\text{m}$ [25]

Na Obr. 18 je znázorněno porovnání kvality praktického příkladu laserového vrtání s mechanickou rotující vrtačkou. Zatímco mechanická díra je blízko minimální velikosti, kterou lze vrtat je zřejmé zlepšení kvality u ještě menšího otvoru při použití laseru.

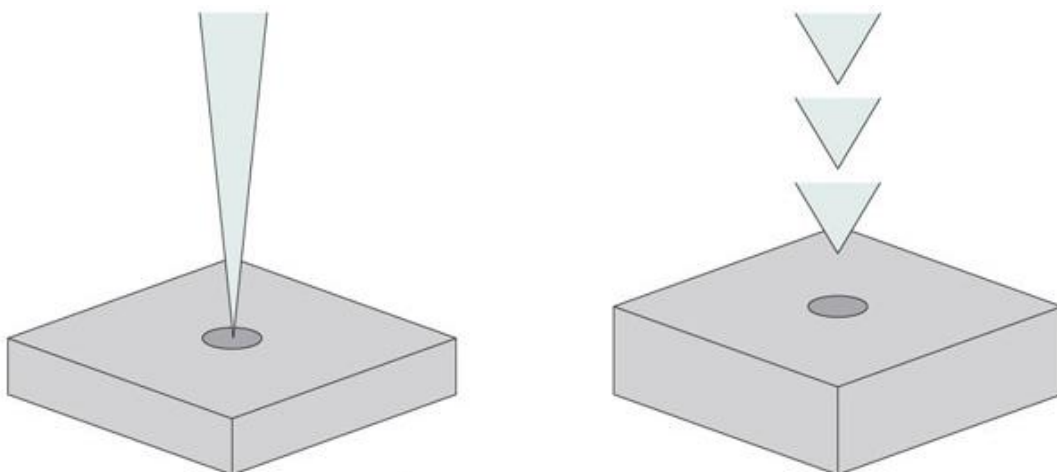
Vrtání probíhá krátkým laserovým pulsem s vysokou hustotou výkonu zdroje energie dopadající na obrobek velmi rychle, takže je materiál taven a vypařován. Při větším pulsu energie se více materiálu taví a odpařuje. Vypařování způsobuje zvýšení objemu materiálu najednou, vytváří se tlak a ten vyloučí roztavený materiál z otvoru. [7, 25]



Obr. 19: Princip úběru materiálu při vrtání [7]

2.1.1 Jednorázové a nárazové vrtání

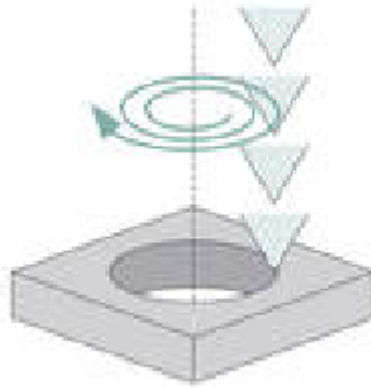
V nejjednodušším případě je výroba otvoru docílena jediným laserovým pulsem s poměrně vysokou energií. Tato metoda umožňuje velké množství otvorů, které mají být vytvořeny v extrémně krátkém čase. Při nárazovém vrtání se díra vytváří pomocí několikanásobného krátkého působení nízkoenergetických pulzů laseru. Tato technika produkuje hlubší, přesnější díry než jednorázový puls a také umožňuje vrtání děr malých průměrů. [7, 8]



Obr. 20: Jednorázové vrtání (vlevo) a nárazové vrtání (vpravo)

2.1.2 Trepanace

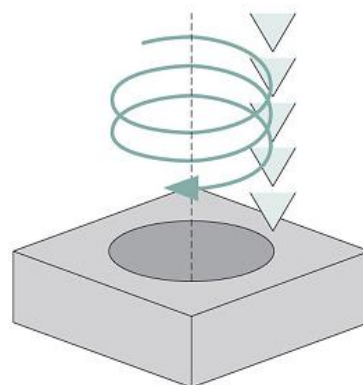
Rovněž využívá více laserových pulzů k výrobě otvoru. V tomto procesu je pilotní díra vytvořena pomocí nárazového vrtání. Laser následně rozšiřuje tuto pilotní díru pohybem v sadě stále větších kruhů. Většina roztaveného materiálu je vyloučena dolů dírou. [7]



Obr. 21: Princip trepanace

2.1.3 Spirálovité vrtání

Na rozdíl od trepanace se u spirálovitého vrtání nevytváří pilotní díra. Hned od počátku se laser pohybuje v kruzích nad obrobkem podle množství dodaných energetických pulsů a současně je vystřelováno velké množství roztaveného materiálu důsledkem vysokých tlaků odpařovaného materiálu. Laser dále pokračuje ve směru tvořícího se otvoru v sestupné spirále. Ohnisko zatím může být upraveno tak, že je vždy na spodní straně díry. Jakmile laser pronikne materiálem, může dokončit několik otáček pro zvětšení základny díry a vyhlazení hran. Spirálovité vrtání umožňuje produkovat velmi velké a hluboké vysoce kvalitní díry. [7, 8]



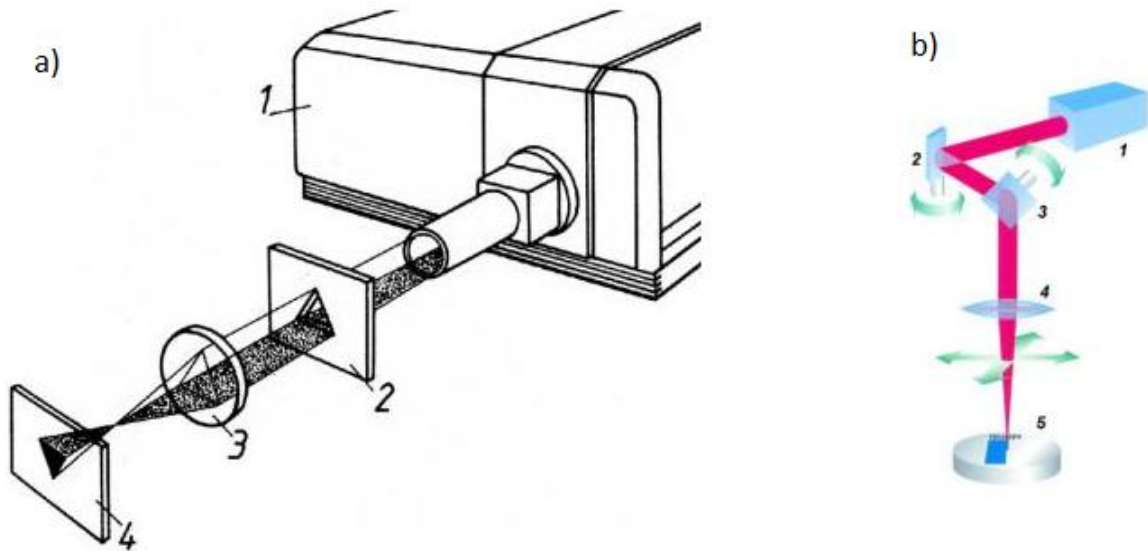
Obr. 22: Princip spirálovitého vrtání

2.2 Laserové značení

Je metoda pro označování různých typů objektů. Laser vytváří na povrchu materiálu s vysokou přesností stálý, mechanicky odolný, velmi kontrastní a jinak nenapodobitelný popis. Vše probíhá v jediné krátké operaci bez použití chemických přísad a inkoustů nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Výška znaků je obvykle zlomky až jednotky milimetrů, tloušťka odpařené vrstvy materiálu je v řádu mikrometrů. Princip spočívá v tom, že laserový paprsek nějakým způsobem modifikuje optický vzhled povrchu, který zasáhne. K tomu může dojít prostřednictvím řady mechanismů:

- ablace materiálu (laserové gravírování), někdy se odstraní některé povrchové vrstvy
- tavením kovu, čímž mění strukturu povrchu
- mírné pálení (karbonizace), např. papíru, kartonu, dřeva nebo polymerů
- expanzí polymeru, některé látky se odpaří
- generace povrchových struktur, jako jsou malé bublinky

Vychylováním laserového paprsku (např. dvě pohyblivá zrcadla) můžeme rychle psát popisy, symboly, čárové kódy a další grafiky pomocí vektorového skenování nebo skenování rastrem. Další metodou je použití masky, která není vyobrazená na obrobku (projekční značení, značení maskou). Tato metoda je jednoduchá a rychlejší (platí i při pohybu obrobků), ale méně flexibilní než vychylování. [5, 7, 6]



Obr. 23: Princip značení součástí: a) přes masku 1 - laser, 2 - maska, 3 - objektiv pro zaostření paprsku, 4 - obrobek; b) vychylováním paprsku 1 - laser, 2,3 vychylovací zrcadla, 4 objektiv, 5 - obrobek [6]

2.2.1 Aplikace laserového značení

- přidávání část čísla „spotřebuje do“ data na potravinářských obalech, lahví atd.
- přidávání sledovatelné informace pro řízení kvality
- označení desek s plošnými spoji (PBC), elektronové součástky a kabely
- tisk loga, čárových kódů a další informace o produktech

S porovnáním jiných tiskařských aplikací, jako jsou inkoustové a mechanické značení, má laserové značení řadu výhod

- velmi vysoké rychlosti zpracování
- nízké provozní náklady (bez použití spotřebního materiálu)
- konstantní vysoká kvalita a trvanlivost výsledků
- schopnost psát velmi malé znaky
- vysoká flexibilita při automatizaci [7]

2.2.2 Požadavky pro značící lasery

Značící procesy často vykazují určitou hranici, pod níž nelze dosáhnout uspokojivého výsledku, dokonce i s několika impulsy. To vyžaduje vhodnou kombinaci maximálního výkonu, pulzní energie a poloměru svazku v ohnisku (délka pulzu má také určitý vliv). Kvůli

přísným zaostřovacím požadavkům (vysoké rozlišení) a spolu s přiměřenou pracovní vzdáleností je vysoká kvalita parsku nutná.

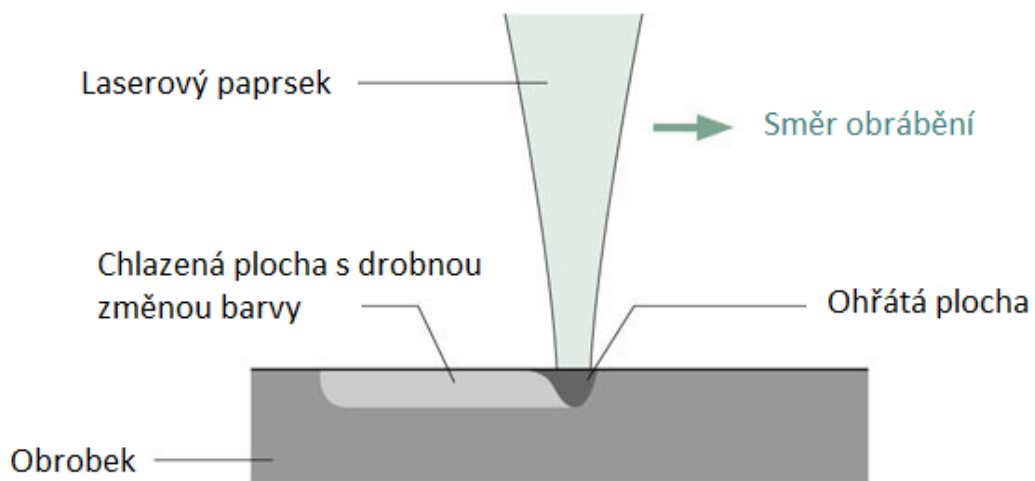
Pro rychlé zpracování musí laser nabídnout dostatečně vysoké opakování frekvence impulzů. V režimu spínání Q-dutiny je omezen průměrný výkon, ale nastává zde problém, že první impulz má většinou větší energii (proto se v určitých časových intervalech vypíná). V ostatních režimech je omezena délka pulsu.

Laserová nastavení by mělo být kompaktní a neměly by vyžadovat vysoké nároky na chladič systém. Chlazení vzduchem je často proveditelné a lepší.

Co možné nejnižší náklady a to nejen z pohledu investic na pořízení a instalaci, ale i na údržbu a provoz. [6, 7]

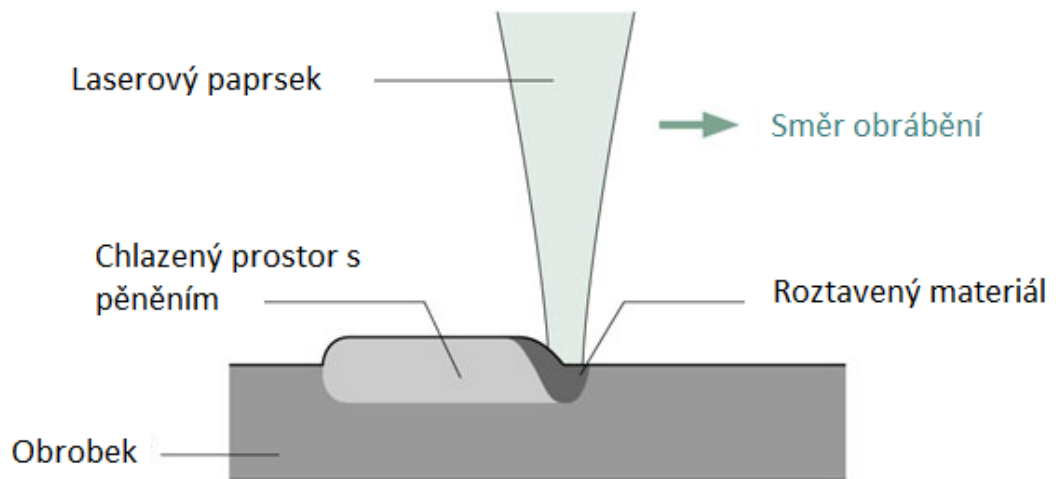
2.2.3 Změna povrchové barvy

Pro zbarvení plastů musíme způsobit laserovým paprskem lokální ohřev povrchu, který zapříčiní u určitých materiálů, aby se staly tmavší a jiné světlejší. Změna polotvaru závisí na jeho složení. Při tmavění jsou vytvářeny saze, které zvýrazní znaky a symboly na světlé barvě polymeru. [7]



Obr. 24: Tmavění povrchu

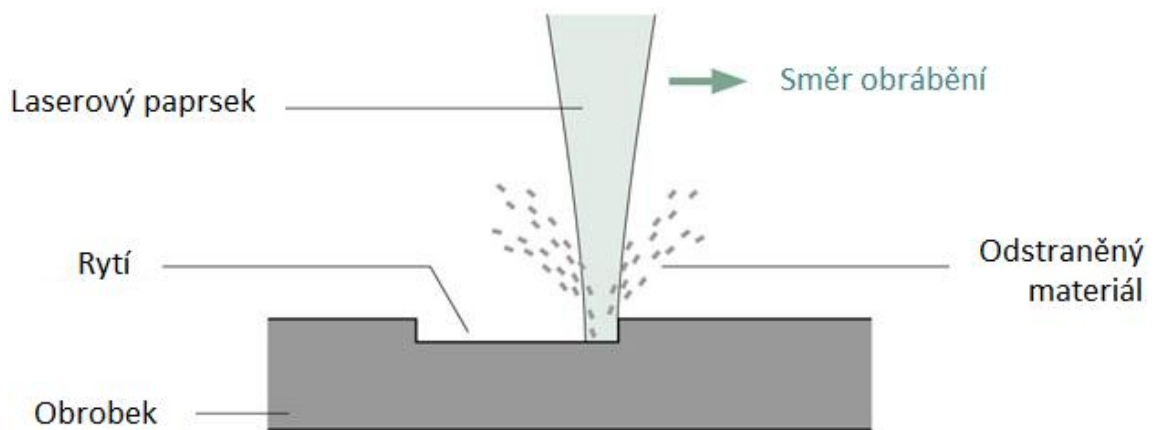
Chceme-li u tmavého plastu dosáhnout zesvětlení, musí laserový paprsek lokálně roztavit povrch materiálu. V roztaveném materiálu se vytvoří malé bublinky plynu, které zvyšují jeho objem. Takto zpracovaná oblast se jeví mnohem jasněji než okolní materiál. [7]



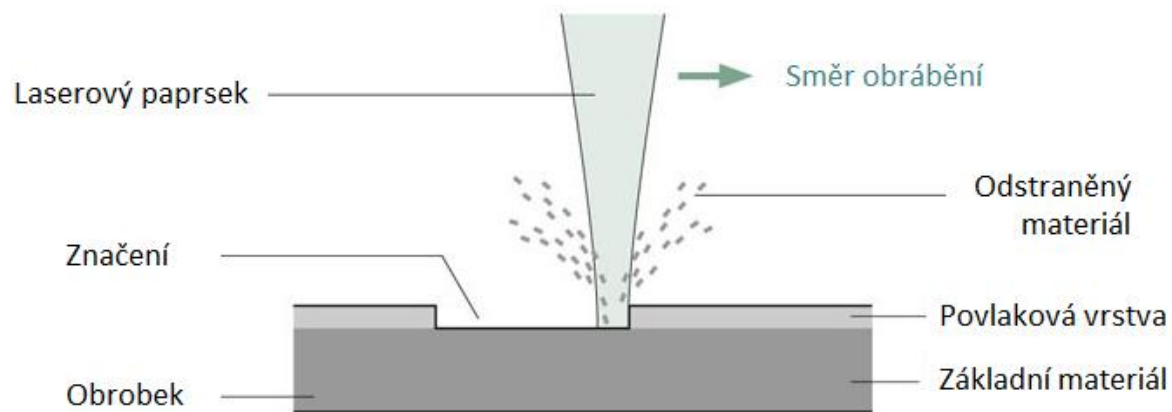
Obr. 25: Zesvětlení povrchu

2.3 Rytí a odtavování

Při rytí nebo odtavování se používají krátké a silné laserové impulsy. Hustota zářivého toku je tak vysoká, že se základní materiál nebo povlak taví a odpařuje, nebo rozkládá. Téměř každý materiál může být rytý a v případě potřeby lze produkovanými oxidy zvýraznit značení. Odtavováním se odstraňuje vrstva povlaku ze základního materiálu, které mají výrazně jinou barvu. Typické materiály pro odtavování jsou anodizovaný hliník, laky a speciální značení folií. [6, 7]



Obr. 26: Schéma laserového rytí



Obr. 27: Schéma laserového odtavování

3 POLYMERY

Jsou látky tvořené makromolekulami obsahující převážně atomy uhlíku, kyslíku, vodíku, dusíku. Používány jsou hlavně ve stavu tuhém a pevném, pastovitém, ale i ve stavu kapalném jako součást mazacích přípravků. Technologie zpracování obvykle prochází kapalným nebo pastovitým stavem za zpracovatelského tlaku a teploty v průběhu určitého časového intervalu. Výsledný tvar je udáván zejména technologickým zařízením. Polymery dělíme do dvou skupin. První je skupina elastomerů a druhá je skupina plastů, jež se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty. [29]

3.1 Základní pojmy

Monomer - látka, jejíž molekuly mají schopnost se za určitých podmínek spojovat v makromolekuly

Mer - opakující se jednotka v polymerní makromolekule, jejíž chemické složení je shodné se složením molekuly příslušného monomeru

Krystalický stav - určitým způsobem uspořádaná soustava základních částic (atomů a molekul), kterou lze přesně charakterizovat

Sklovitý stav - neuspořádaná soustava částic látky v tuhém skupenství, kterou lze charakterizovat zákony statistiky (pravděpodobnosti)

Teplota skelného přechodu - teplota, při které polymer přechází ze stavu kaučukovitého do stavu sklovitého nebo naopak

Teplota tání - teplota, kdy dochází k přechodu z tuhé fáze na kapalnou nebo naopak

Teplota toku - teplota, při které polymer přechází ze stavu prakticky tuhého do stavu plastického

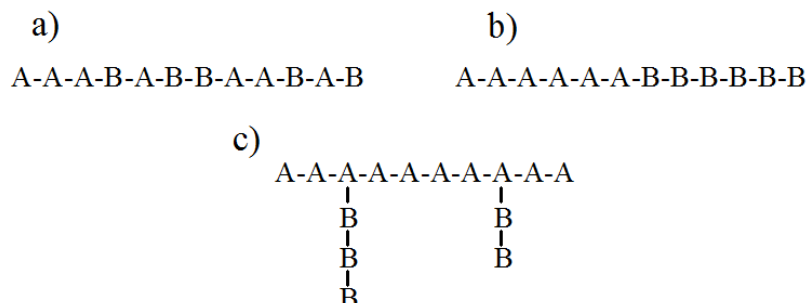
Fáze - oblast jednotného stavu látky [2]

3.2 Makromolekulární řetězce

Ty polymery, jejichž makromolekulární řetězce jsou tvořeny mery jednoho druhu, můžeme schematicky naznačit AAAAA. Jestliže A označuje mer, nazýváme tento typ homopolymery. Pokud řetězce tvoří mery více druhů, pak je nazýváme kopolymery. Ty dále dělíme na:

- a) statistické - řetězce jsou tvořeny nepravidelně, statisticky nahodile

- b) blokové - řetězce jsou tvořeny dvěma nebo více bloky merů
- c) roubované - mají na základní řetězec „naroubovány“ postranní řetězce merů jiného druhu [2]



Obr. 28: Typy kopolymerních řetězců

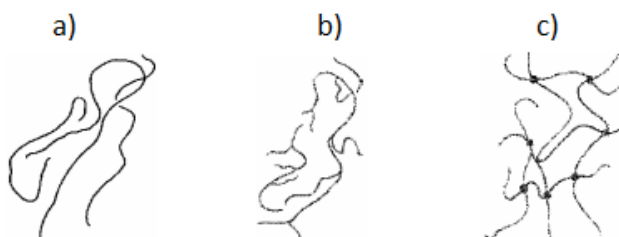
3.3 Rozdělení polymerů

Polymery můžeme rozdělovat podle nejrůznějších kritérií a to:

3.3.1 Struktura molekul

Moderní molekulové teorie vychází ze základních předpokladů:

- makromolekulární řetězce mohou být lineární, rozvětvené nebo uspořádané do prostorové sítě
- makromolekulární řetězce nejsou tuhými útvary, ale následkem neustálého pohybu svých jednotlivých samostatně se projevujících úseků neboli segmentů nabývají různých geometrických uspořádání neboli různé konformace
- vlastnosti polymerů závisejí na jejich fázovém stavu, molekulové hmotnosti a chemické složení



Obr. 29: Schematické znázornění molekul lineárního (a), rozvětveného (b) a sesíťovaného polymeru (c)

3.3.2 Nadmolekulární struktura

1. Amorfní polymery - jsou charakteristické svou tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností a díky nízkému indexu lomu světla jsou i transparentní, resp. průhledné nebo čiré (závisí na % propustnosti světla)
2. Krystalické polymery - pevnost a tvrdost roste se stupněm krystalinity, houževnaté a jsou mléčně zakalené (vysoký index lomu světla)

Schopnost u rozvětvených a lineárních polymerů vytvářet nebo nevytvářet krystaly je dominantní a podle níž rozeznáváme:

- polymery se sklonem k samovolné krystalizaci
- samovolně nekystalizující polymery
- nekystalizující za žádných okolností

O této schopnosti rozhodují hlavně tyto faktory:

- polarita skupin polymerního řetězce
- jeho geometrická pravidelnost
- objem substituentů na něm vázaných, v případě rozvětvených makromolekul počet rozvětvení a délka postranních řetězců
- ohebnost polymerního řetězce

U ideálně amorfních polymeru by zaujímaly statisticky nejpravděpodobnější, tj. nejneuspořádanější konformaci. Ve skutečnosti však u polymerů převládají konformace nikoliv statisticky náhodné, ale energeticky nejvýhodnější.

Krystalické polymery nikdy nedosáhnou 100% krystalizace, proto se užívá výraz semi-krystalické. [2, 27]

3.3.3 Teplotní působení

1. Termoplasty - tepelným působením přecházejí ze stavu tuhého do stavu plastického, při kterém je můžeme snadno tvarovat a zpracovávat. Po ochlazení opět nastává tuhá fáze bez chemických změn a lze tedy proces měknutí a tuhnutí teoreticky opakovat neustále
2. Reaktoplasty - dříve nazývané termosety se rovněž dají zvýšenou teplotou připravit ke tváření, ale jen po omezenou dobu. Pak nastává nevratná chemická reakce, při níž přechází řetězce z lineárního stavu do stavu zesíťovaného, jež nazýváme tzv. vytvrzováním.

3. *Kaučuky, pryže a elastomery* - jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci, a to prostorovému zesíťování struktury, probíhá tzv. vulkanizace. [1, 27]

3.3.4 Další dělení

- podle aplikace - široké, inženýrské, špičkové
- podle přísad - plněné, neplněné
- podle polaritý - polární, nepolární
- podle původu -přírodní, syntetické
- podle chemické struktury - polyolefiny, polyamidy, styrenové plasty apod.

3.4 Vznik polymerů

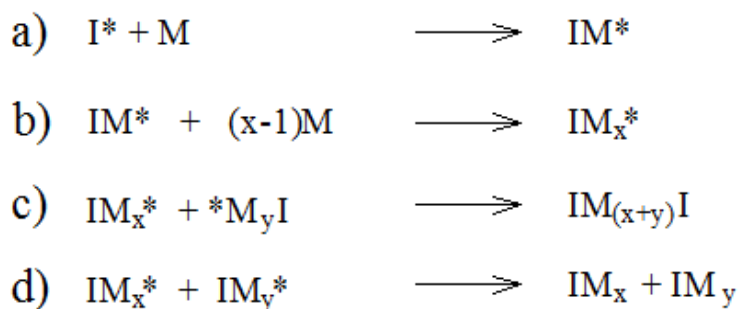
3.4.1 Syntetické polymery

Syntetické polymery vznikají třemi základními chemickými reakcemi a to polymerací, polyadící a polykondenzací.

3.4.1.1 Polymerace

Je řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru, při níž vznikají dlouhé makromolekuly polymerů. Nevznikají při ní vedlejší produkty a polymer má chemické složení stejné jako monomer

Jednotlivé dílčí děje probíhající při polymeraci jsou následovné:



Obr. 30: Probíhající děje při polymeraci

- iniciace
- propagace
- terminace - rekombinace

d) terminace - disproporcionace

Podle druhu aktivních částic rozeznáváme polymerace:

- Radikálová - je vyvolána účinkem určitého iniciátoru, teplem či zářením. Takto vzniklá energie umožňuje překonat odpudivou sílu molekul a jejich přiblížení, aby mohla proběhnout chemická reakce (polymerace)
- Iontová - při této reakci rostoucí konce nebo aktivní centra vznikající makromolekuly vytvářejí polarizovaná seskupení, mezi která je vtahována molekula monomeru
(jak při radikálové tak iontové polymeraci rostou řetězce prostorově nepravidelně)
- Koordinační (stereospecifická) - vznikají prostorově pravidelně uspořádané řetězce [2]

3.4.1.2 Polykondenzace

Je sled stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek. Ke vzniku polymeru je zapotřebí, aby výchozí sloučeniny měly potřebný počet funkčních skupin (nejméně dvě). Při této reakci vzniká ze dvou nízkomolekulárních látek polymer a nějaká nízkomolekulární látka, většinou voda.

3.4.1.3 Polyadice

Pokud jsou ve sloučeninách molekuly, jež obsahují násobné vazby nebo jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, mohou být mimo vzájemného spojování schopny adiční reakce se sloučeninami, jejichž molekuly obsahují vhodné funkční skupiny.

3.4.2 Vznik přírodních polymerů

Přírodní kaučuk je obsažen v některých rostlinách v podobě mléka zvané latex. Pro hospodářskou těžbu má ovšem význam hlavně strom *Hevea brasiliensis* pěstovaný na plantážích. Získává se tak, že pod šikmý zářez na stromu se odchytává do nádoby unikající latex - tzv. čepování. Jeho složení není vždy stálé, průměrný obsah kaučukového uhlovodíku je cca 35%. Zbytek jsou voda, popel, pryskyřice, cukry, bílkoviny aj. Aby jej bylo možné zpracovávat a delší dobu uschovat, musíme napřed provést stabilizaci - nejčastěji amoniakem.

Z latexu lze suchý kaučuk získat vysrážením, vymražením nebo odpařením vody. Sražené bloky se dále zpracovávají na celou řadu přírodních kaučuků, jako je uzený kaučuk, světlá krepa a standardní kaučuk.[2, 29]

3.5 Fyzikální vlastnosti polymerů

Obsahují základní údaje pro posouzení chování látky v životním prostředí

- Hustota [kg/m^3]
- Nasákavost pro vodu [%]
- Protážení [%]
- Pevnost v tahu, tlaku, ohybu [MPa]
- Tvrdost

Pro získání lepších vlastností se polymery velmi často modifikují. Dosahuje se toho fyzikální, mechanochemickou a chemickou modifikací.

3.5.1 Fyzikální vlastnosti ovlivňující účinek laseru

3.5.1.1 Tepelná kapacita [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]

Tepelná kapacita za stálého objemu se rovná derivaci vnitřní energie podle teploty [c_v]. Tepelná kapacita za stálého tlaku je rovna derivaci entalpie podle teploty [c_p]. Matematickým modelem můžeme zjistit, že izobarická tepelná kapacita sklovitého polymeru je jen o necelých 5% větší než izochorická tepelná kapacita. Tento rozdíl však s teplotou roste.

3.5.1.2 Tepelná vodivost [λ ; Wm^{-2}]

Schopnost materiálu vést teplo. Pokud budeme uvažovat plochu A uloženou v rovině yz a teplotním spádem ve směru x , pak můžeme říct, že je to snaha o vyrovnání teplot vedoucí k transportu tepelné energie plochou A proti směru teplotního spádu. Množství tepla převedené jednotkovou plochou za jednotku času při jednotném teplotním gradientu (teplotní rozdíl 1K na vzdálenosti 1m) se nazývá *měrná tepelná vodivost* [λ ; $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Měrná tepelná vodivost při 20°C je u amorfních polymerů poměrně málo závislá na jejich chemické konstituci a pohybuje se nejčastěji v hodnotách 0,13 - 0,19 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Semikrystalické polymery mají obecně větší tepelnou vodivost než polymery amorfní.

3.5.1.3 Spektrální odrazivost [$\rho(\lambda)$; %]

Dala by se charakterizovat poměrem intenzity odraženého záření a intenzity záření dopadajícího na určité vlnové délce.

Intenzitu odraženého záření určuje především skupina tří faktorů:

- druh látky či objektu
- jeho fyzikální stav
- stav jeho okolí

3.5.1.4 Poměrná pohltivost [α_λ ; Wm^{-3}]

Je definovaná jako poměr energie záření určité vlnové délky λ absorbované povrchovou plochou k energii téže vlnové délky na plochu dopadající. Pohlcování světelné energie doprovází její změna na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů látky, tzn. na tepelnou energii. Na základě termodynamického popisu rovnovážného stavu záření bylo stanoveno, že poměr intenzity vyzařování k pohltivosti je závislý jen na teplotě a nikoli na jakosti tělesa (chemické složení, úprava povrchu apod.). Rovněž bylo určeno, že těleso absorbuje nejsilněji právě ty spektrální čáry, které nejsilněji vyzařují.

3.6 Polymery použité v praktické části

Tab. 4: Použité polymery a jejich rozdělení

Termoplasty	Zkratka	Nadmolekulární struktura	Chemická struktura
Akrylonitril butadien styren	ABS	krystalický	vinylové polymery
Polyamid 6	PA 6	krystalický	polyamidy
Polyamid 66	PA 66	krystalický	polyamidy
Polykarbonát	PC	amorfní	polykarbonáty
Polymethylmetakrylát	PMMA	amorfní	akrylové polymery
Polyoxymetylen	POM	krystalický	polyethery
Polypropylen	PP	krystalický	polyolefin
Polystyren	PS	amorfní	vinylové polymery
Polytetrafluoretylen	PTFE	krystalický	polyhalogenolefiny
Polyvinylchlorid	PVC	amorfní	vinylové polymery
Elastomery	Zkratka	Určení	Chemická struktura
Přírodní kaučuk	NR	všeobecné	řetězec obsahující dusík
akrylonitril-butadienový kaučuk	NBR	olejovzdorné	řetězec obsahující dusík
Směs přírodního a styren-butadienového kaučuku	NR-SBR	potravinářství	řetězec obsahující dusík

Tab. 5: Charakteristické schéma použitých polymerů

PP	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n$	PC	$\left[\text{C}_6\text{H}_4 - \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} - \text{CO} \right]_n$
PTFE	$\left[\text{CF}_2 - \text{CF}_2 \right]_n$	POM	$\left[\text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$
PVC	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right]_n$	PMMA	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{C} \begin{array}{l} \text{---} \text{CH}_3 \\ \text{---} \text{C} = \text{O} \\ \text{---} \text{O} \text{---} \text{CH}_3 \end{array}}{\text{C}} \right]_n$
PS	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_n$	PA 6	$\left[\text{N} - (\text{CH}_2)_5 - \underset{\text{O}}{\text{C}} \right]_n$
ABS	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_i \left[\text{CH} - \underset{\text{CH}_2}{\text{CH}} \right]_j \left[\text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_k$		
PA 66	$\left[\text{N} - (\text{CH}_2)_6 - \underset{\text{H}}{\text{N}} - \underset{\text{O}}{\text{C}} - (\text{CH}_2)_4 - \underset{\text{O}}{\text{C}} \right]_n$		
NR	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}} \right]_n$		
NBR	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \underset{\text{CN}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 \right]_n$		

Tab. 6: Vlastnosti použitých polymerů [28]

Polymer	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná kapacita [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplota tavení [°C]	Max. pracovní teplota [°C]
ABS	0,16	1,4	280	85
PA 6	0,29	1,9	280	90
PA 66	0,23	1,7	300	90
PC	0,21	1,3	380	130
PMMA	0,18	1,46	290	85
POM	0,31	1,48	220	85
PP	0,22	1,7	290	135
PS	0,18	1,17	280	70
PTFE	0,25	1,0	330	270
PVC	0,15	0,88	260	80
NR	1,47	1,88	170	65
NBR	2,47	1,89	185	90

CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Vzhledem k zadání a obsahu teoretické části bude náplní praktické části:

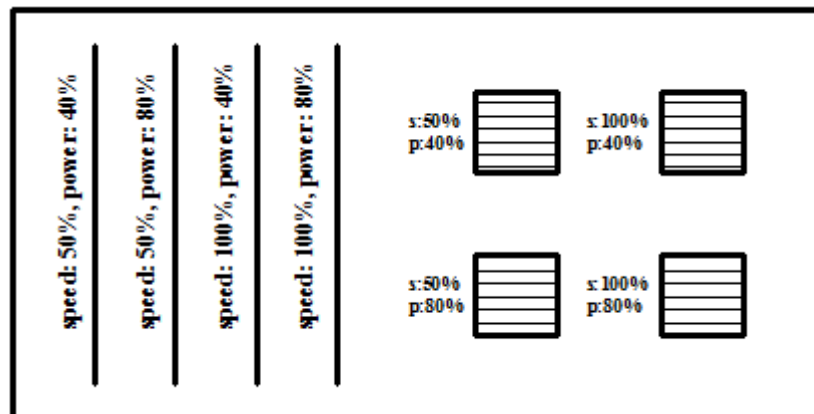
1. Obrábění vzorků z různých polymerních materiálů při konstantních technologických parametrech (výkonu, posuvu a DPI).
2. Provedení měření hloubky řezu a drsnosti povrchu obráběných ploch.
3. Vyhodnocení experimentálních dat za účelem posouzení „laserové obrobitelnosti“ různých polymerních materiálů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

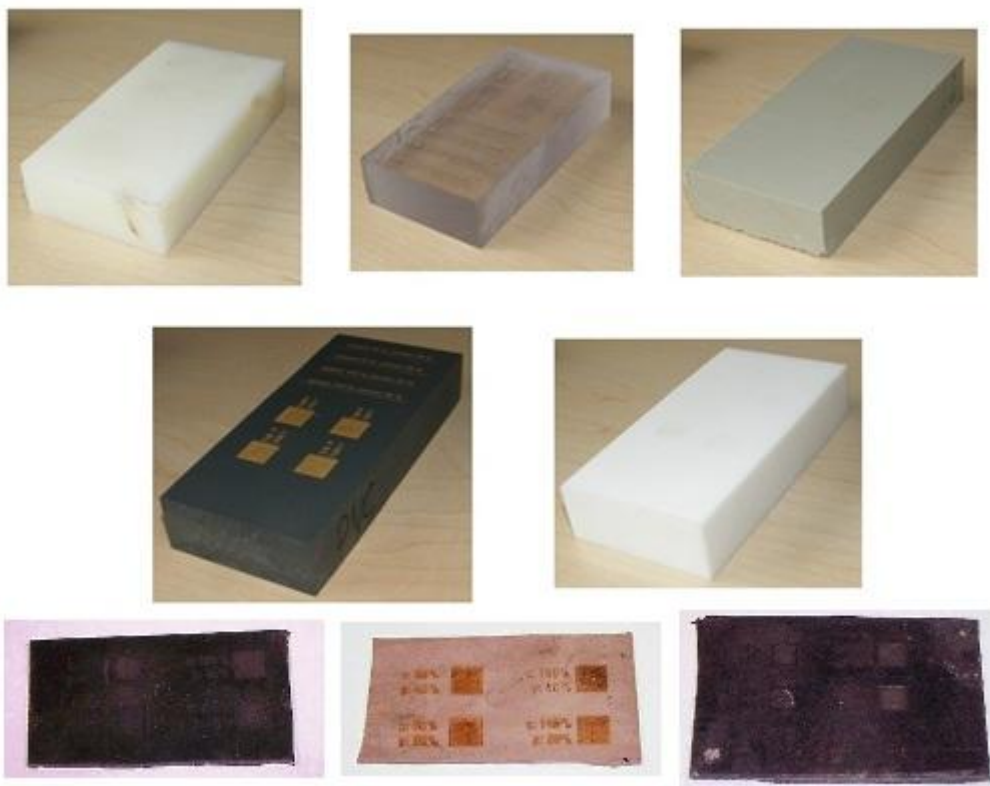
4 CHARAKTERISTIKA VZORKŮ A POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

4.1 Polymerní vzorky

Tělíska pro laserové obrábění vyrobila ve formě kvádrů z materiálů, jež jsou podrobně rozebrány v teoretické části práce, firma Mechanika Prostějov na zařízení Mercury L30 výrobce LaserPro, na němž byly provedeny všechny laserové operace.



Obr. 31: Schematické znázornění vzorku



Obr. 32: Náhled na zhotovené vzorky

4.2 Laserové zařízení



Obr. 33 Laser výrobce LaserPro Mercury L30

Tab. 7: Technická specifikace

Laserová trubice		30 W, CO ₂ laser
Chlazení		Vzduchem, provozní teplota 15°- 30°C
Pracovní plocha		635 x 458 mm
Max. velikost předmětu (š x d x v)	Zavřená dvířka	800 x 570 x 165 mm
	Otevřená dvířka	680 x ∞ x 165 mm
Velikost pracovního stolu		790 x 530 mm
Rozměry stroje (š x d x v)		1125 x 720 x 1005 mm
Pohon		DC Servo motory
Ovládání rychlosti		Nastavitelná 0,1~100%
Ovládání výkonu trubice		Nastavitelná 0,1~100%
Přesnost		0,254mm nebo 0,1% pohybu
Pohyb osy Z		Automatický
Požadavky		
Napájení		100V - 240V AC

4.3 Výškoměr pro hodnocení hloubky řezu

Bylo využito zařízení Mitutoyo Linear Height Gage LH-600D.

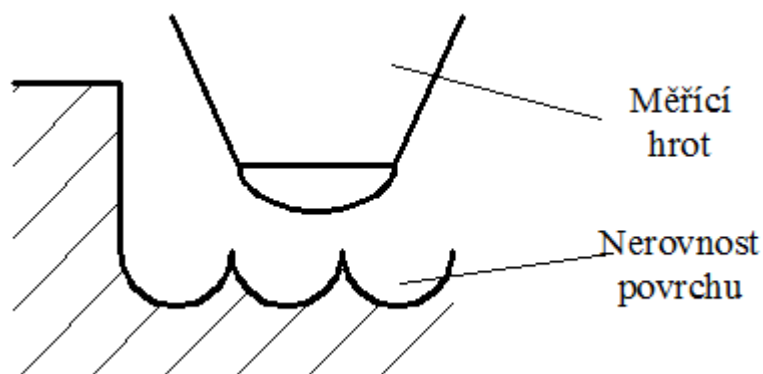


*Obr. 34: Mitutoyo
Linear Height Gage
LH-600D*

Tab. 8: Parametry použitého výškoměru

Měřicí rozsah	0 - 972 mm (0-38")
Rozlišení	0,0001mm/0,001mm/0,01mm/0,1mm 0,000001"/0,00001"/0,0001"/0,001"
Měřicí přesnost	0,000049 μm
Kolmost	0,0002 v 5 μm
Pohon	Motor (5, 10, 20, 25, 30, 40 mm/s = 7 kroků) / manuální
Měřicí síla	1 N
Metody vyrovnávání	Protiváhou
LCD	LCD grafika (320x240)
Počet dat	60 000, pro 1 program max. 30 000
Rozměry	240 x 287 x 1013 mm

Pokud nebyla zaručena přesnost měření vlivem velké drsnosti povrchu, musel být výškoměr nahrazen optickým mikroskopem Zeiss 2772 se 117násobným zvětšením.

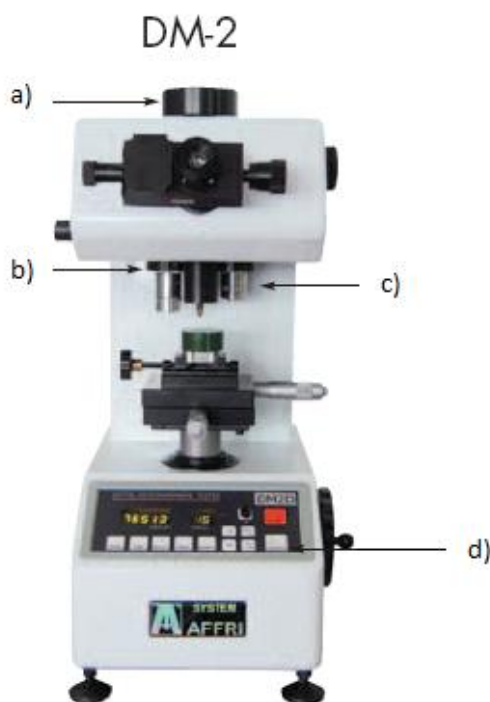


Obr. 35: Schéma chyby vzniklé velkou nerovností povrchu

4.4 Tvrdoměr

K měření mikrotvrdosti byl použit laboratorní tvrdoměr typu DM-2 D italského výrobce Affri.

- Plochý fotoaparát
- Revolverová hlava
- Optika se zvětšením 150x a 600x
- Kontrolní panel



Obr. 36: Tvrdoměr Affri DM-2 D

Tab. 9: Parametry použitého tvrdoměru

Zkušební zatížení [N]	0,4903 - 9,807	
Zatěžovací mechanismus	Metoda automatického zatěžování a uvolňování	
Rychlost zatížení	50 μ m/s	
Doba prodlevy	5 - 99 s	
Měřicí mikroskop	max. měřená délka	250 μ m
	min. měřená jednotka	0,1 μ m
Max. výška vzorku	95 mm	
Max. délka vzorku	100 mm	
Napájení	AC 100 - 240V, 50/60Hz	

4.5 Talysurf CLI 500

Zařízení výrobce měřicí techniky Taylor Hobson je využíváno k hodnocení a charakteristice povrchu.



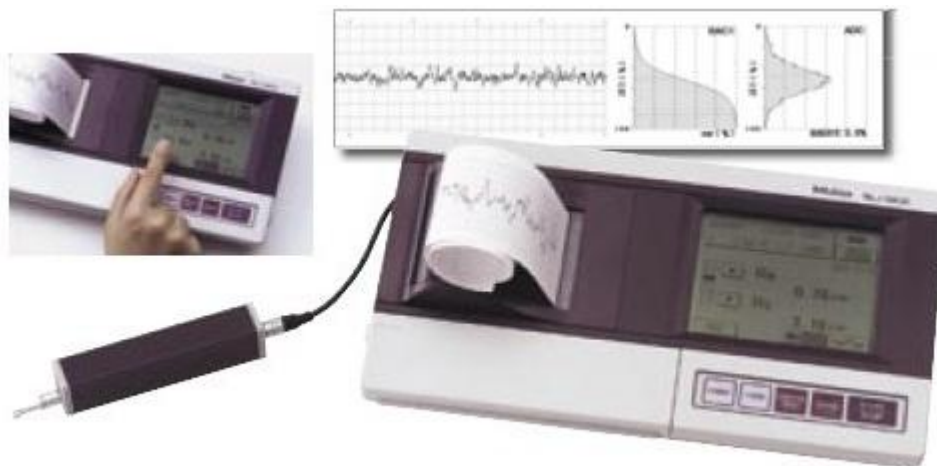
Obr. 37: Talysurf CLI 500

Tab. 10: Technická specifikace

Prostor měření D x H x V	50 x 50 x 50 mm
Délka posuvu na osách X - Y - Z	50 mm
Osové rozlišení (datová rozteč X - Y)	0,5 μm
Rozměry D x H x V	500 x 310 x 450 mm
Nosnost	10 kg
Hmotnost (základní přístroj)	55 kg
Rychlost měření	30; 15; 10; 5; 1; 0,5 mm/s
Rychlost polohování	30 mm/s max

4.6 MITUTOYO Surfrest SJ-301

Pro kontaktní měření bylo využito drsnoměru Mitutoyo Surfrest SJ-301, který je pro svou kompatibilitu používán v dílenské výrobě.



Obr. 38: Mitutoyo Surfrest SJ-301

Tab. 11: Technická specifikace

Osa X (řídící jednotka)	
Měřicí délka	12,5 mm
Měřicí rychlost	0.25, 0.5mm/s
Detektor	
Rozsah	350 μ m (-200 μ m to +150 μ m)
Měřicí síla	4mN; 0.75mN
Typ jehly	Diamant
Rozměry	
Řídící jednotka DxHxV	307 x 165 x 94mm
Pohonná jednotka DxHxV	115 x 23 x 26mm

4.7 ProScope HR mikroskop

Na snímání povrchu bylo využito ručního mikroskopu ProScope s vyměnitelnými objektivy pro různá zvětšení.



Obr. 39: Mikroskop ProScope HR

5 MĚŘENÍ HLOUBKY ŘEZU

Přestože je laserové obrábění dostatečně dlouho aplikovaná metoda úběru materiálu, doposud nebyly stanoveny konkrétní závislosti schopnosti materiálu nechat se laserovým paprskem obrábět. Je jisté, že komplikovanost této metody značně omezuje vytvoření takovéto veličiny.

5.1 Záměr a postup

Měřením hloubky drážky bychom chtěli stanovit "laserovou obrobiteľnosť" materiálu pro dostupný CO₂ laser. Termoplastické polymerní vzorky byly podrobeny laserovému účinku k vytvoření drážky jedním pracovním posuvem. Na základě množství odebraného materiálu, tedy hloubky vzniklé odpařením materiálu, bychom měli objasnit, který z těchto vzorků má nejlepší "laserovou obrobiteľnosť". Na každém materiálu byly aplikovány různé provozní podmínky. Měnili jsme nejen výkon laseru, ale i rychlost pracovního posuvu. Elastomery nebyly této analýze podrobeny. Jelikož na těchto materiálech nebyla doposud provedena žádná podobná zkouška, nebylo předpokládáno vytvoření měřitelné stopy laserového paprsku.

Jakmile byly obroběny všechny drážky, následovalo odstranění okrajového přebytku broušením. Tato operace musela být velmi jemná, aby nedošlo k nežádoucímu odstranění i původního materiálu, který slouží jako základová plocha pro odměření hloubky. Součástí mikroskopu je mikrometr, díky němuž jsme byli schopni určit hledanou hodnotu. Jednotlivá měření byly několikrát provedeny po celé délce drážky.

5.2 Vyhodnocení měření

Proměnlivými hodnotami byly parametry rychlosti pracovního posuvu a výkonu laserového zařízení. Jelikož stroj pracuje v procentech jednotlivých maximálních veličin, budou v tabulkách se získanými velikostmi hloubek zapsány pouze tyto hodnoty.

Tab. 12: Vybraná pracovní nastavení

n	1	2	3	4
Procentuální poměr rychlosti posuvu a výkonu laseru [s,P=%]	50/40	100/40	50/80	100/80
Přepočet pro SI jednotky [s=mm/s; P=W]	533/12	1066/12	533/24	1066/24

Aby nedošlo ke zbytečnému protahování práce, nejsou uvedeny hodnoty z jednotlivých měření, pouze jejich aritmetický průměr.

Tab. 13: Naměřené hloubky opracování

n	materiál	h [μm]			
		50/40	100/40	50/80	100/80
1	ABS	100	22	207	87
2	PA 6	53	18	144	36
3	PA 66	39	12	105	28
4	PC	36	9	94	25
5	PMMA	124	26	248	62
6	POM	124	42	210	95
7	PP	30	11	137	26
8	PS	78	35	237	70
9	PTFE	41	9	76	22
10	PVC	57	23	121	29

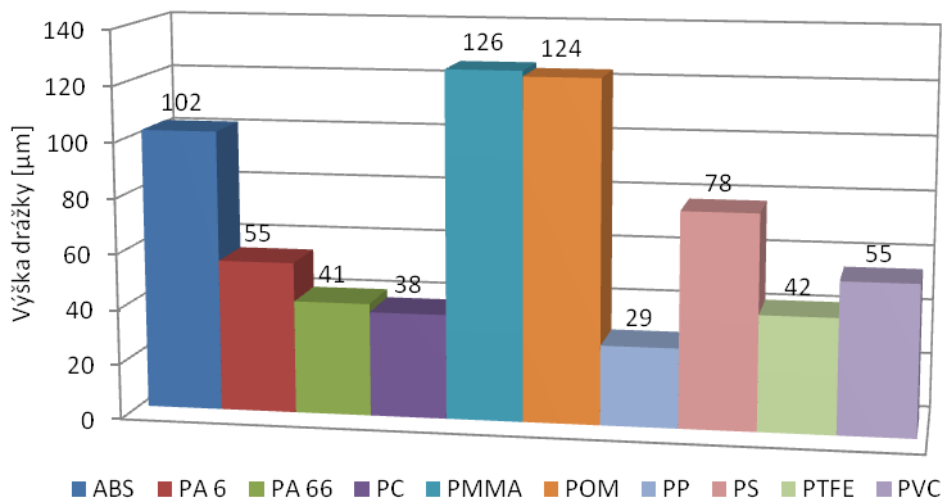
50/40 - s=533mm/s; P=12W

100/40 - s=1066mm/s; P=12W

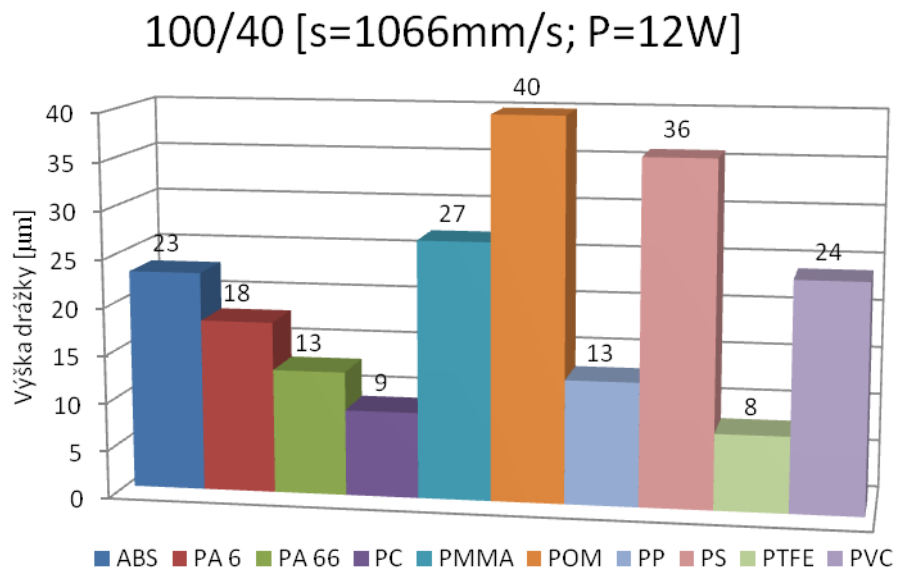
50/80 - s=533mm/s; P=24W

100/80 - s=1066mm/s; P=24W

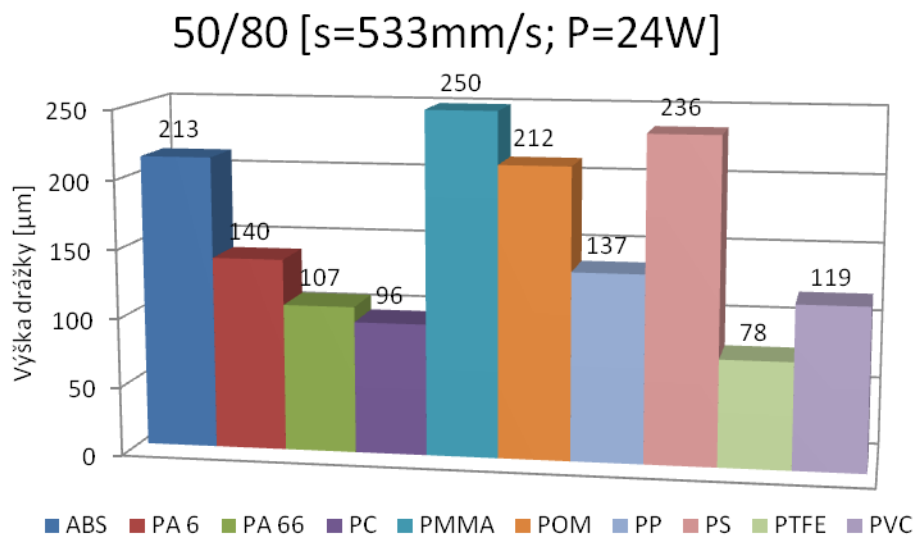
50/40 [s=533mm/s; P=12W]



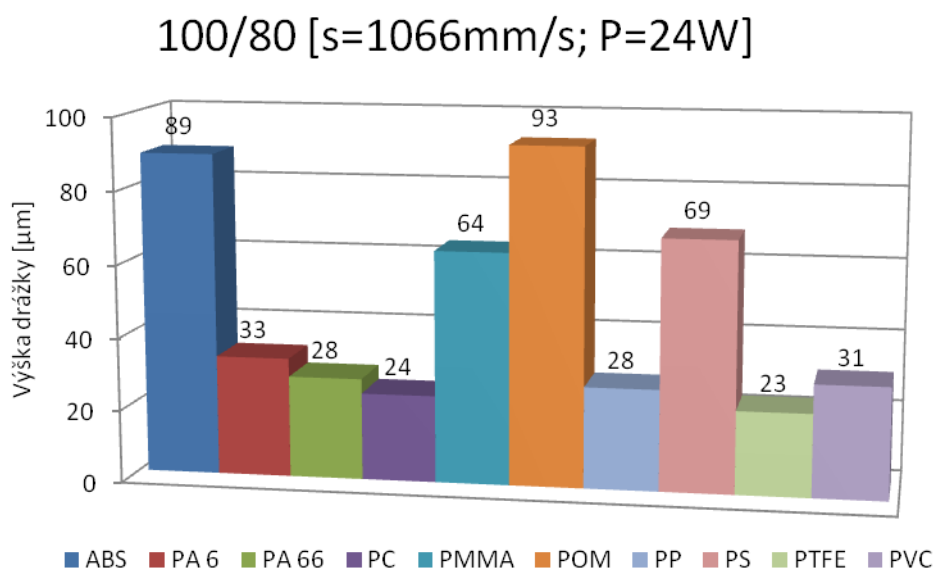
Obr. 40: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 50/40



Obr. 41: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 100/40



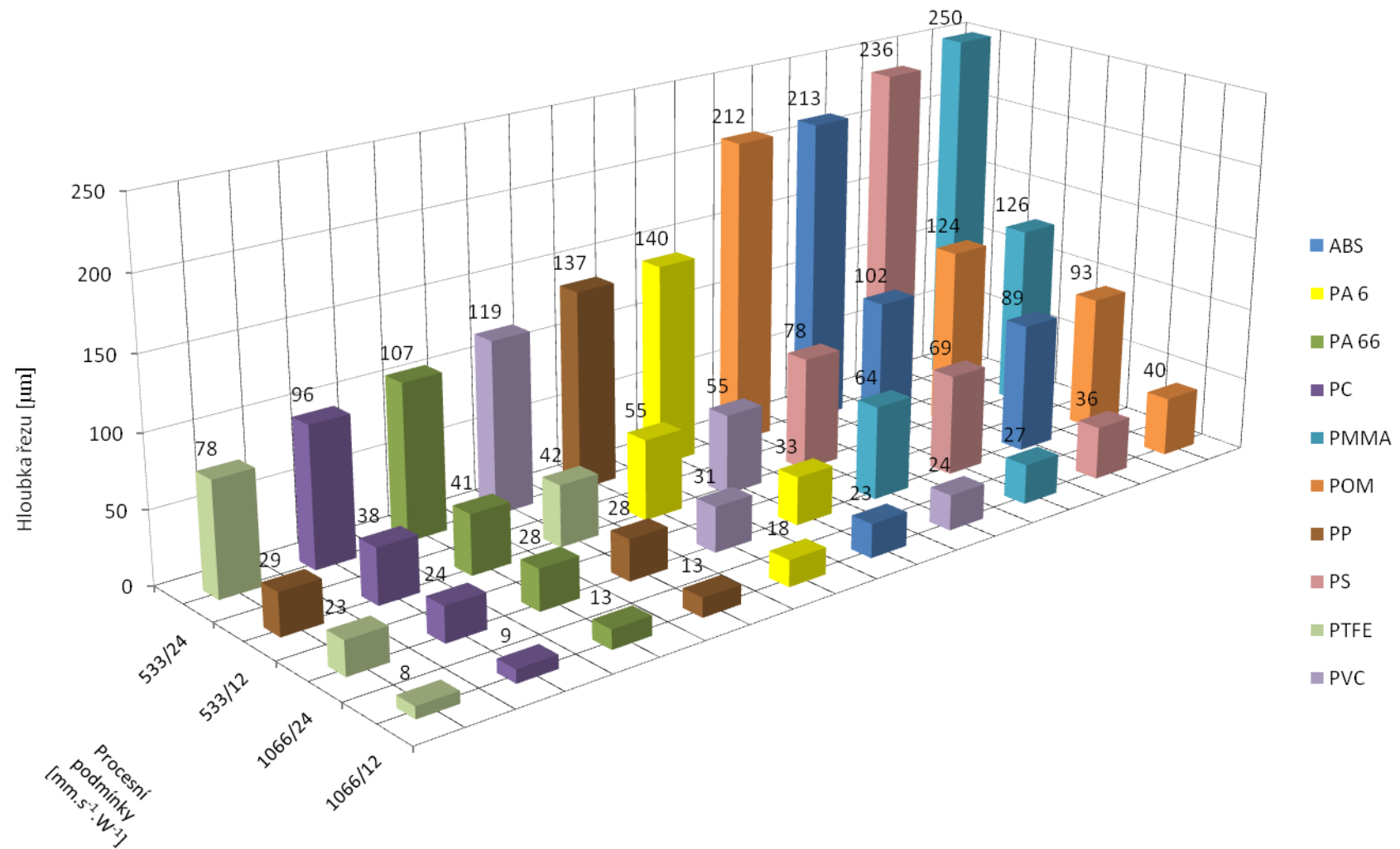
Obr. 42: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 50/80



Obr. 43: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 100/80

5.3 Diskuze výsledků

Pokud by tedy ekvivalentem "laserové obrobiteľnosti" byla hloubka řezu, pak by při pracovních podmínkách rychlosti posuvu $533\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 24W výkonu laseru se jako nejobrobiteľnější jevil materiál PMMA s hloubkou řezu $250\ \mu\text{m}$. Je to největší hloubka, které bylo dosaženo v rámci celého měření. Při snížení výkonu laseru na 12W a ponechání rychlosti posuvu, bylo rovněž největšího úběru materiálu zaznamenáno u materiálu PMMA. Pokles výkonu o 50% se projevil takřka úměrně i na vzniklé hloubce řezu, která byla $126\ \mu\text{m}$. S těmito poznatky lze tedy o materiálu PMMA tvrdit, že pokud bude vystaven delší dobu (nižší rychlosti posuvu) laserovému účinku, dojde u něj i při různé intenzitě paprsku k největšímu úběru. Jakmile zvýšíme rychlost obrábění na maximální možnou hranici, dosažené výsledky PMMA se zhoršují a největších úběrů dosahujeme u materiálu POM. Vytvořená hloubka získaná obráběním výkonem 12W činí $40\ \mu\text{m}$ a při výkonu 24W je pak $93\ \mu\text{m}$. Naopak nejhorších výsledků dosahovaly materiály PTFE, PC, PA 66 a PP. Nejen že množství odebraného materiálu je mizivé, ale i při pouhém pozorování okem je patrné, že u některých z těchto vzorků bylo dosaženo velmi nízké jakosti povrchu nebo dna obroběných ploch vykazovaly spálená místa. Výsledky tohoto měření byla objasněna skutečnost, že pokud bychom chtěli laserově obrábět v co nejkratším čase, nejvhodnější je materiál POM. Jestliže ale snížíme rychlost posuvu, pak i při sníženém výkonu laseru lze nejvýhodněji obrábět materiál PMMA.



Obr. 44: Celkové srovnání naměřených hodnot

6 DRSNOST OBROBENÉ PLOCHY

Množství technických materiálů je neskutečně vysoké a každým dnem narůstá. Současně stoupají nároky na jejich opracování. Držet krok s požadavky dokáže stále více se uplatňující metoda laserového obrábění. Jedním z hlavních faktorů dobré obrobitelnosti je jakost povrchu, jež je součtem různých faktorů ať už ze strany obráběcího "nástroje" nebo materiálu obrobku.

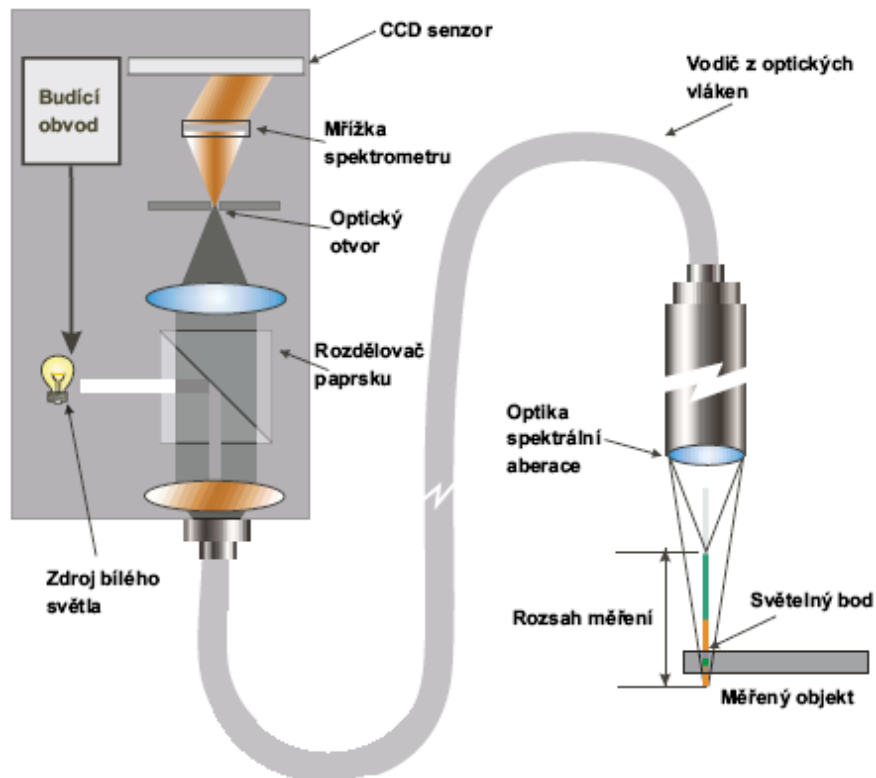
6.1 Záměr a postup

Měřením drsnosti povrchu plochy, po jejím vystavení účinku laserového paprsku, bychom chtěli určit, který z materiálů a při kterých pracovních podmínkách dosahujeme jakosti vhodné mikro-obrábění. Vyhodnocení zkoušky probíhalo na přístroji Talysurf CLI 500 využívající konfokální sondy pro bezkontaktní snímání povrchu a na přístroji Mitutoyo Surftest SJ-301 pro kontaktní měření.

V rámci výzkumu budeme sledovat a vyhodnocovat parametry drsnosti povrchu Ra, Rt, Rz, Rmr a křivku nosného podílu (Abbott - Firestenova) u všech dostupných materiálů, tedy i včetně elastomerů. Dále je pak povrch u vybraného vzorku pro objasnění skutečného vzhledu znázorněn ve 3D.

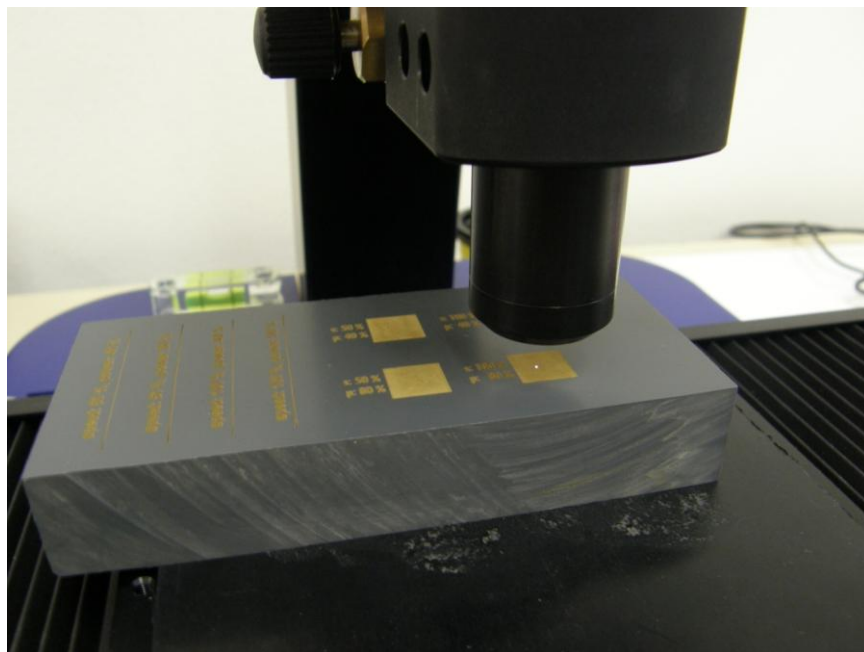
6.1.1 Bezkontaktní měření

Přístroj rozkládá bílé světlo a optikou se spektrální aberací (vada, zhoršení kvality obrazu) jej směřuje na kontrolovaný povrch. Optika rozloží světlo jen podle vlnových délek a v každém bodě 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.[30]



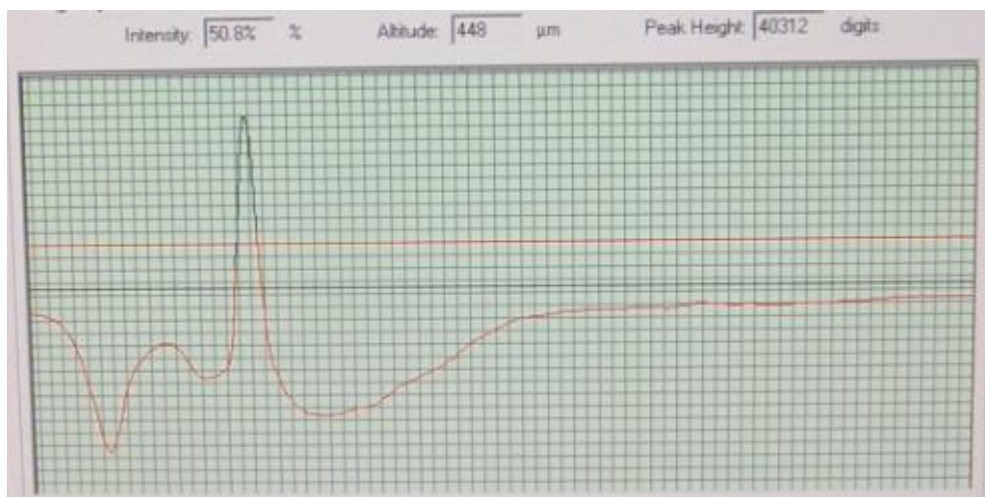
Obr. 45: Principiální schéma snímání povrchu konfokální sondou [30]

Prvotním měřením jsme určovali povrchovou drsnost. Po očištění měřených ploch byl kontrolovaný vzorek položen na stůl zajišťující horizontální posuv X-Y. Po automatickém vycentrování a načtení nulových souřadnic byl nastaven snímač do polohy, která zajistila správnou fokusaci paprsku.



Obr. 46: Detail fokusace paprsku nad měřenou plochou

Nutným předpokladem správného měření je odrazivost. Senzor snímá povrch a vyobrazuje vhodnou polohu měřicí hlavy nad povrchem na stupnici přístroje. Dostačující mírou intenzity odrazu je 20%, naší snahou ale bylo u všech materiálů dosahovat hodnot oscilujících kolem 50%. Pokud by spektrální křivka vykazovala nulové hodnoty, zobrazena by byla pouze rovná čára. Po nastavení podmínek, za kterých probíhá samotné měření mohl být program pro vyhodnocení spuštěn.

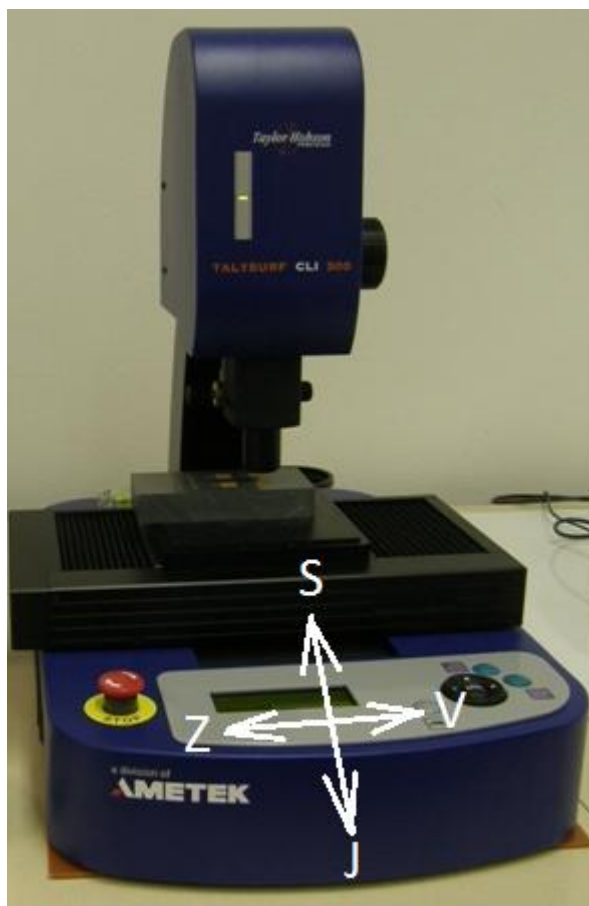


Obr. 47: Grafické znázornění odrazivosti kontrolovaného materiálu

Tab. 14: Parametry měření 2D

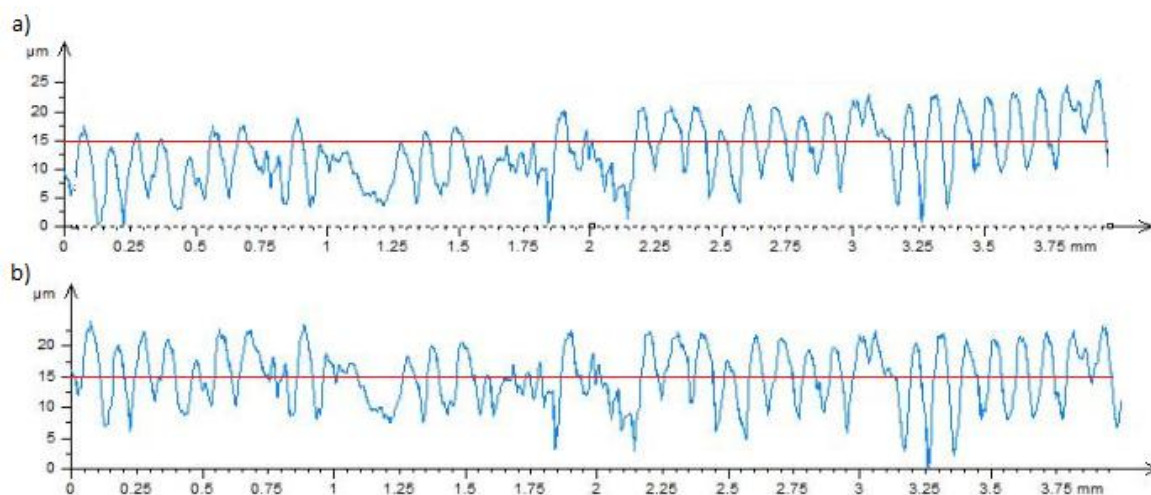
Vyhodnocovaná délka	4 mm
Základní délka	0,8 mm
Celkem měřeno délek	5
Level	1 μm
Rmr faktor	8 μm

Měření probíhalo kolmo na směr drážek vzniklých laserovým obráběním, v programu definováno „od severu k jihu“. Tento orientační systém je zaveden díky anglickému výrobcí Taylor Hobson. Pokud stojíme čelem k přístroji tak, aby před námi byl měřicí prostor, je sever ve směru pohledu a zbytek již je podle tradičního zeměpisného uspořádání.



Obr. 48: Znázornění orientace přístroje

Výsledné měření nelze ihned zpracovat, jelikož křivky musí projít vyrovnáním přímosti. Pro tento účel využíváme metody nejmenších čtverců.



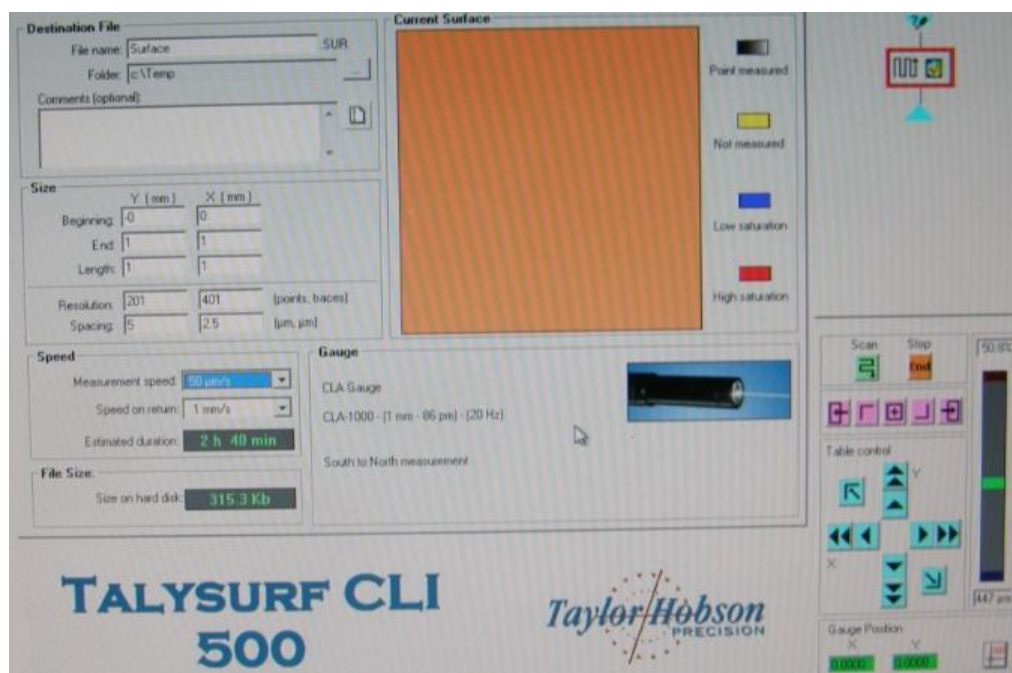
Obr. 49: Profil před (a) a po (b) aplikaci metody pro vyrovnání přímosti

Na Obr. 49 je znázorněno vyrovnaní stoupajícího trendu původního profilu nerovností povrchu. Musíme ovšem připomenout, že se jedná jen vyrovnaní přímosti ne však o odstranění vlnitosti.

Pro zpracování prostorové i plošné charakteristiky získaných dat z bezdotykového měření je využíván program Talysurf. Ten umožňuje sledovat snímaný povrch s různým úhlem pohledu, zvětšením, barevným rozlišením atd. Program využívá pro prostorové hodnocení povrchu parametry popisující materiálový poměr povrchu, parametry vztažené k rozmístění nerovností a v neposlední řadě parametry amplitudové a objemové. Pracovní prostředí je přizpůsobeno tak, aby veškeré nastavení bylo přehledné a jednoduché. Postup je prakticky stejný jako u 2D, jen s nepatrnými rozdíly způsobu měření. [31]

Tab. 15: Parametry měření 3D

Vyhodnocovaná plocha	1 mm ²
Řádkování	X 2,5 μm
	Y 5 μm
Měřicí rychlost	50 μm/s
Rychlost návratu	1 mm/s



Obr. 50: Pracovní prostředí programu Talysurf

6.1.2 Kontaktní měření

Nejprve musel být vybrán snímací hrot určený pro polymerní materiály. Nastavení polohy snímače probíhalo tak, aby jeho základna byla v přibližné výšce s měřeným povrchem.

Tab. 16: Parametry měření

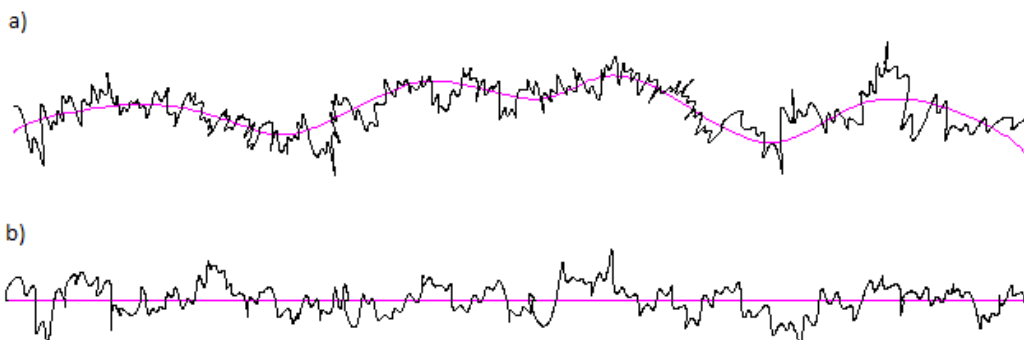
Vyhodnocovaná délka	4 mm
Základní délka	0,8 mm
Měřicí rychlost	0,5 mm/s
Rmr faktor	8 μm

Po změření bylo možné na displeji odečítat hledané veličiny.

6.1.3 Teorie drsnosti povrchu

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Skutečný profil povrchu definujeme jako profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny. Do drsnosti se vady povrchu, jako jsou náhodné nepravidelně se vyskytující nerovnosti opakující ojediněle (vady materiálu, trhlinky, důlky), podle ČSN EN ISO 8785 nesmí zahrnovat. Výsledná hodnota měření je ovlivněna samotným principem snímáním (poloměr hrotu, aberace, atd.).

Nefiltrovaný nebo-li primární povrch je skutečný profil povrchu zjištěný měřicím přístrojem. Filtrovaný profil drsnosti se získá z primárního profilu potlačením vlnových složek. Vyhodnocovaný parametr označujeme jako parametr R a změřenou délku jako vyhodnocovanou délku l.

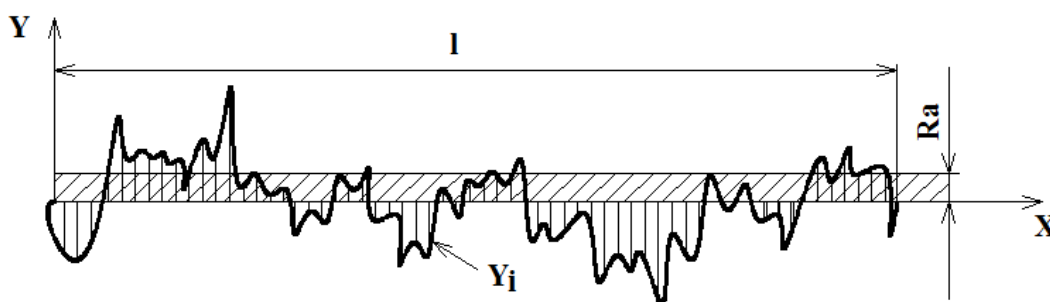


Obr. 51: a) primární profil povrchu s nefiltrovanou střední čarou, b) filtrovaná střední čára profilu drsnosti

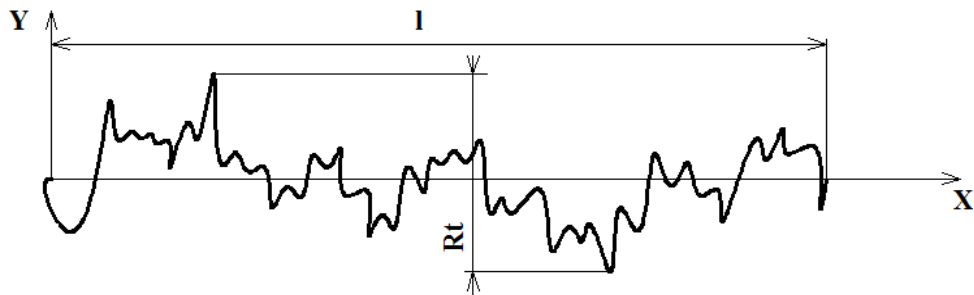
Celý proces odstranění vlnitosti a dělení jednotlivých amplitud různými algoritmy pro finální stanovení drsnosti, je pro naši potřebu nepodstatný, ale jelikož byla vzpomenu ta metoda nejmenších čtverců, jen okrajově ji připomeneme. Je to statistická metoda určená pro hledání zjednodušeného řešení. Umožňuje nám hledat přibližnou funkci pro empiricky získané hodnoty. Výsledek lze, jako v našem případě, použít pro systém regulace. Konečné řešení má nejmenší součet druhých mocnin nalezených chyb, nebo-li součet čtverců odchylek je nejmenší. Dále postupujeme aplikací různých filtrů pro odstranění ostrých vrcholů, propadlin, atd.

Tab. 17: Charakteristiky drsnosti ČSN ISO EN 4289:1999

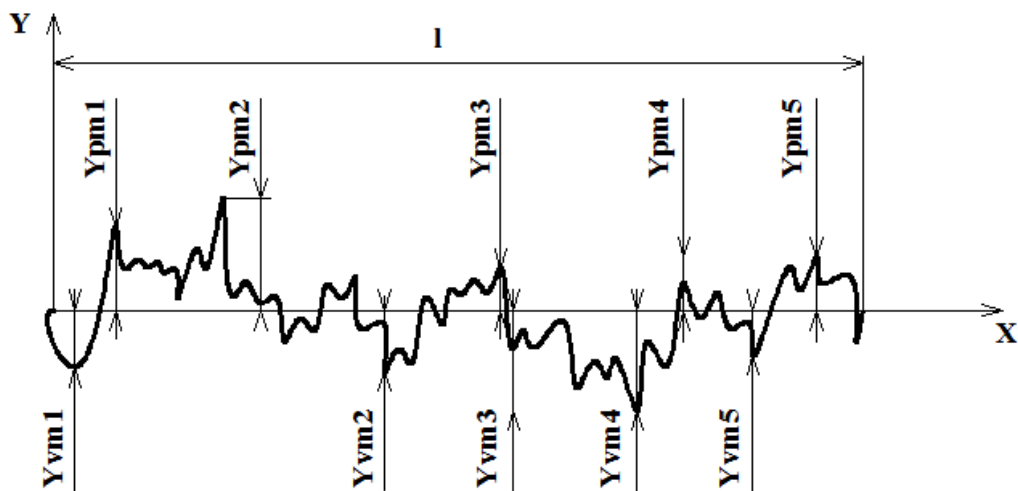
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu. Aritmetický průměr absolutních souřadnic v rozsahu základní délky.
Rmr(c)	Materiálový poměr povrchu - nosný podíl.
RSm	Průměrná šířka prvku profilu. Jedná se charakteristiku drsnosti v podélné směru povrchu.
Rt	Celková výška profilu drsnosti.
Rz_i	Aritmetická hloubka profilu. Aritmetický průměr nejvyšších výšek profilu v jednotlivých základních délkách vyhodnocované délky, standardně obsahující 5 základních délek.
Rz_{lmax}	Maximální prohlubeň profilu drsnosti. Největších 5 hodnot Rz _i z pěti základních délek.
Rz	Největší výška profilu.



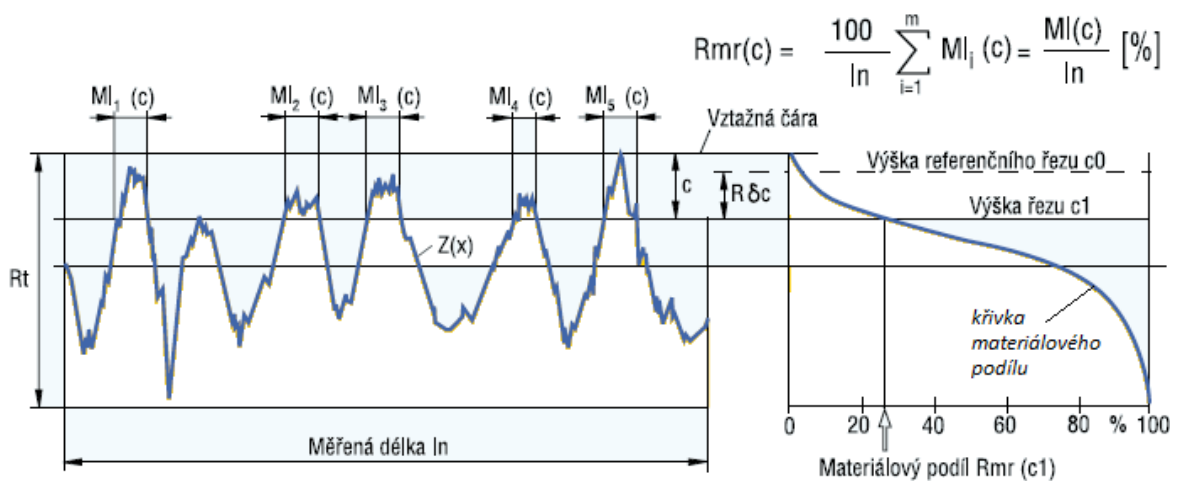
Obr. 52: Stanovení Ra



Obr. 53: Stanovení Rt



Obr. 54: Stanovení Rz



Obr. 55: Stanovení nosné křivky [26]

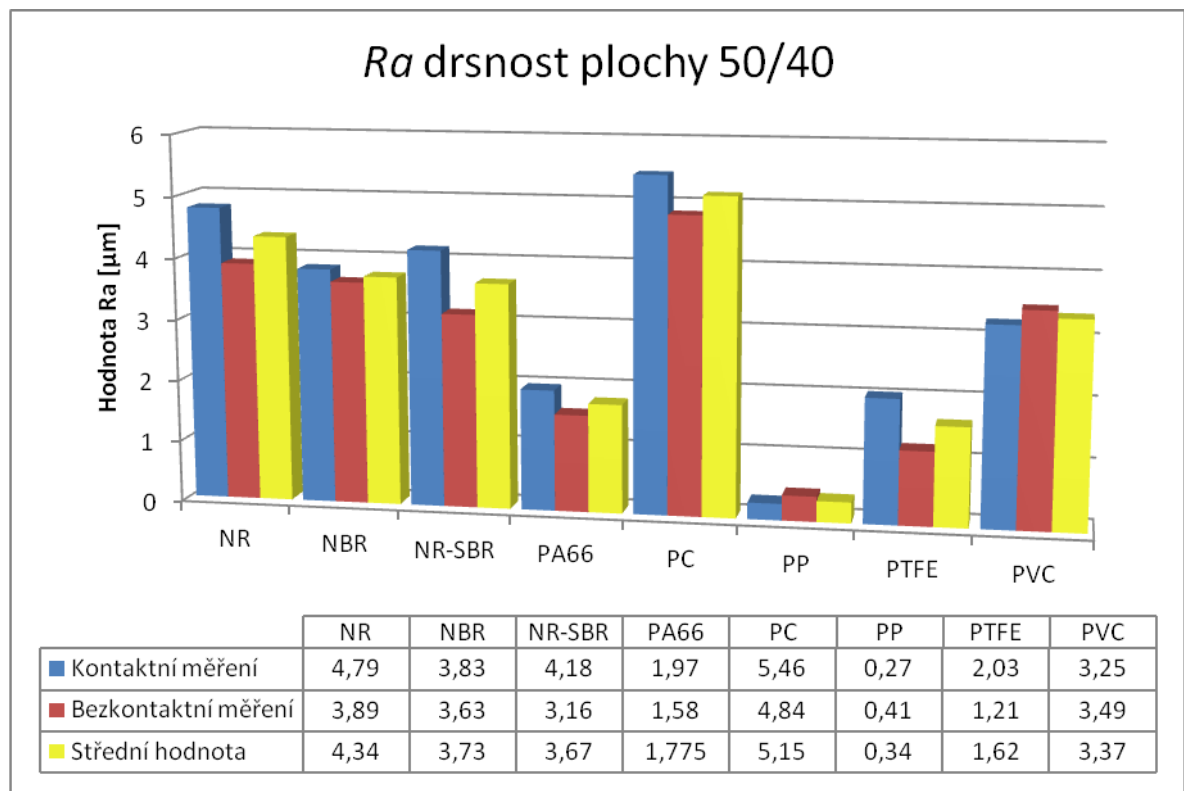
Nosná délka profilu je součet délek úseků, vytvořených v určité poloze řezu v materiálu čarou rovnoběžnou se střední čarou profilu v rozsahu základní délky. Nosná křivka profilu je grafické znázornění závislosti hodnot relativní nosné délky profilu v závislosti na poloze řezu profilu. [27]

6.2 Vyhodnocení měření

Kompletní rozbor, plošné i prostorové zobrazení, byl proveden z důvodu časové náročnosti zkoušky pouze u materiálu PVC. K vyhodnocení typografie zbývajících materiálů byla zvolena oblast, obrobená při nejnižším pracovním posuvu a nejmenším výkonu laseru. Jiné plochy vykazovaly buď značné poškození povrchu nebo při malém úběru materiálu byly ještě viditelné stopy po opracování samotného tvaru těla vzorku a velikost drsnosti by tudíž byla ovlivněna ještě jiným obráběním, jež je pro porovnání povrchů ovlivněných pouze laserovým paprskem nepřijatelné. Vzorek vyrobený z PMMA je takových rozměrů, že jej na přístroji Talysurf CLI 500 nebylo možné změřit, proto ve výsledcích není uveden.

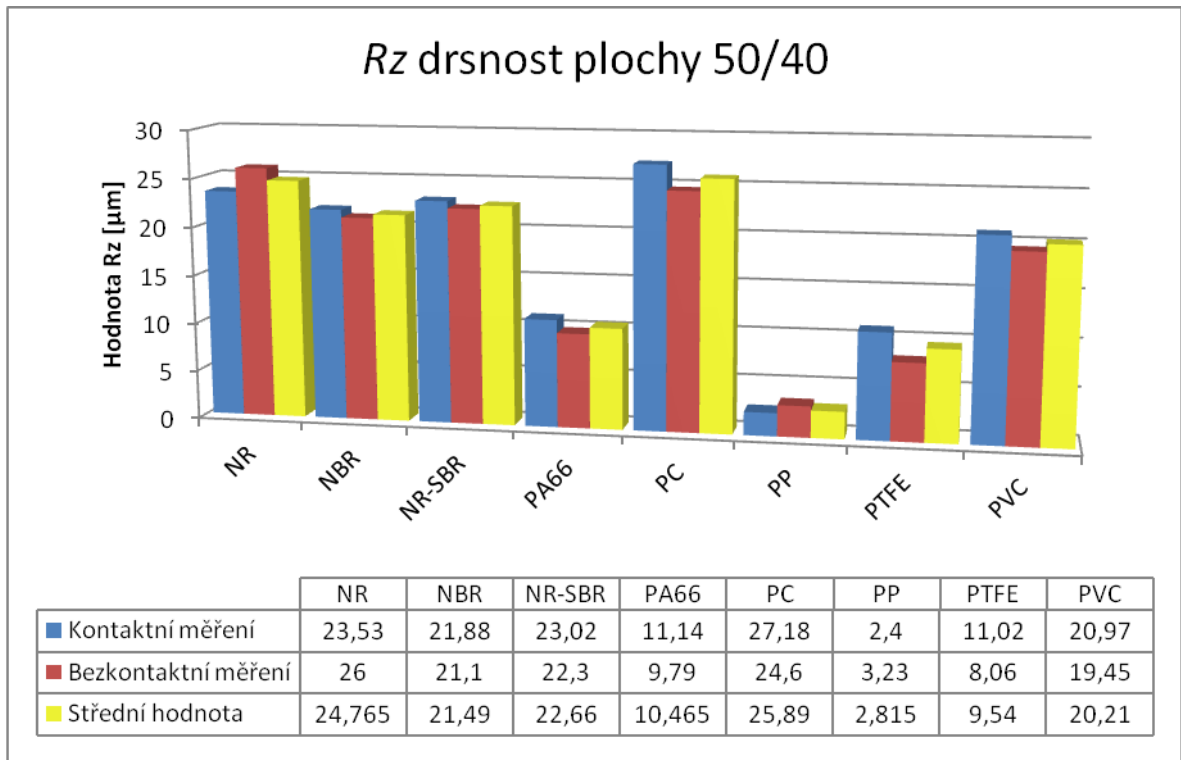
Analýzy byly provedeny na základě údajů, získaných ze dvou měřících technik založených na bezkontaktním a kontaktním snímáním povrchu. Pro stejné vzorky byly aplikovány stejné měřící podmínky, aby bylo možné výsledky vzájemně porovnávat. Ve výsledcích bude zobrazena vlnitost a nerovnost povrchu na délce 4 mm, z níž byly získané údaje filtrovány 0,8 μ m cut-off filtrem podle doporučených hodnot.

6.2.1 Průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a



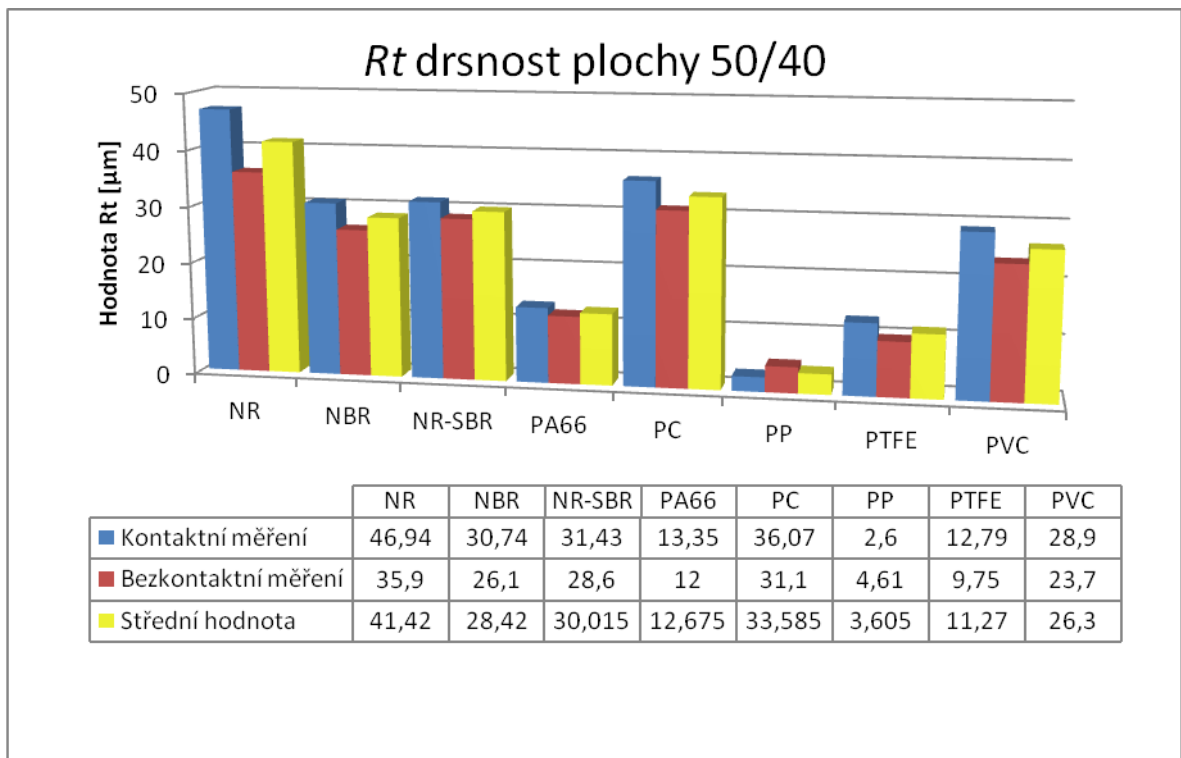
Obr. 56: R_a plochy 50/40 [$s=533$ mm/s; $P=12$ W]

6.2.2 Průměrná aritmetická hloubka povrchu Rz



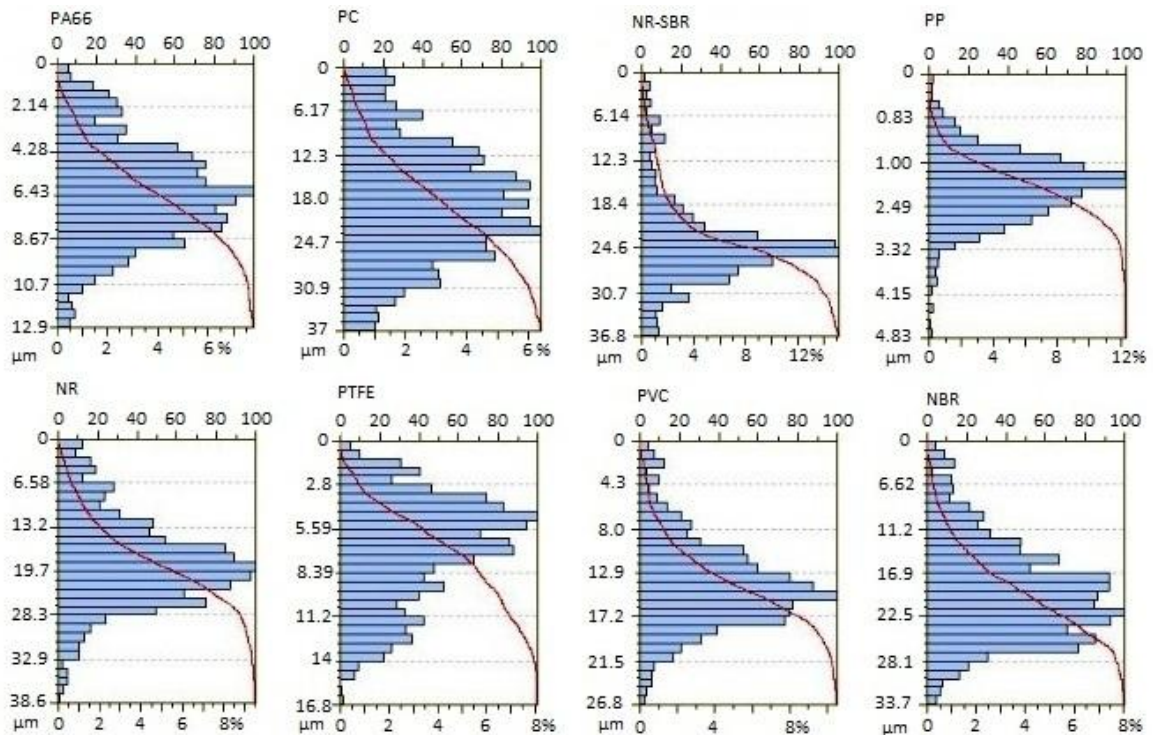
Obr. 57: Rz plochy 50/40 [$s=533 \text{ mm/s}$; $P=12\text{W}$]

6.2.3 Celková výška profilu drsnosti Rt



Obr. 58: Rt plochy 50/40 [$s=533\text{mm/s}$; $P12\text{W}$]

6.2.4 Křivky nosného podílu

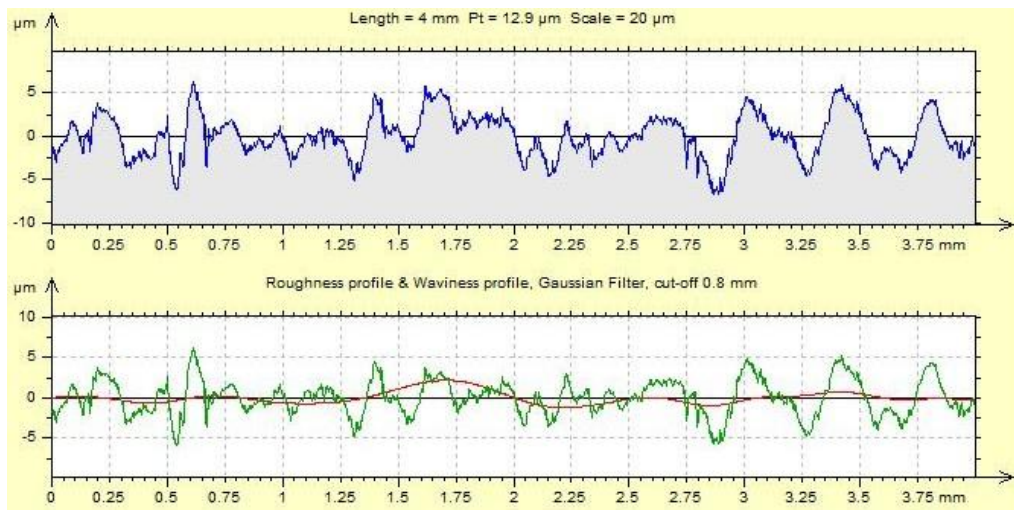


Obr. 59: Abbott - Firestenovy křivky (křivka nosného podílu)

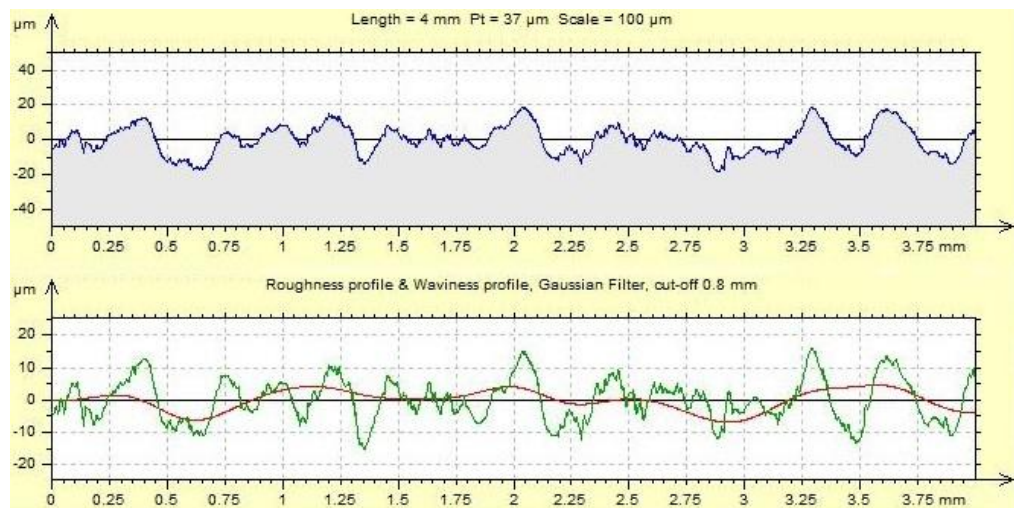
V grafech můžeme na svislé ose odečítat výšku jednotlivých nerovností v μm a na spodní vodorovné ose je vyneseno jejich procentuální výskyt. Tyto histogramy nám poukazují na to, kolik procent určité výškové nerovnosti se na měřené délce vyskytuje. Nosnou křivkou pak odečítáme, kolika procenty se materiál v dané hloubce vyskytuje. Ty mají u jednotlivých materiálů největší vypovídající hodnotu o stavu a rozložení nerovností. Pokusme se nyní definovat povrch podle Abbott-Firestonovy křivky. V místě nejstrmějšího spádu křivky má materiál nejmenší nosný podíl na měřené délce a naopak čím má křivka plošší průběh, tím více materiálu se v dané hloubce vyskytuje.

Současně s vyhodnocením analyzovaných hodnot Ra, Rz, Rt a nosné křivky systém Taly-map vykresluje jednotlivé profily povrchu podle zadaných hodnot. Současně je zobrazena červenou barvou vlnitost a zelenou barvou nerovnost povrchu všech řezů.

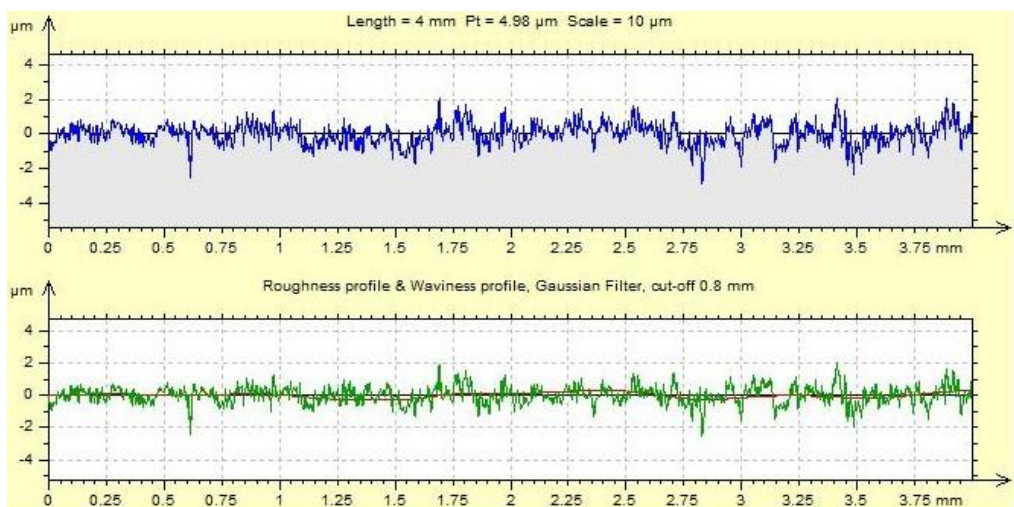
6.2.5 Profil povrchu



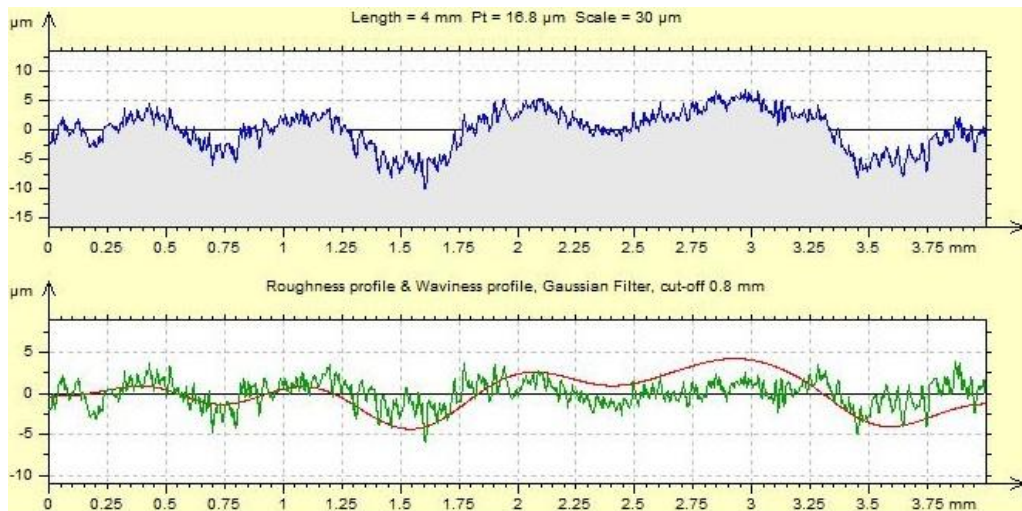
Obr. 60: PA 66



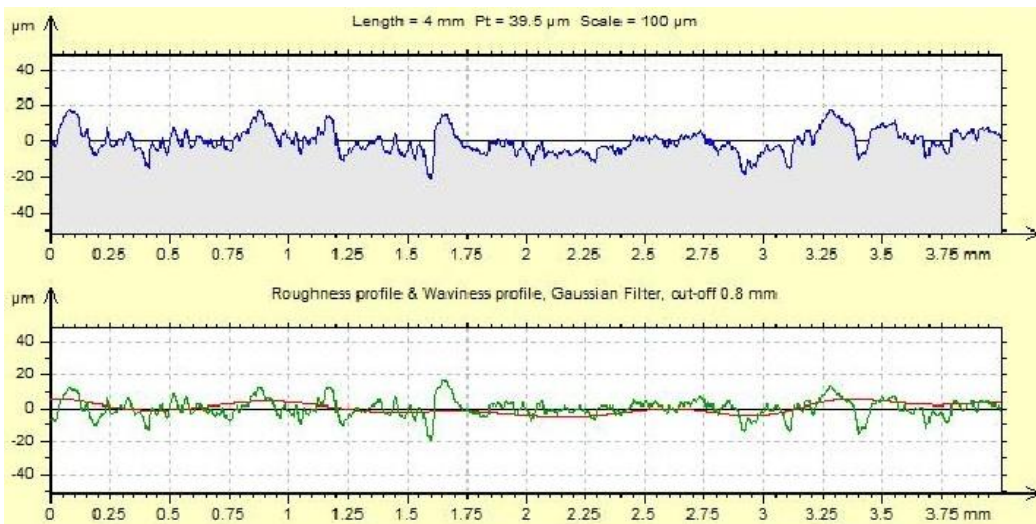
Obr. 61: PC



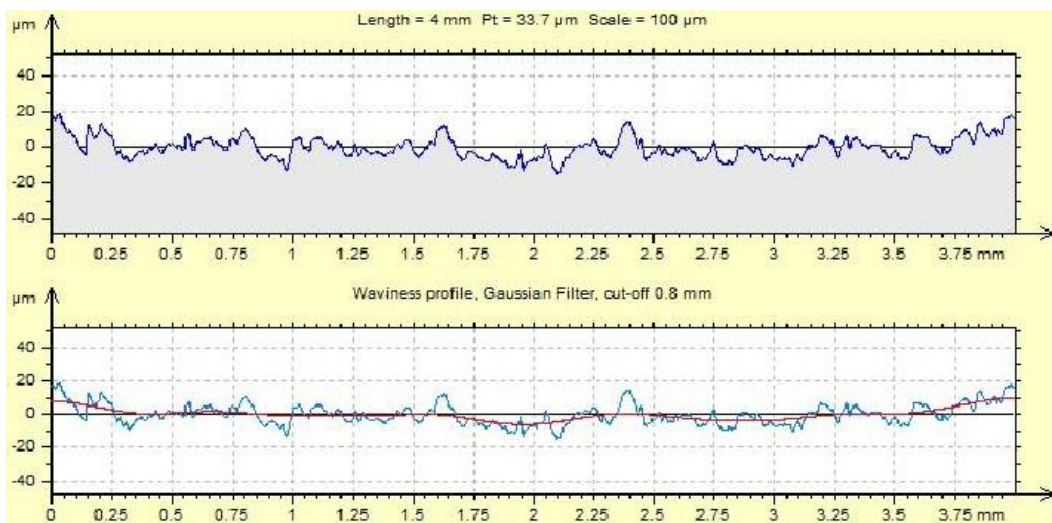
Obr. 62: PP



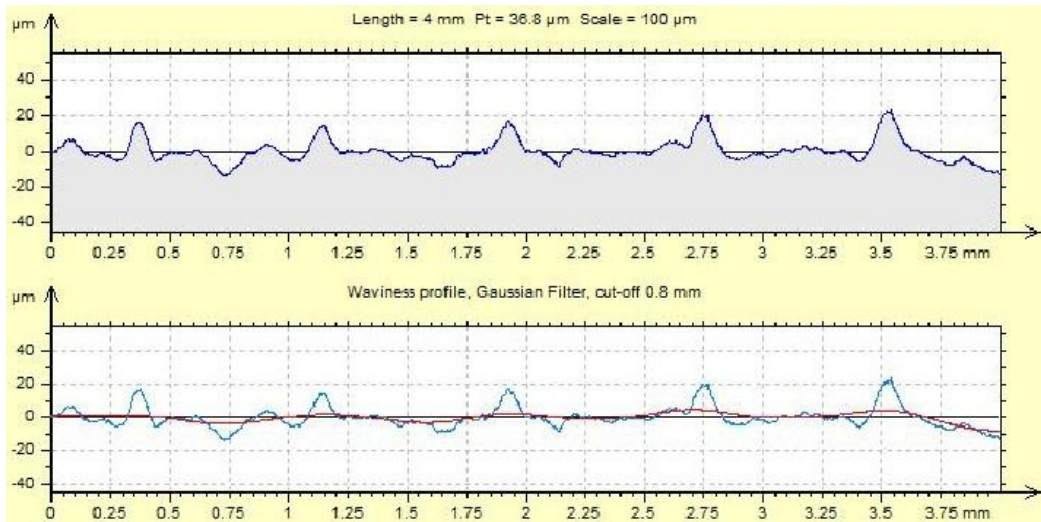
Obr. 63: PTFE



Obr. 64: NR

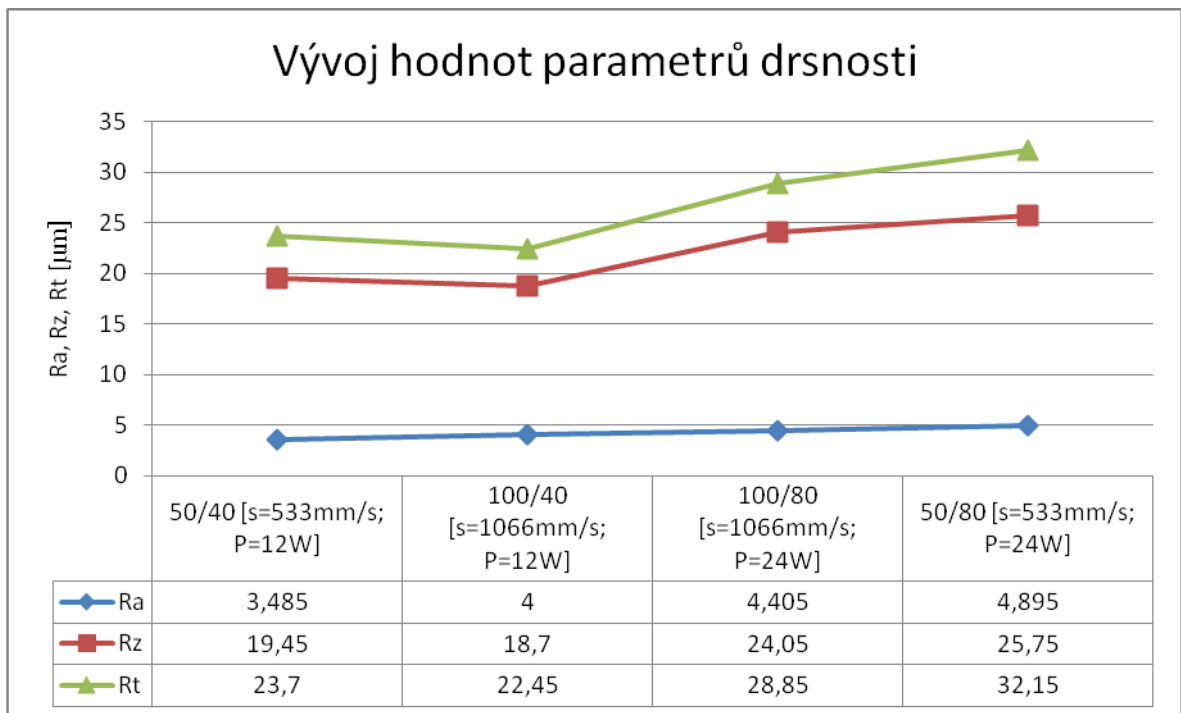


Obr. 65: NBR

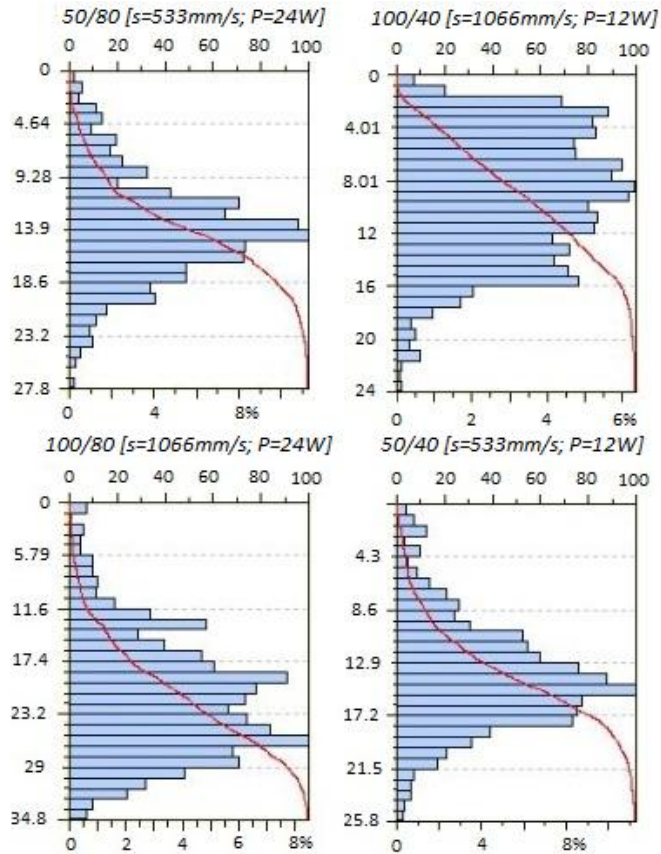


Obr. 66 NR-SBR

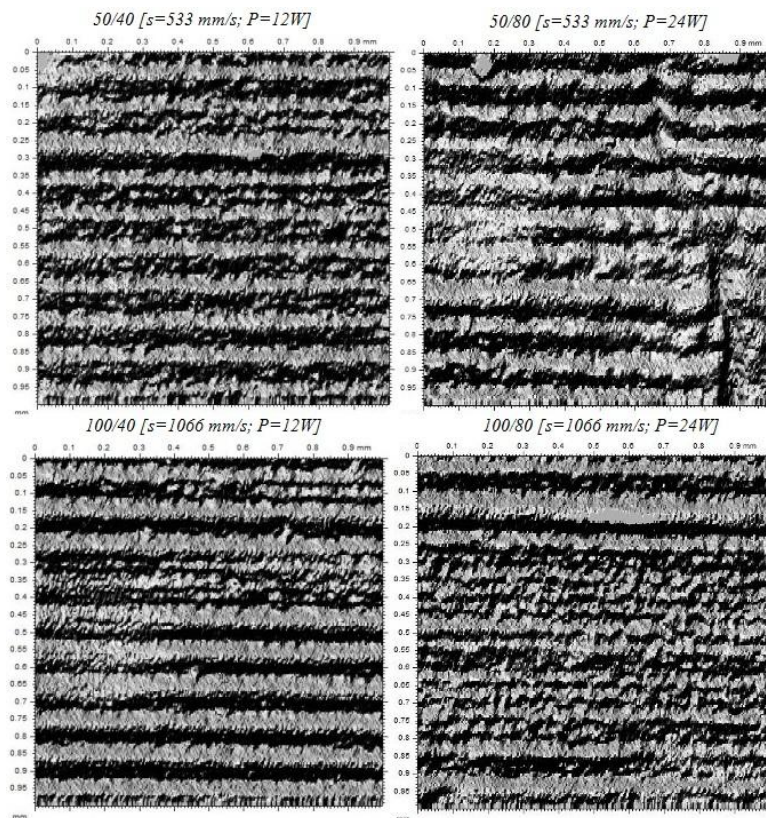
6.2.6 Analýza materiálu PVC



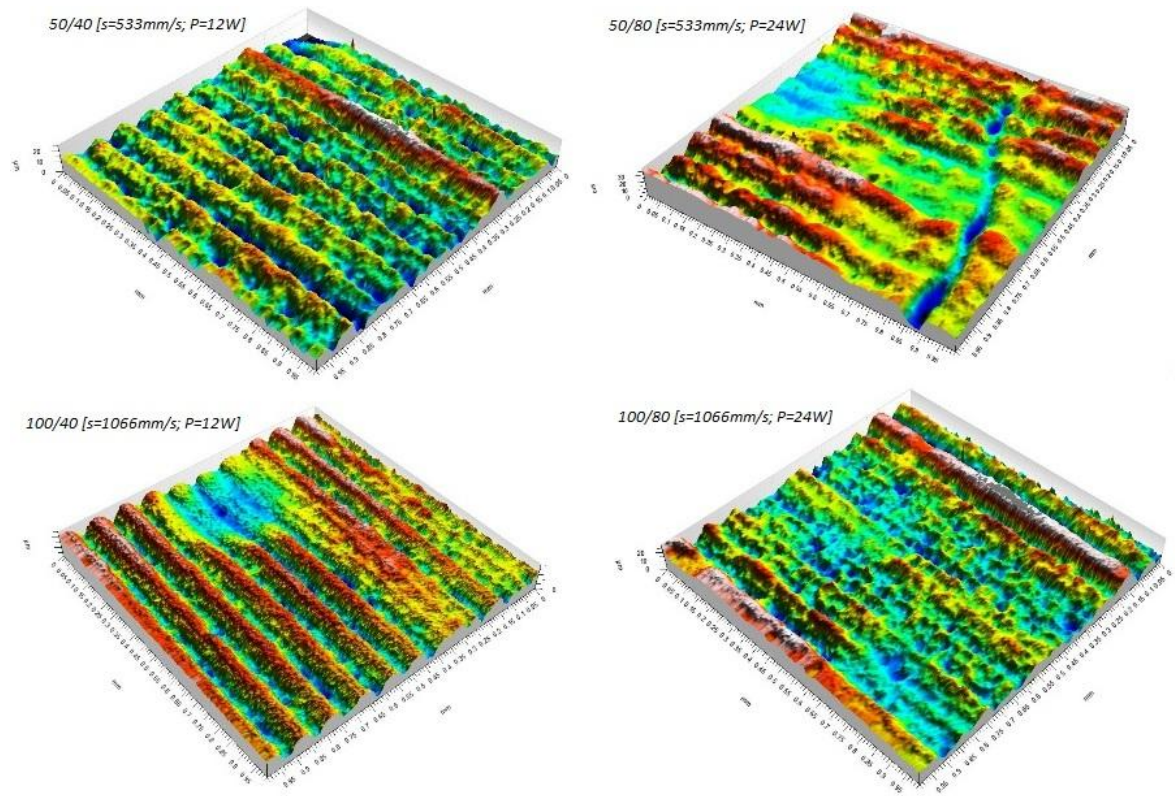
Obr. 67: Vývoj parametrů drsnosti materiálu PVC



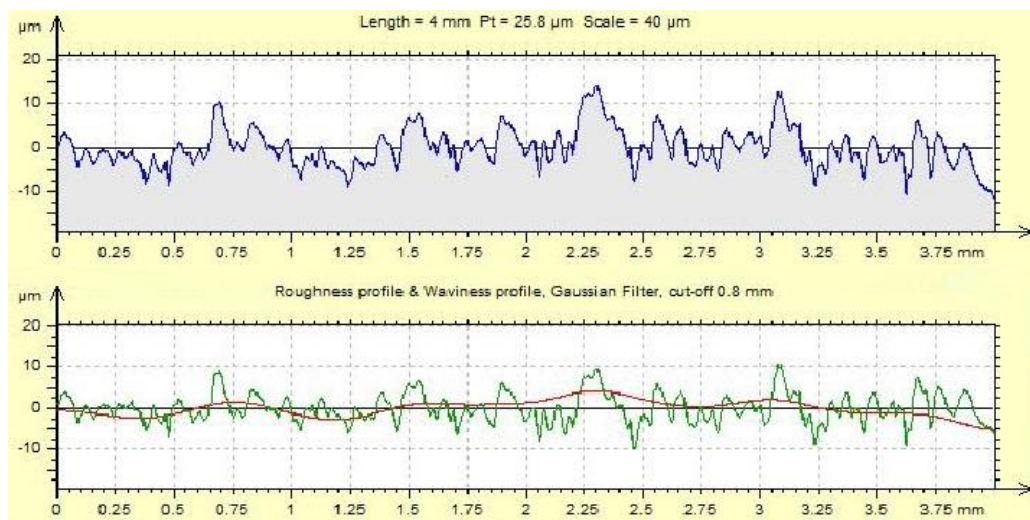
Obr. 68: Abbott - Firestonovy křivky pro PVC



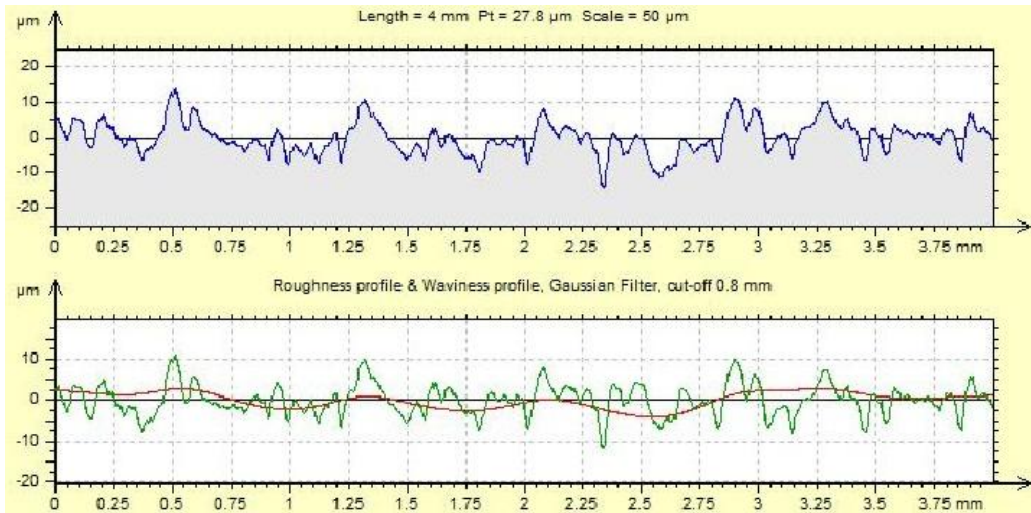
Obr. 69: 2D povrch PVC získaný přístrojem Talysurf



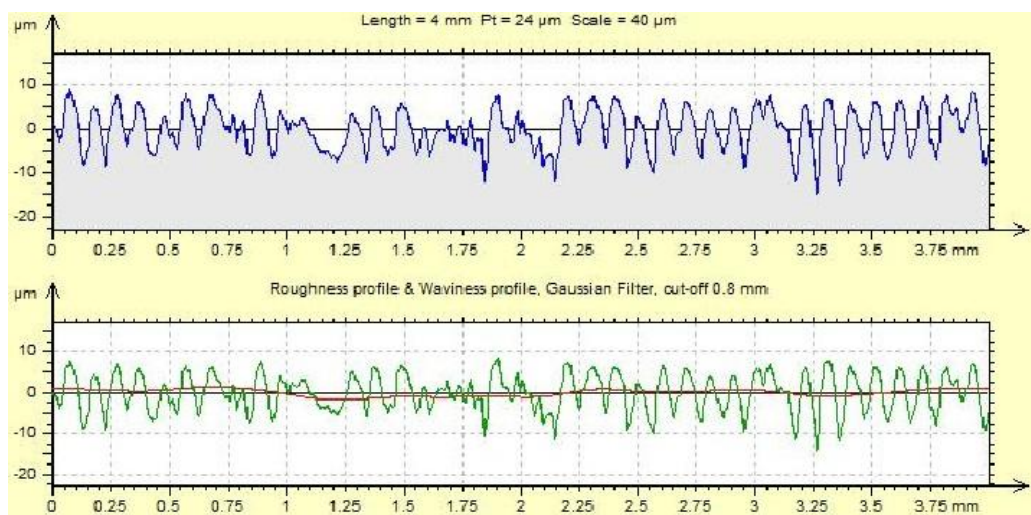
Obr. 70: 3D povrch PVC získaný přístrojem Talysurf



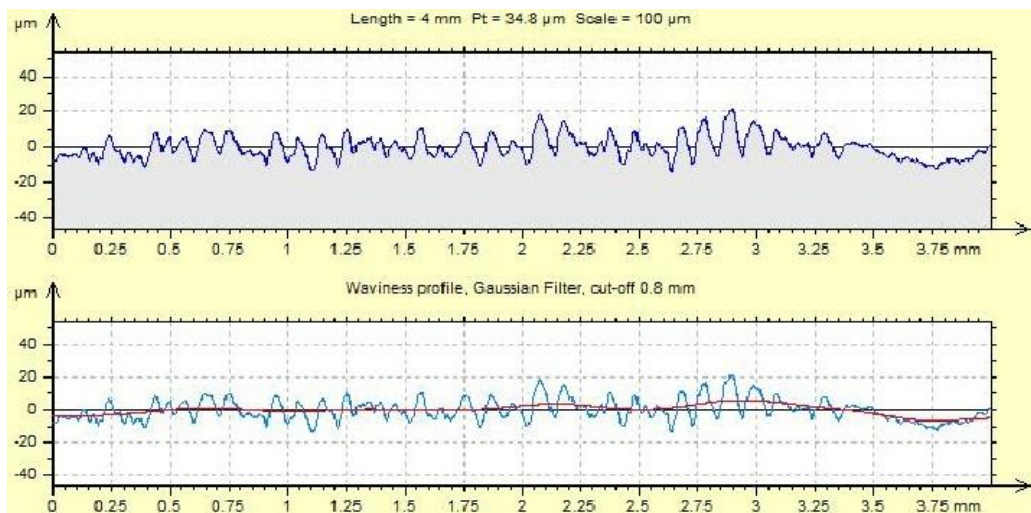
Obr. 71: PVC 50/40 [s=533mm/s; P=12W]



Obr. 72: PVC 50/80 [$s=533\text{mm/s}$; $P=24\text{W}$]



Obr. 73: PVC 100/40 [$s=1066\text{mm/s}$; $P=12\text{W}$]



Obr. 74: PVC 100/80 [$s=1066\text{mm/s}$; $P=24\text{W}$]

6.3 Diskuze výsledků

6.3.1 Průměrná aritmetická úchylka povrchu R_a

Výsledky získané pro plochu obrobenou rychlostí posuvu 533 mm/s a výkonem 12W jsou uvedeny na *Obr. 56*. Nejvyšší nerovnosti byly naměřeny u materiálu PC ve výši 5,01 μm bezkontaktním a 4,84 μm kontaktním měřením. Největší jakost povrchu, 0,27 μm kontaktním a 0,41 μm bezkontaktním způsobem, byla zjištěna u vzorku z PP. Ten vykazoval i maximální odchylky od své střední hodnoty mezi jednotlivými metodami měření pohybující se okolo 20%.

6.3.2 Střední aritmetická hloubka povrchu R_z

Rozdílnost mezi způsoby získání údajů drsnosti R_z není tak výrazný oproti výsledkům měření drsnosti R_a . S výjimkou největší odchylky projevující se u nejnižších hodnot polypropylenového vzorku, 1,85 μm kontaktně a 3,23 μm bezkontaktně, jsou rozdíly od střední hodnoty do 10%. Největší výška nerovnosti povrchu byla kontaktním měřením zjištěna u polykarbonátového vzorku a to 27,18 μm . Bezkontaktním měřením se největší nerovnosti (26 μm) projevily u přírodního kaučuku.

6.3.3 Celková výška profilu drsnosti R_t

Nejnižší hodnoty výšky profilu drsnosti dosahuje polypropylenový vzorek. Rozdíl mezi minimem a maximem výčnělků činil 2,6 μm kontaktním a 4,61 μm bezkontaktním měřením. Jemnost povrchu vysoce převyšuje ostatní materiály. Druhých nejlepších výsledků dosahoval materiál PTFE s hodnotou 12,79 μm kontaktním a 9,75 μm kontaktním měřením. Odchylky měření mezi metodami opět vykazovala jemná struktura PP vzorku a to téměř 30%.

6.3.4 Křivky nosného podílu

Podle faktorů, jimiž jsme si definovaly odečítání stavu povrchu podle nosných křivek nejlepších výsledků dosahuje polypropylen. Svislá stupnice má malý rozptyl a křivka má velmi výrazná svislá i horizontální plata. O polypropyleny lze tedy říci, že má jen velmi malé nerovnosti a většina materiálu se soustřeďuje v jedné výšce nerovností. Tudíž je tento povrch, po stránce jakosti, velice kvalitním. Nejhorší povrch je u polykarbonátového vzorku. Křivka nemá tendenci zplošťovat se, nýbrž téměř po celou dobu rovnoměrně klesá.

Materiál se nekonzcentruje v jedné výšce a vzorek má značnou maximální výšku nerovnosti.

6.3.5 Profil povrchu

Snímky jasně poukazují na kvalitu povrchu polypropylenového vzorku. Křivka vlnitosti téměř kopíruje vodorovnou osu. Výchyly jsou minimální a většina píku z křivky drsnosti nepřesahují hodnotu $\pm 2\mu$. V podstatě jemný povrch PTFE je doprovázen přílišnou nerovností, proto výsledný rozptyl minim a maxim je vysoký. Nejhrubší povrch se jeví u polykarbonátového a přírodního kaučuku.

6.3.6 Analýza materiálu PVC

Pouze u tohoto materiálu byly provedeny zkoušky všech obráběných ploch. Nejlepších vlastností povrchu dosahovala plocha opracovaná parametry $s=533\text{mm/s}$ a $P=12\text{W}$. Výsledek jasně poukazuje na fakt, že jen pouze doba interakce paprsku a materiálu nemá konečný vliv na jakost povrchu. Přestože byl materiál v kontaktu dvakrát delší dobu než při nastavení $s=1066\text{mm/s}$ a $P=12\text{W}$, hodnota $3,48\ \mu\text{m}$ střední aritmetické úchyly byla nejnižší. Aritmetická hloubka profilu a největší výška profilu se mezi těmito plochami lišily jen s minimálním rozdílem. Porovnáním profilů drsnosti lze vidět u plochy 50/40 jen dvě výraznější odchylky od jinak jemné struktury, kdežto u plochy 100/40 se odchylky vyskytují pravidelně. Lepší rozložení potvrdila i analýza Abbott - Firestonových křivek. Pokud tedy budeme obrábět materiál PVC, bude s ohledem na kvalitu povrchu lepší obrábět pomaleji a s menšími výkony.

Vyhodnocení 3D struktury vypovídá o stavu povrchu obrobenej plochy. Malá rychlost posuvu s vysokým výkonem má za následek značné rozrušení a nesourodost povrchu. Viditelné jsou spečené stopy zanechané paprskem. Prohlubně a vryp kolmý na směr obrábění nevznikly při tvorbě ploch, ale nejspíše špatnou manipulací s obrobkem.

7 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI OPRACOVANÉ PLOCHY

7.1 Záměr a postup

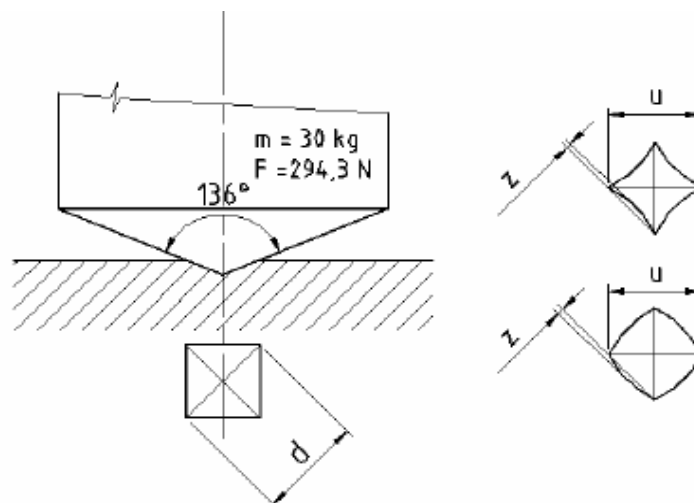
U opracovaných vzorků budeme měřit hodnotu mikrotvrdomosti. Cílem měření je zjistit, jakou mírou a jestli vůbec laserový paprsek mechanicky ovlivní místo řezu. Mimo obrobená místa změříme hodnotu mikrotvrdomosti, která bude sloužit jako matrice k následnému porovnávání měření povrchů, které byly vystaveny různým procesním podmínkám. Nedostatkem této metody je ztráta možnosti pozorování stopy indentoru u materiálů, které mají nízkou odrazivost světla - zobrazení povrchu se stává nemožné. U elastomerů nelze mikrotvrdomost na dostupném zařízení měřit z důvodu vysoké elasticity, kdy by vtlačení materiál „vypružil“ zpět a tvrdost by tedy byla nekonečně velká.

7.1.1 Teorie mikrotvrdomosti

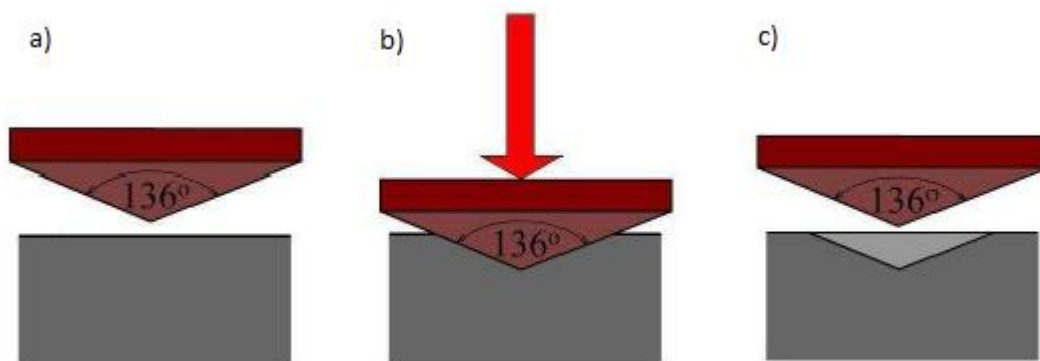
Tvrdomost patří mezi významné mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů a je velmi často využívána v technické praxi. Definice tvrdosti se liší, ale souhrnně lze říci, že se jedná o odolnost materiálu proti deformaci při zatěžování přesně definovaným tělískem přesně definovanou silou a její mírou je konkrétní trvalá plastická deformace. Název mikrotvrdomost se začal používat pro zatížení, jež způsobí pouze nepatrné vtisky při aplikaci velmi malých zatížení. Pomyslnou hranici mikrotvrdomosti určuje síla 19,8N. Jelikož je potřebná mnohem vyšší přesnost zatěžování i měření stopy, nelze mikrotvrdomost měřit běžnými mikrometry. Jediné vhodné metody pro měření jsou zkoušky vnikací, z nichž přichází v úvahu pouze Vickersova, Knoopova nebo Berkovičova. [21, 26]

7.1.1.1 Vickersova metoda ČSN EN ISO 6507-1

Tvar indentoru této metody představuje čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou vyrobený z diamantu, jež má vrcholový úhel 136° . Ten je vtlačován danou silou do měřeného materiálu. Výsledná tvrdost je určena jako poměr použité síly k ploše vzniklé otiskem vnikacího tělesa.



Obr. 75: Vickersova zkoušky + deformace vtisku [21]



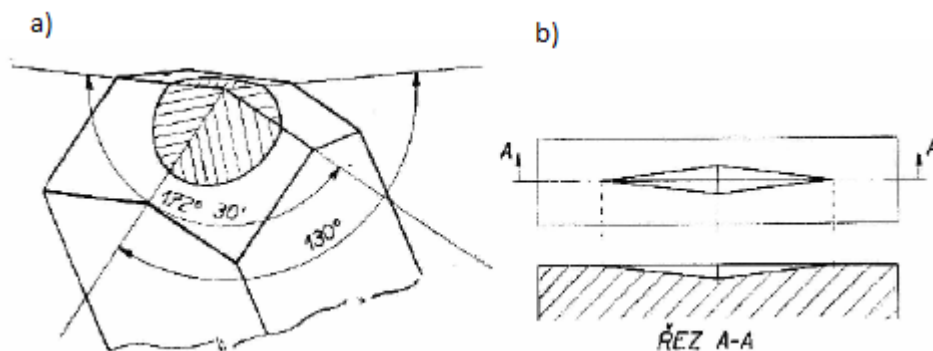
Obr. 76: Schematický postup zkoušky

Tab. 18: Zkušební zatížení pro Vickersovu zkoušku

Zkouška mikrotvrlosti						
Symbol tvrdosti	HV 0,01	HV 0,015	HV 0,02	HV 0,025	HV 0,05	HV 0,1
Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]	0,09807	0,1471	0,1961	0,2452	0,4903	0,9807

7.1.1.2 Knoopova metoda ČSN ISO 4545

V principu je zkouška stejná jako Vickersova metoda, pouze se liší tvarem indentoru, jež má poměr úhlopříček asi 7,11:1. Hloubka vtisku je pak 1/30 délky úhlopříčky. Rovněž zde dochází ke vlačování diamantového tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu, ale s vrcholovými úhly 172,5° a 130°. Vzniklý otisk je tvaru protáhlého kosočtverce a měří se pouze delší úhlopříčka.



Obr. 77: a) tvar jehlanu podle Knoopa b) tvar vtisku [21]

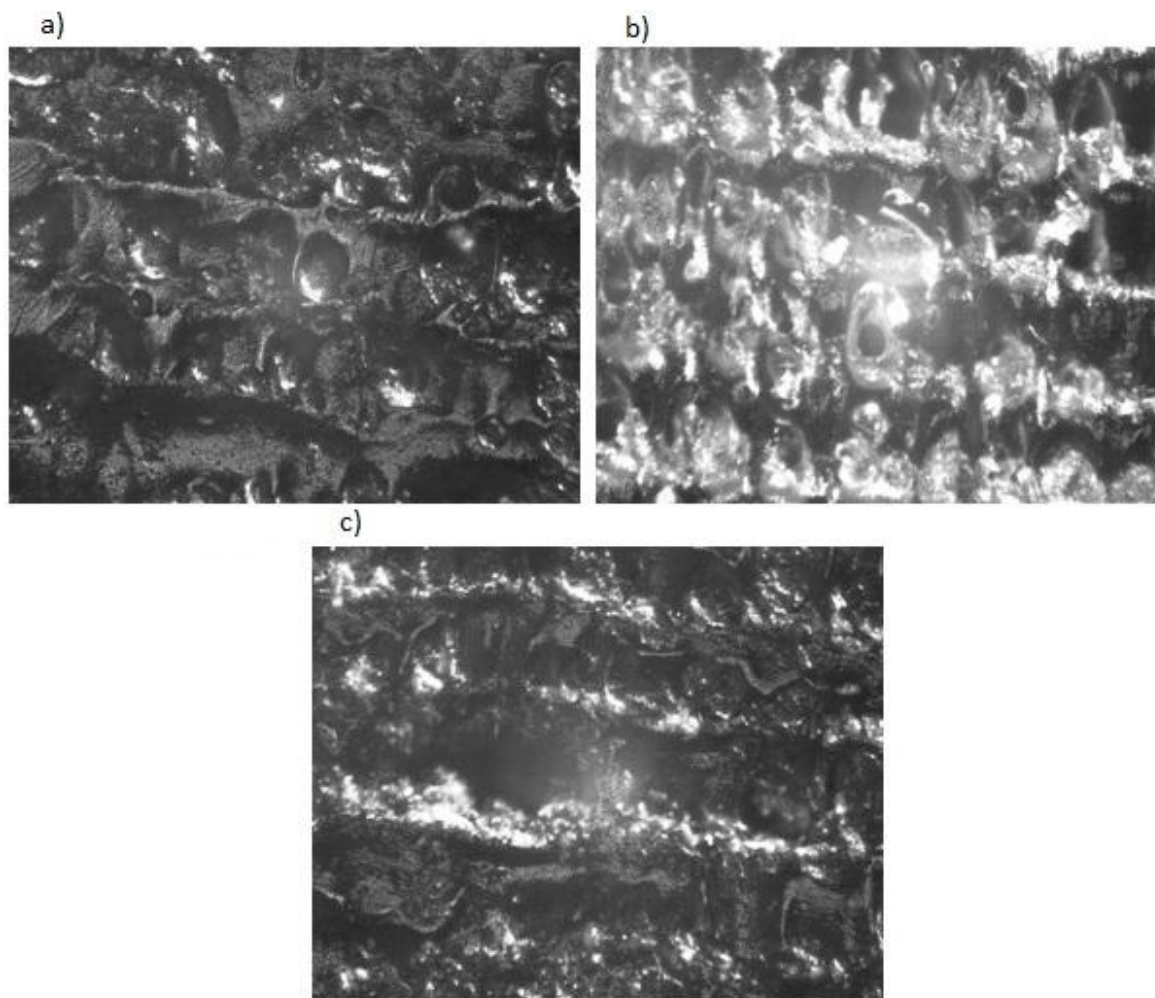
Tab. 19: Zkušební zatížení pro Knoopovu zkoušku

Zkouška mikrotvrlosti									
Symbol tvrdosti	HK 0,01	HK 0,02	HK 0,025	HK 0,05	HK 0,1	HK 0,2	HK 0,3	HK 0,5	HK 1
Nominální hodnota zkušebního zatížení [N]	0,09807	0,1961	0,2452	0,4903	0,9807	1,961	2,942	4,903	9,807

7.2 Vyhodnocení výsledků

Měření bylo značně ztíženo nízkou tvrdostí polymerů a výsledný otisk nebylo možné změřit v dostupném rozmezí měřicího „okna“ tvrdoměru Affri. Vpich byl opticky zvětšen do měrného pole, kde buď automaticky nebo manuálně byly nastaveny okraje vtisku, aby bylo možné odečíst velikost úhlopříček z nichž program vyhodnotil míru mikrotvrlosti. Právě nemožnost nastavení okrajů otisku po indentoru se vyskytl u polypropylenového vzorku, tudíž hodnota mikrotvrlosti nebyla určena. U vzorku vyrobeného z polyamidu 66 se díky velmi nízké odrazivosti nepodařilo dostatečně zaostřit povrch. Další problém vyvstal při snaze měřit hodnoty u PTFE. Samotný tvar kvádrů, na kterém jsou obrobene plochy, byl nerovnoměrně vyroben a při rotaci revolverové hlavy se měřící hrot zarýval do materiálu. Současně docházelo k posouvání celého vzorku a indentor nakonec nebyl v požadované poloze nad obrobene plochou. Ale hlavním činitelem přerušení této zkoušky bylo nebezpečí poškození diamantového hrotu, případně snímací optiky. Opracovaný povrch polykarbonátového vzorku je už při pouhé vizuální kontrole zhodnocen jako ne-

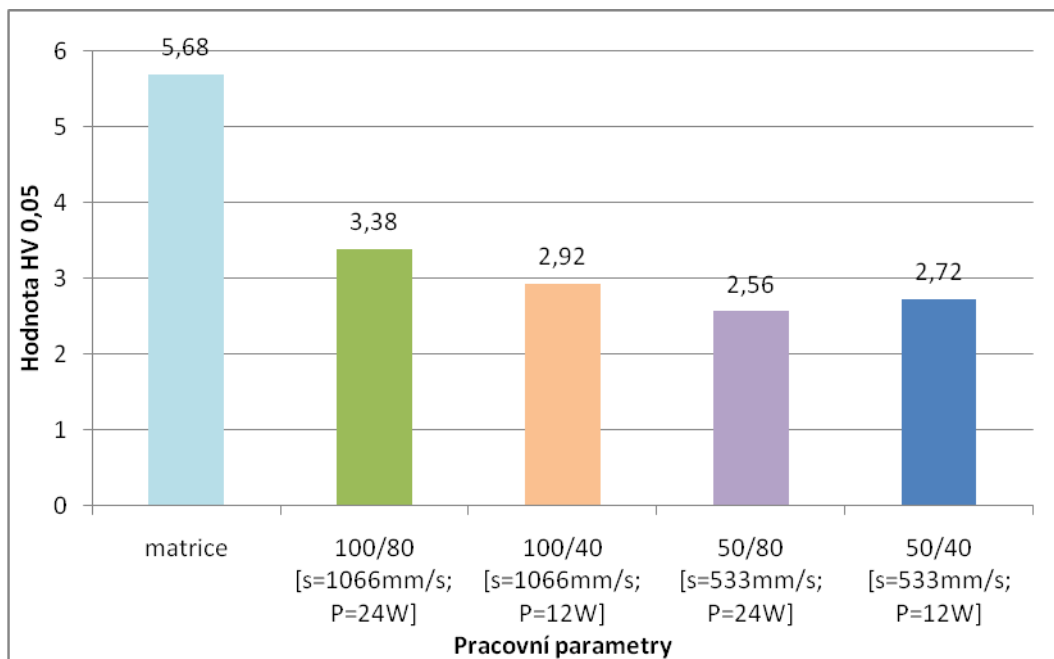
vhodný pro provedení této zkoušky *Obr. 78*. Pokud by vlačovaný hrot, který má vrcholový poloměr $0,2\ \mu\text{m}$, přijel k měřenému povrchu, zapadl by mezi nerovnosti povrchu a výsledky by neodpovídaly skutečnosti. Jediným měřitelným materiálem bylo PVC.



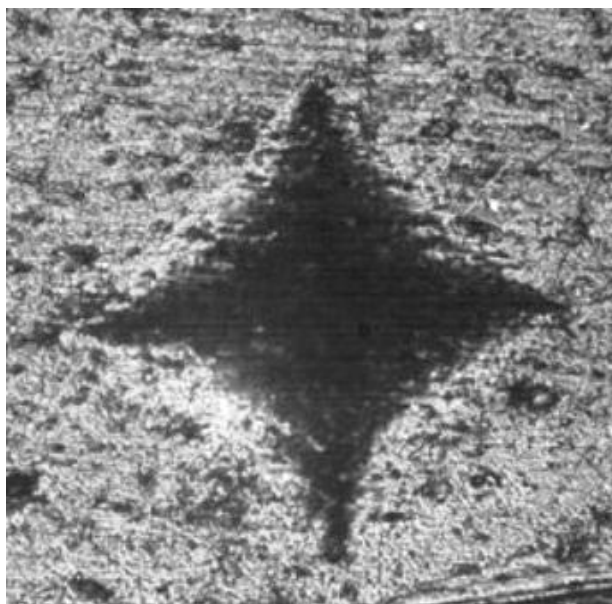
Obr. 78: Povrch PC s procesními podmínkami a) 50/40 [$s=533\ \text{mm/s}$; $P=12\ \text{W}$], b) 100/40 [$s=1066\ \text{mm/s}$; $P=12\ \text{W}$], c) 100/80 [$s=1066\ \text{mm/s}$; $P=24\ \text{W}$]

Tab. 20: Výsledky měření mikrotvrdosti materiálu PVC

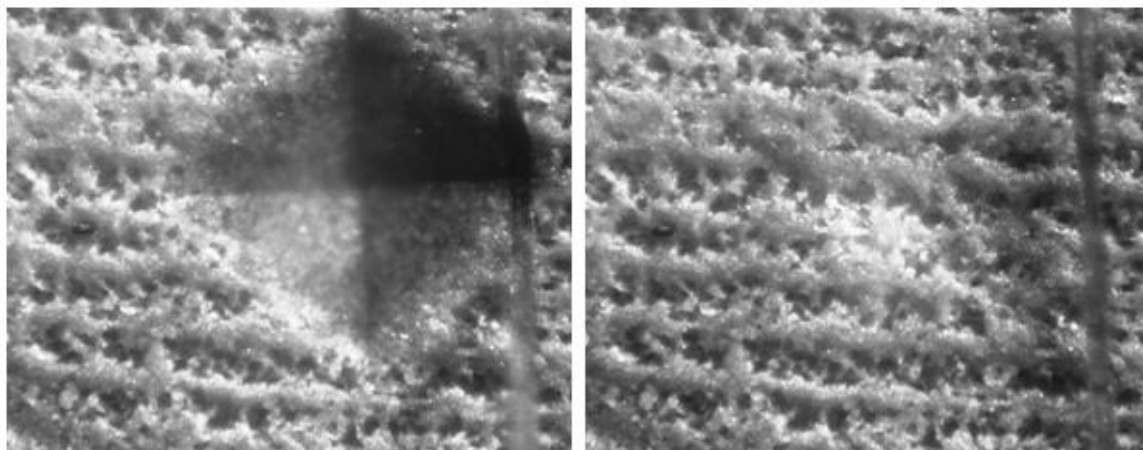
n	1	2	3	4	5	Průměr [HV 0,05]
matrice	5,8	5,7	5,8	5,6	5,5	5,68
100/80	3,2	3,5	3,5	3,4	3,3	3,38
100/40	3,1	2,9	2,8	3	2,8	2,92
50/80	2,6	2,4	2,5	2,6	2,7	2,56
50/40	2,5	2,7	2,6	2,8	3	2,72



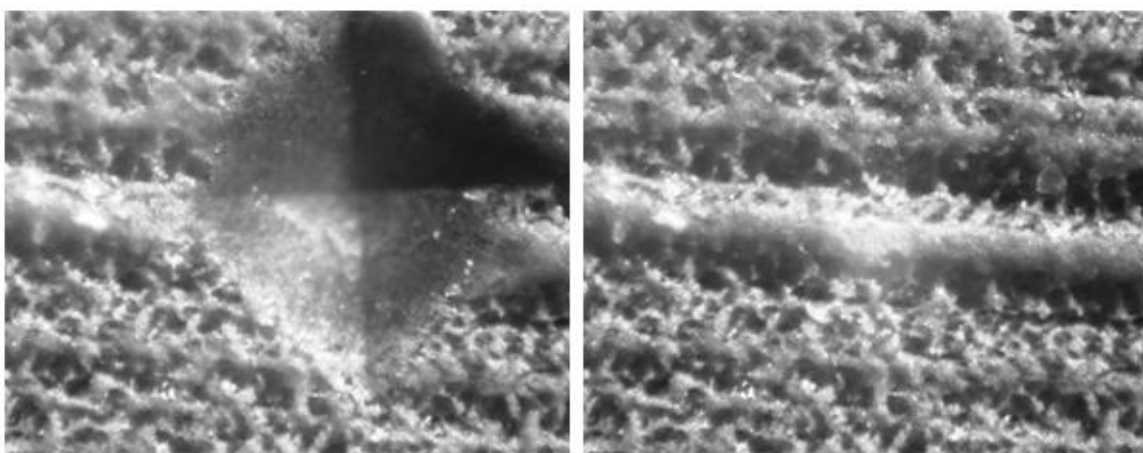
Obr. 79: Vyhodnocení výsledků



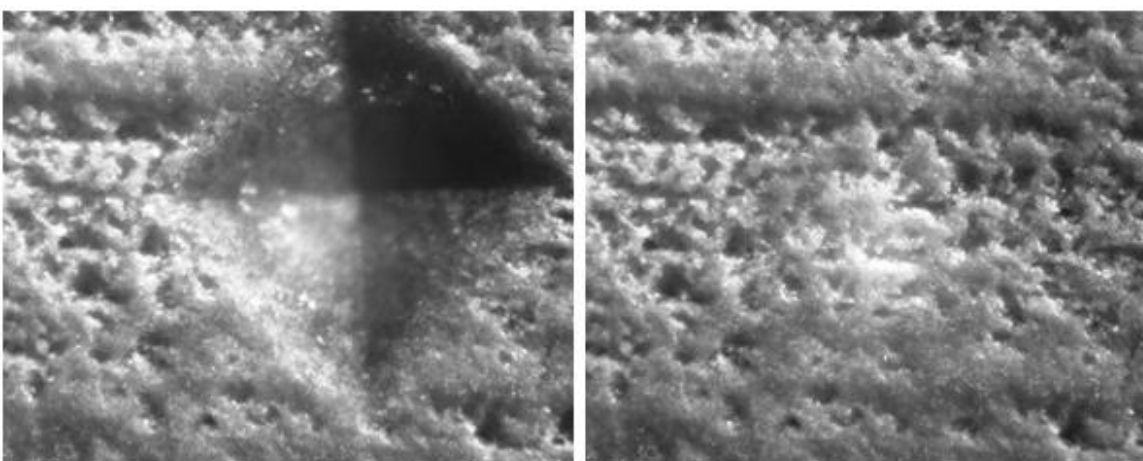
Obr. 80: Detail vtisku do matrice



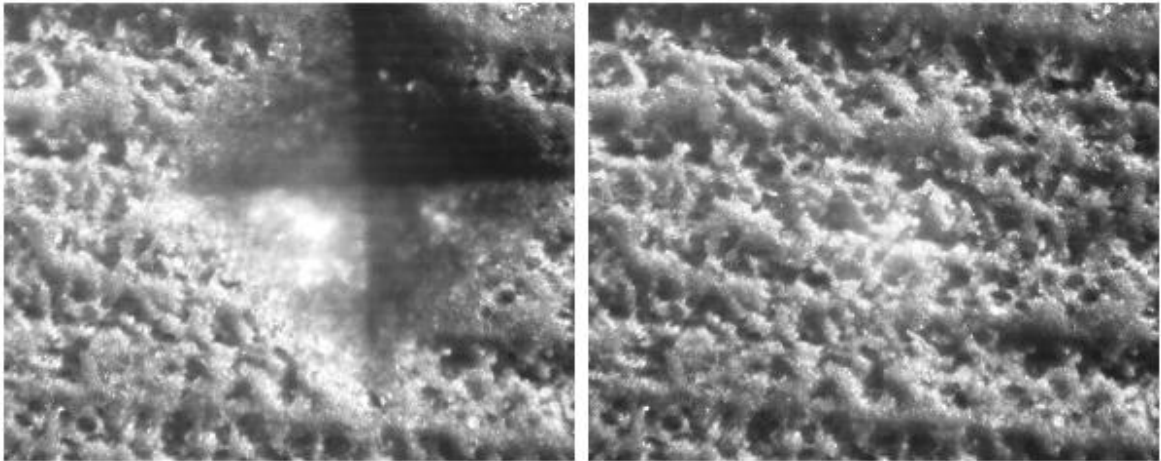
Obr. 81: 100/80 [s=1066mm/s; P=24W]



Obr. 82: 100/40 [s=1066mm/s; P=12W]



Obr. 83: 50/80 [s=533mm/s; P=24W]



Obr. 84: 50/40 [$s=533\text{mm/s}$; $P=12\text{W}$]

7.3 Diskuze výsledků

Porovnáním získaných hodnot lze říci, že nastalo ovlivnění povrchové vrstvy. Matrice svou mikrotvrdostí převyšuje téměř dvojnásobně všechny opracované plochy. Jelikož bylo měření provedeno na více různých místech, můžeme vyloučit tento rozdíl způsobený možným výskytem nečistot obsažených v materiálu. Nejvyšší tvrdost, a to 3,38 HV 0,05, byla zjištěna u povrchu opracovaného výkonem 12W a rychlostí posuvu 1066mm/s. Z grafu výsledků si lze povšimnout stoupajícího trendu tvrdosti s rostoucí rychlostí obrábění a výkonem laseru. Vysoká teplota nejspíše způsobuje degradaci materiálu a tím i změnu jeho vlastností. Dalším faktorem ovlivnění vlastností povrchové vrstvy mohou být zbytková napětí. Pokud vycházíme z úvahy, že se snižujícími se procesními podmínkami, tedy i s klesajícím úběrem materiálu, bude konečná obrobená plocha shodná s původní matricí o totožné tvrdosti, můžeme předpokládat konvexní vývoj vlivu procesu obrábění na vlastnostech jednotlivých opracovaných ploch. Pro úplné potvrzení tohoto úsudku by bylo nutné měření provést na větším množství vzorků s různými parametry procesních podmínek.

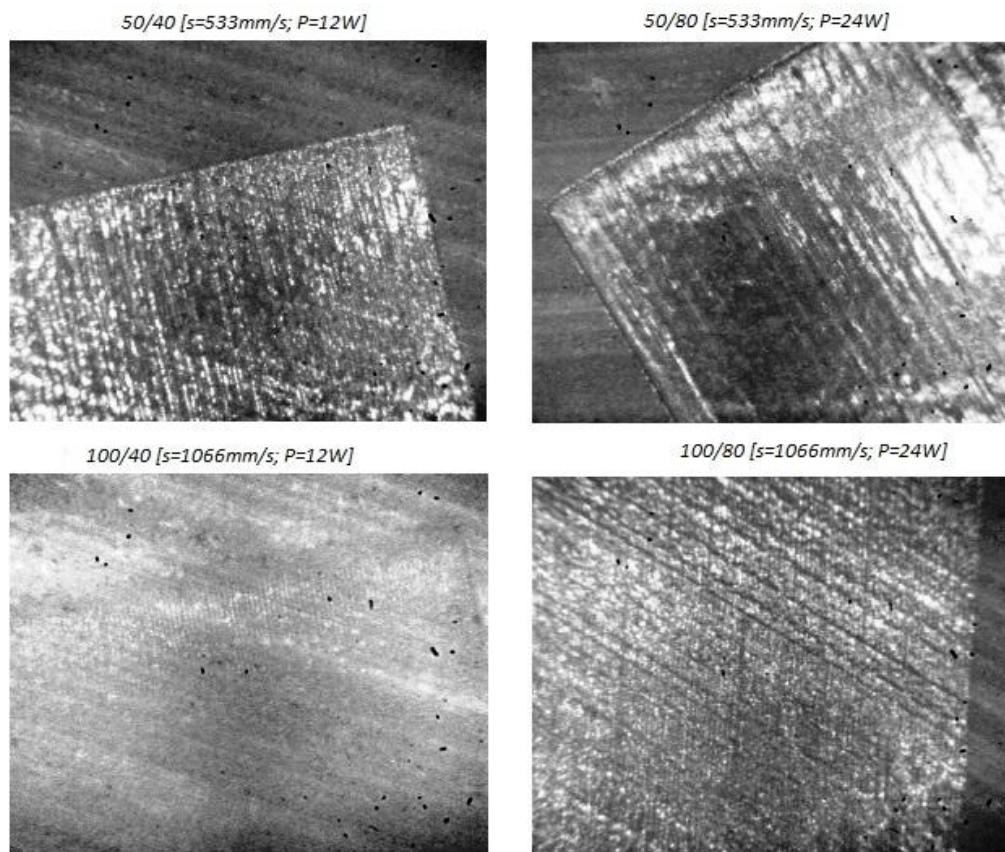
8 VIZUÁLNÍ HODNOCENÍ OBROBENÉ PLOCHY

8.1 Záměr a postup

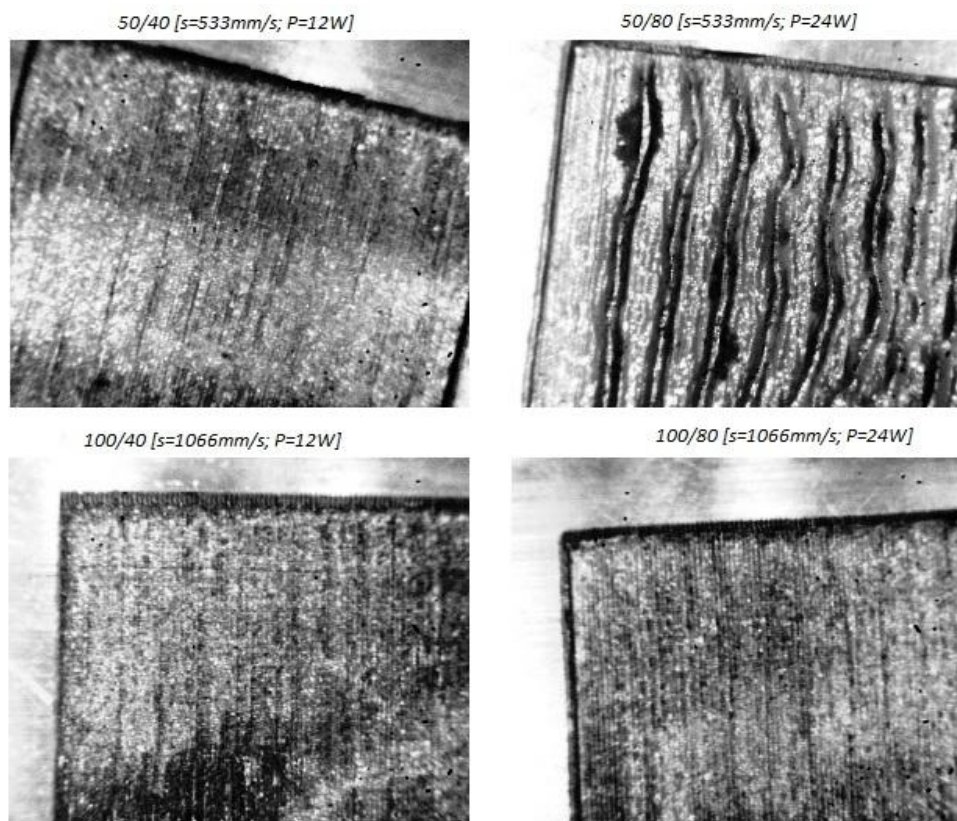
Na přístroji ProScope HR byly nafoceny obrobené plochy při různém zvětšení. Snímky by měly napomoci pochopit povahu a vlastnosti vytvořeného povrchu. Bude hodnocen celkový stav, neporušenost, stupeň degradace.

8.2 Vyhodnocení měření

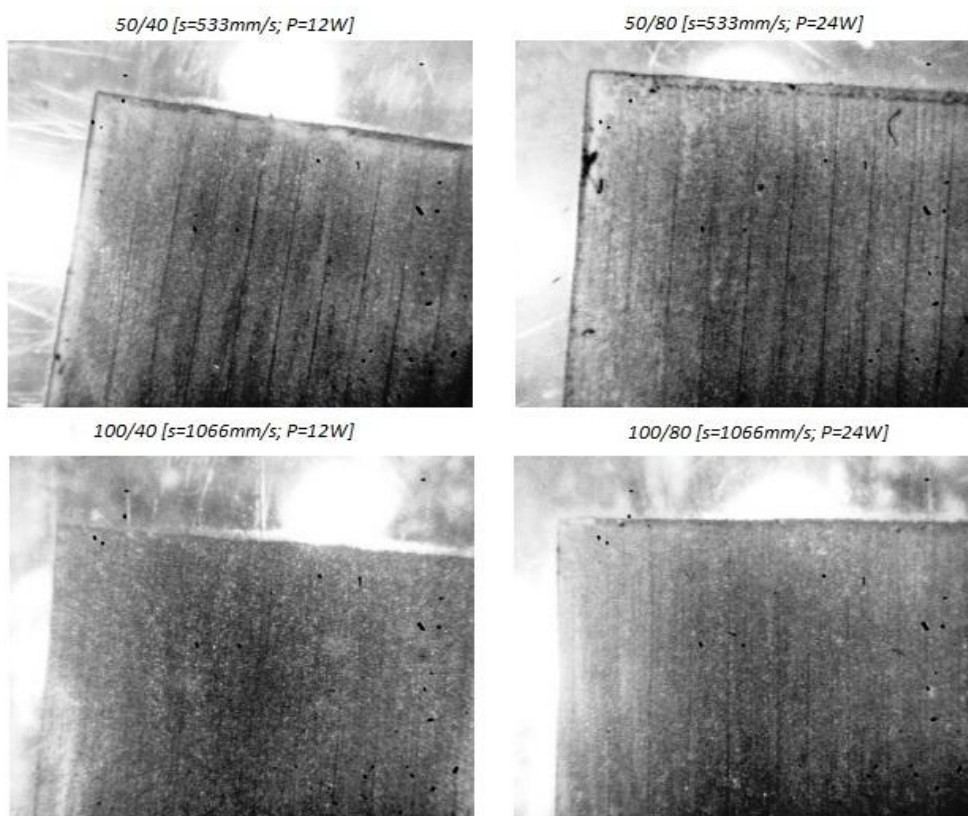
8.2.1 Plocha 30-ti násobně zvětšená



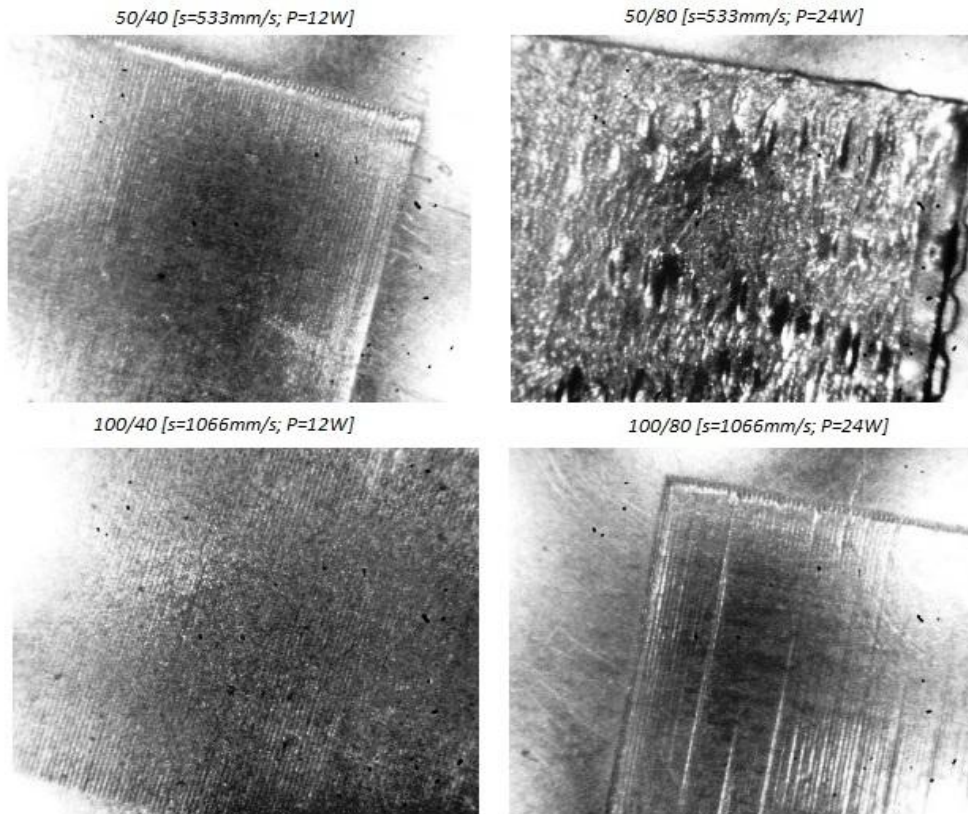
Obr. 85: PA



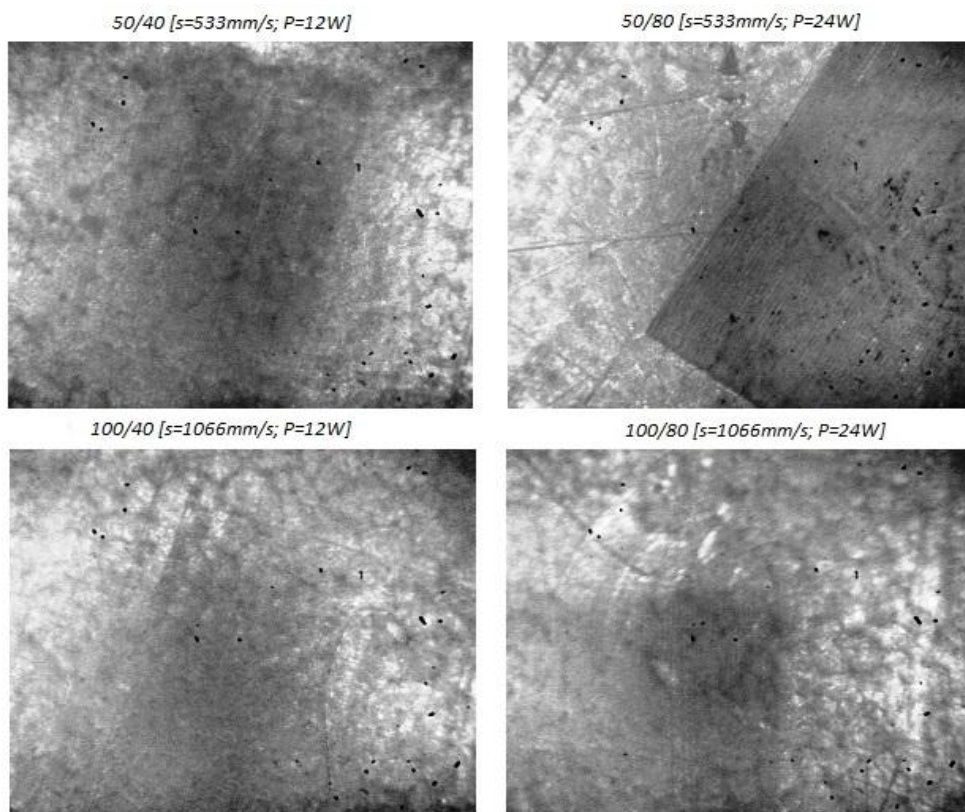
Obr. 86: PC



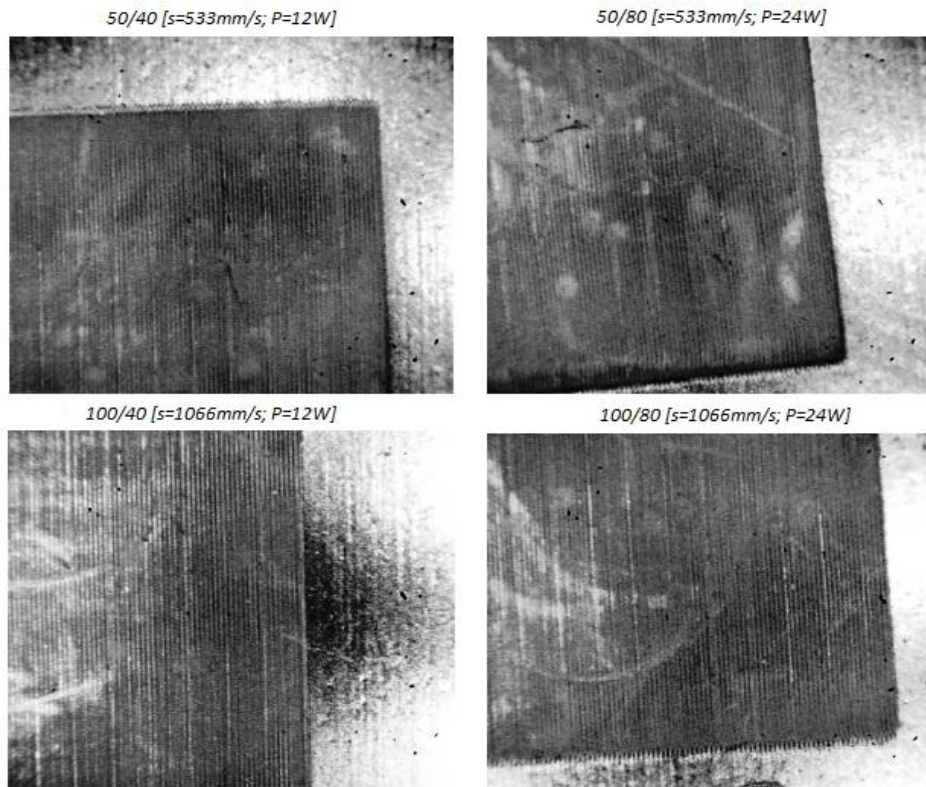
Obr. 87: PMMA



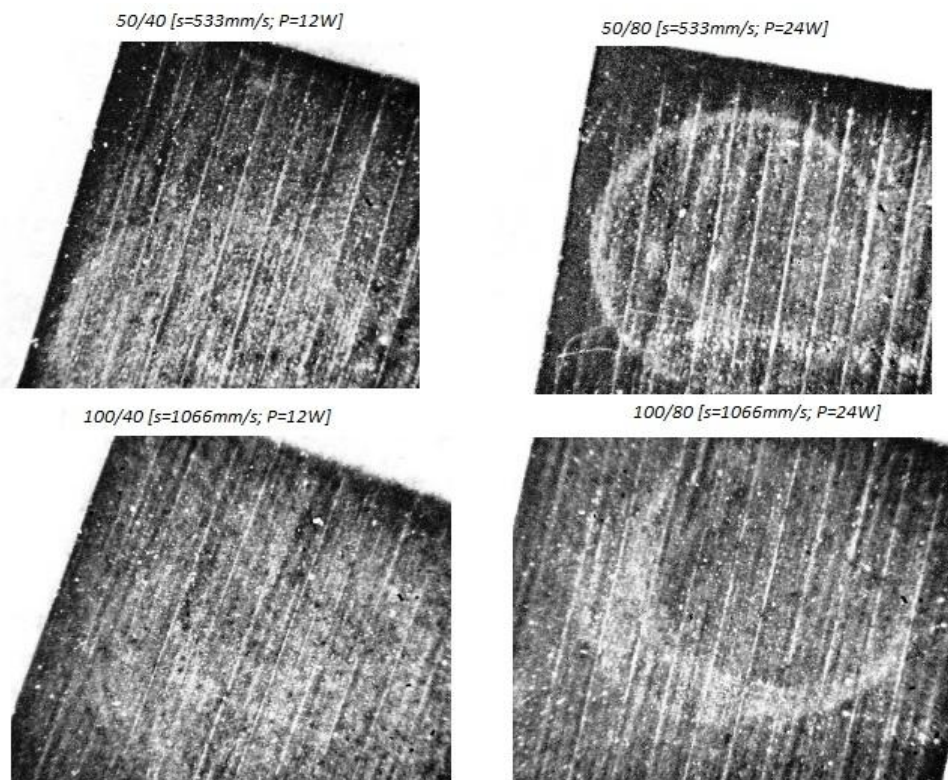
Obr. 88: PP



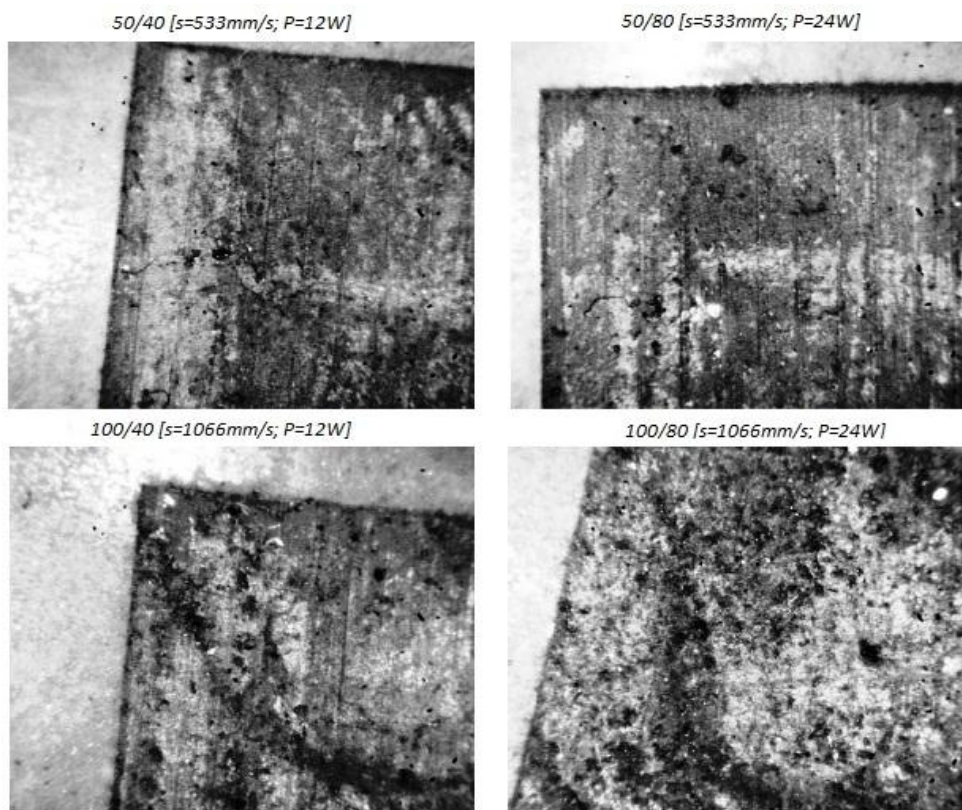
Obr. 89: PTFE



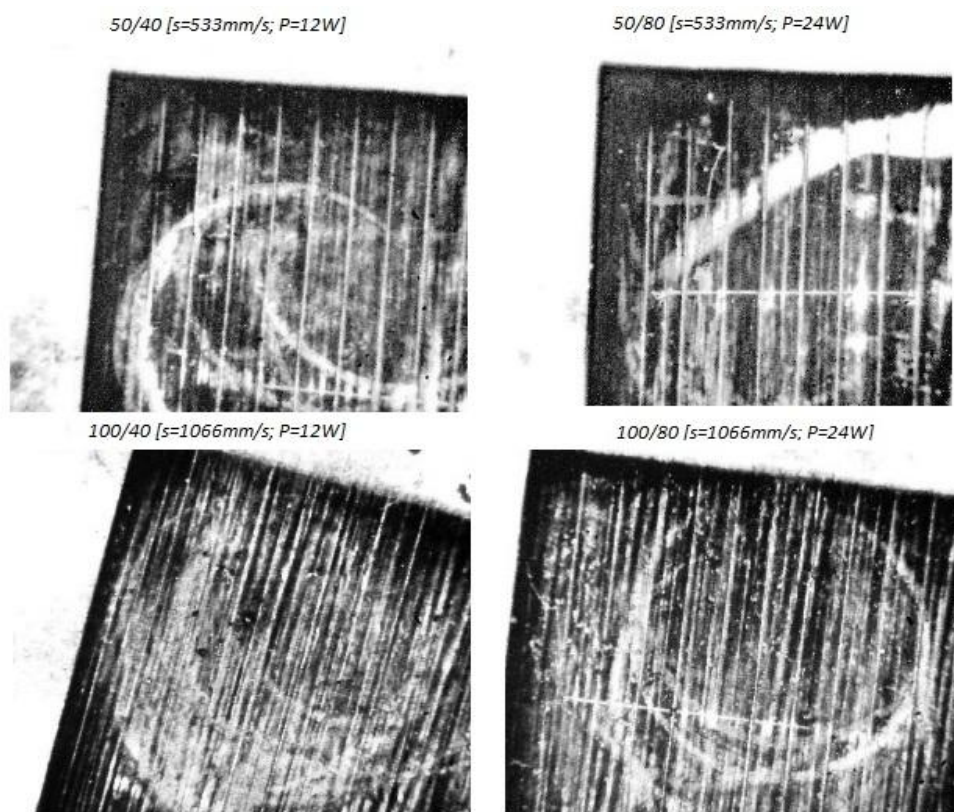
Obr. 90: PVC



Obr. 91: NBR

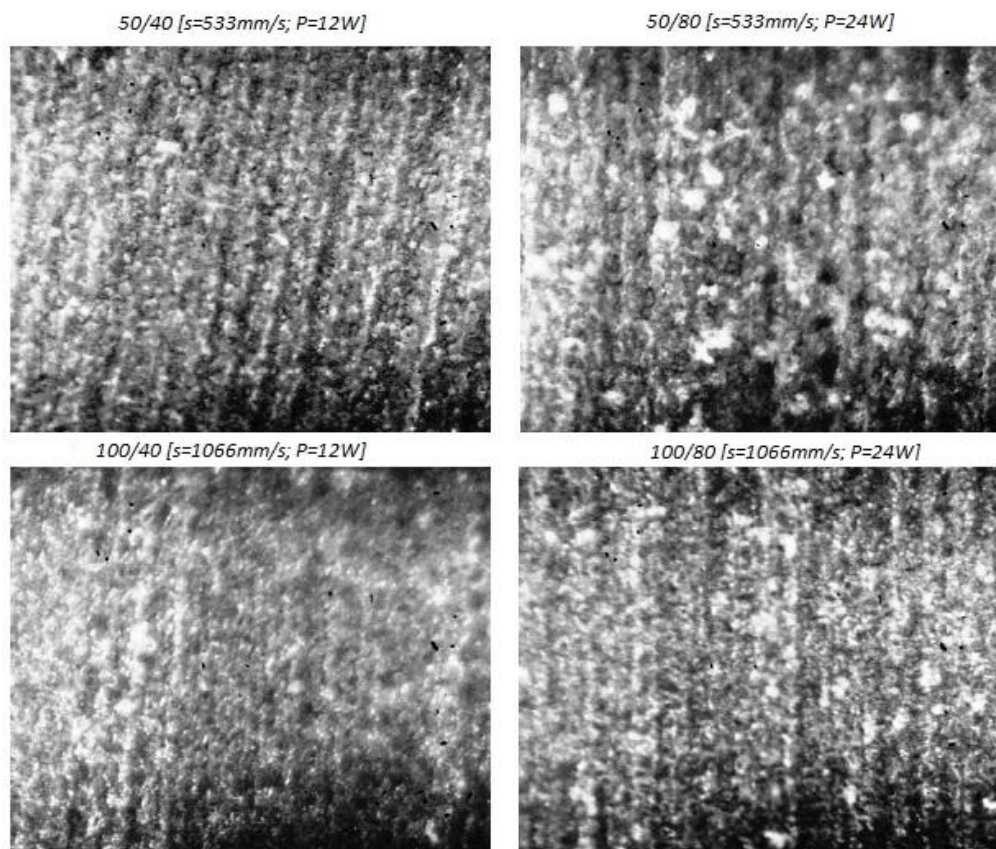


Obr. 92: NR

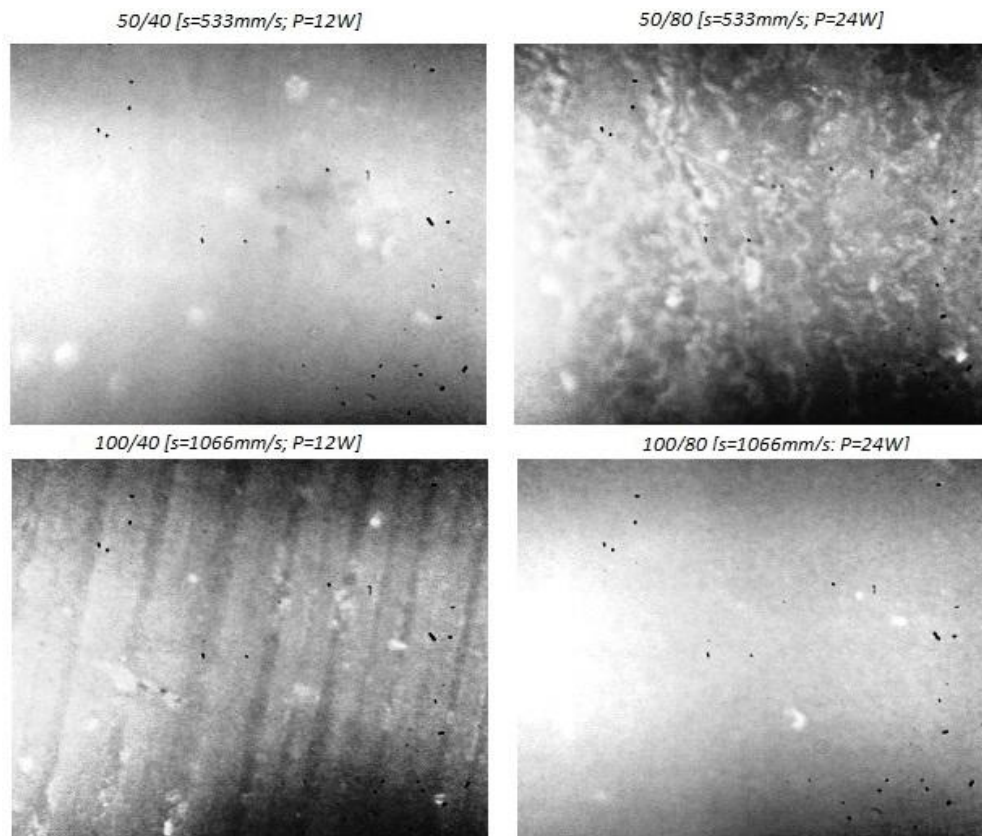


Obr. 93 : NR-SBR

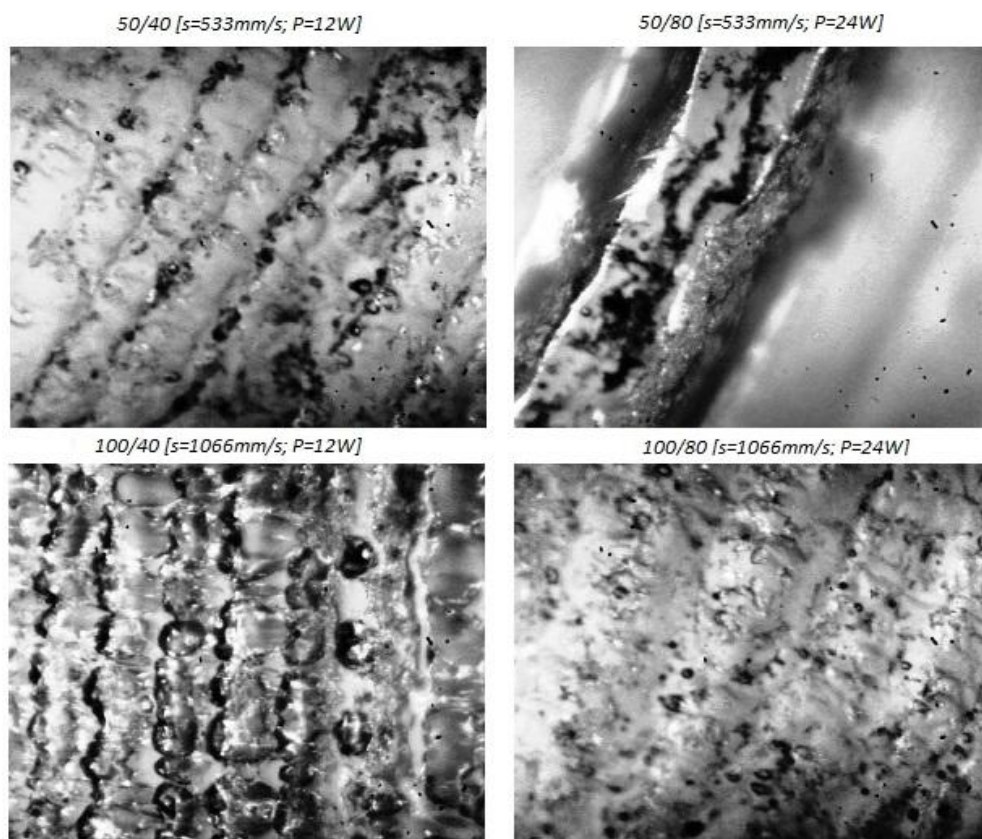
8.2.2 Plocha 400 krát zvětšená



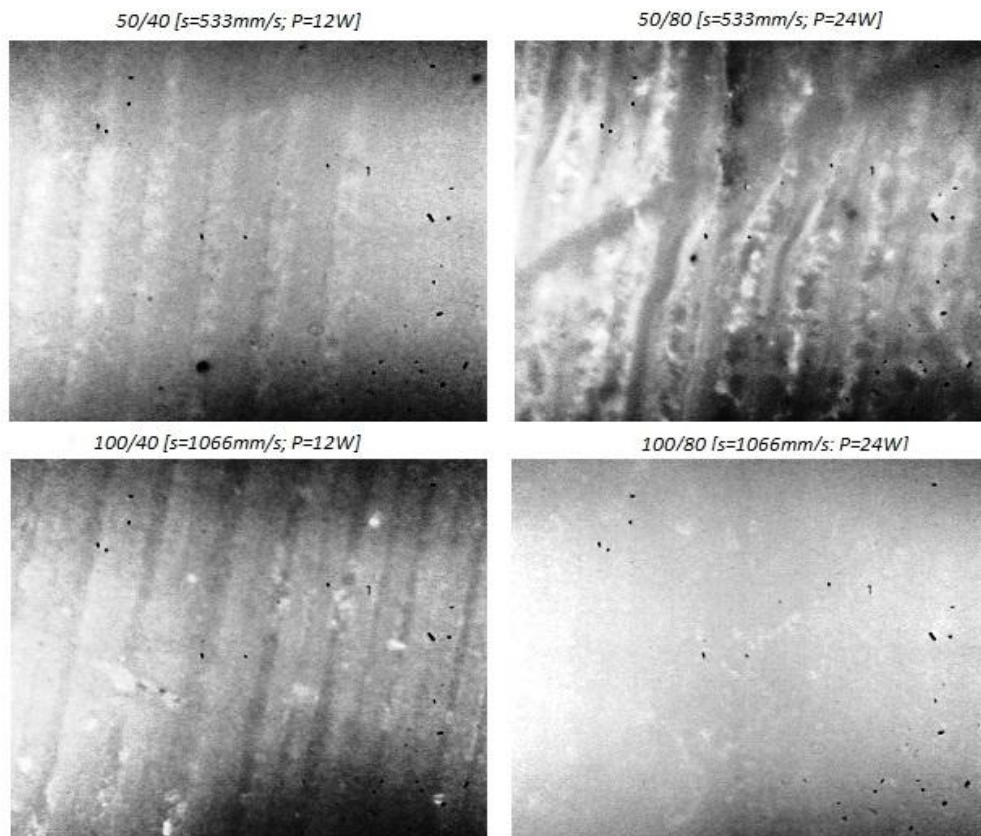
Obr. 94: PMMA



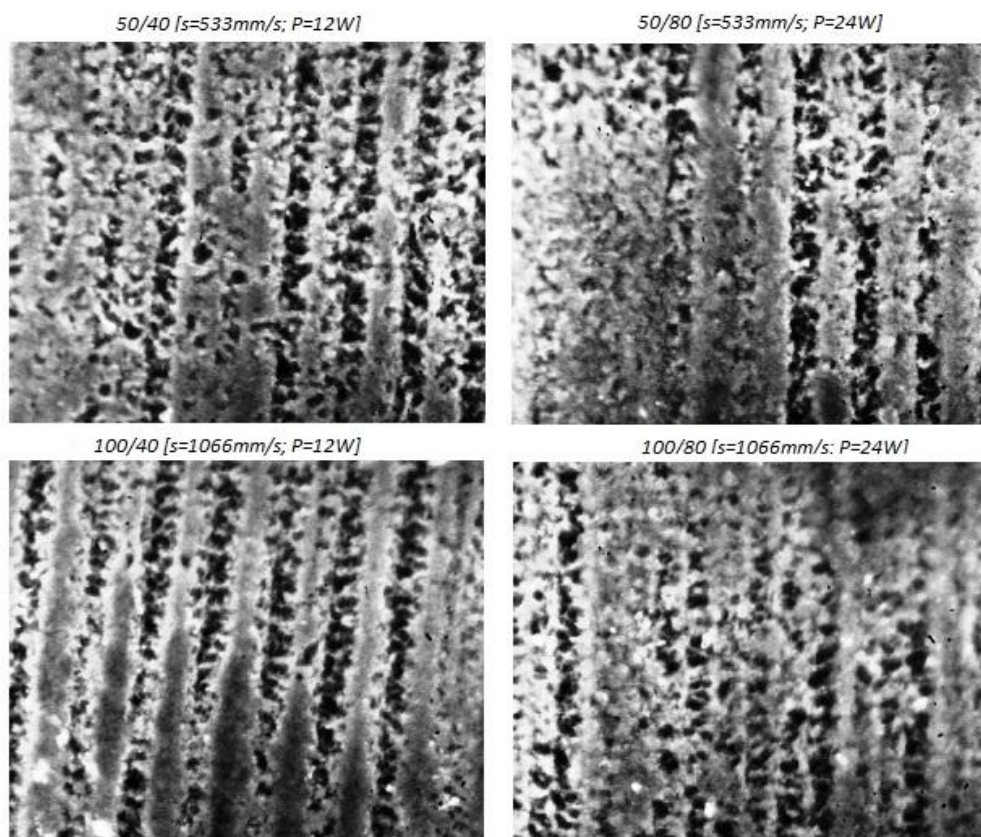
Obr. 95: PP



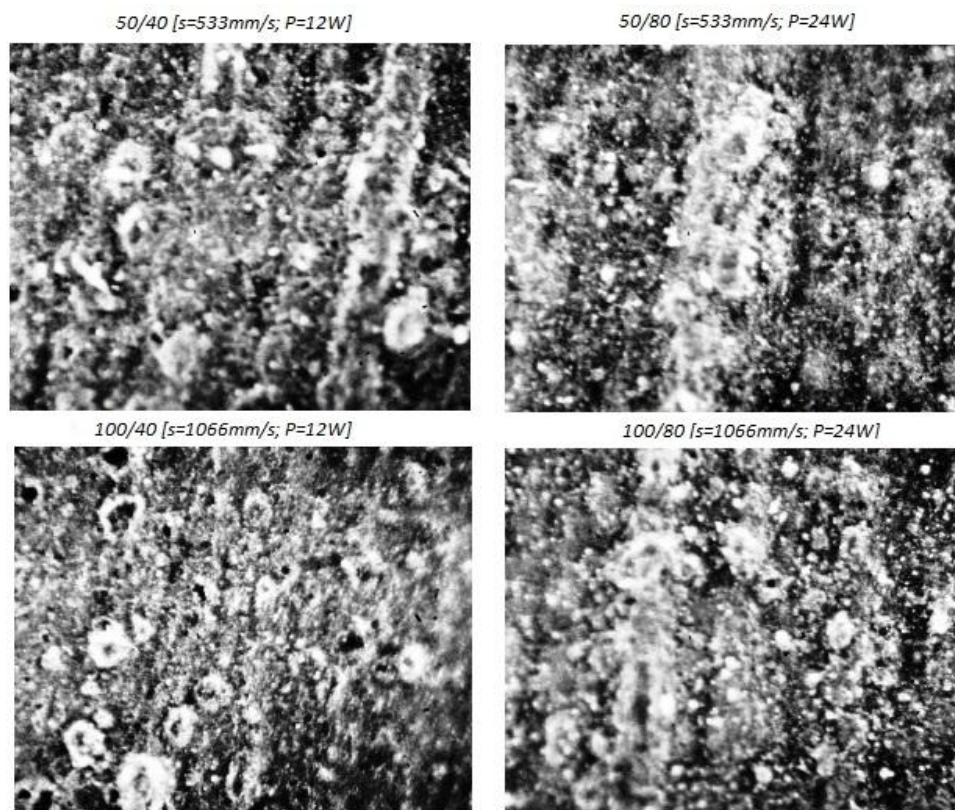
Obr. 96: PC



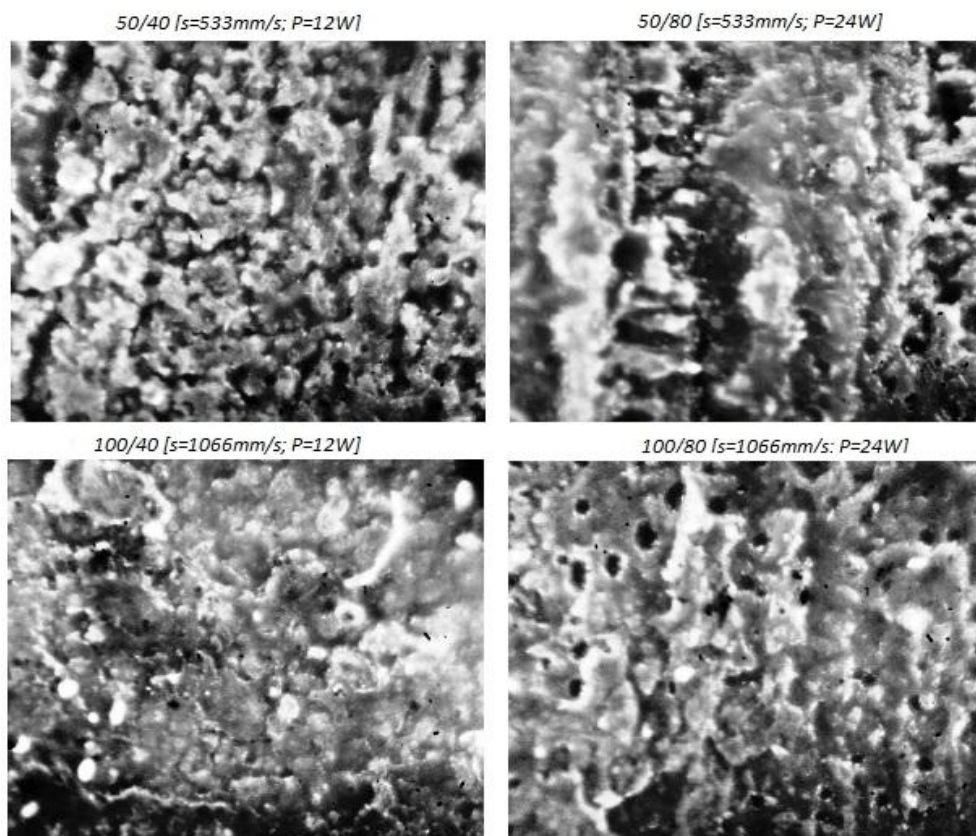
Obr. 97: PTFE



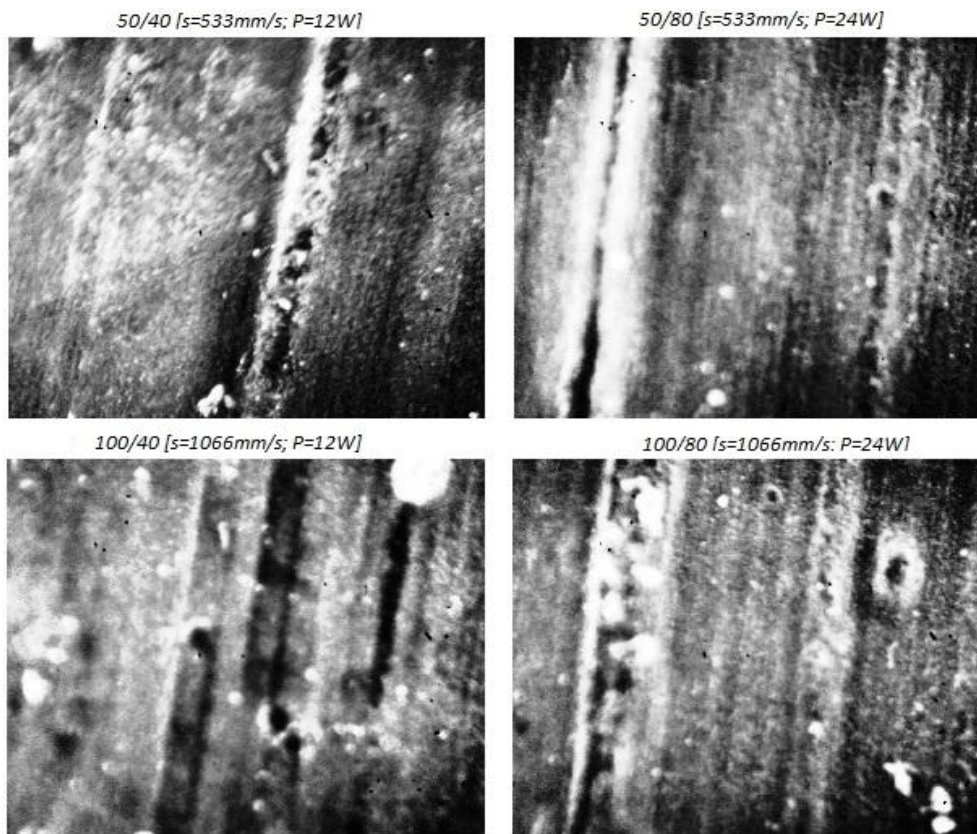
Obr. 98: PVC



Obr. 99: NBR



Obr. 100: NR



Obr. 101: NR-SBR

8.3 Diskuze výsledků

Snímky jednotlivých materiálů nemají příliš vysokou vypovídající schopnost. V případě malých rozměrů slouží spíše k orientaci, jak se výsledná plocha transformovala a jak probíhal úběr materiálu. U polykarbonátového vzorku lze vidět několik velmi vysokých výčnělků lineárního charakteru. Při větším zvětšení jsou vidět na jejich okrajích spálená místa. U elastomerních materiálů jsou tyto drážky, v mnohem menším rozsahu, rovněž viditelné. Lze předpokládat, že obrábění nejspíše probíhalo hnutím taveniny před paprskem. Fotografie z měření při 400 násobném zvětšení odhalily zvláště u povrchů PC rozrušenost, puchýře a póry. Polypropylenový vzorek vykazuje jemnou strukturu až na povrch obráběný parametry rychlosti posuvu $s=533\text{mm/s}$ a výkonu laseru $P=24\text{W}$. Po ploše se nahodile vyskytují výčnělky a okraje jsou slité do jednoho celku, kdežto u ostatních ploch jsou jasně viditelné ostré konce stop po laserovém paprsku. Celkové zhodnocení bylo shrnuto do tabulky, kde jsou jednotlivé plochy hodnoceny školním známkovacím systémem.

Tab. 21: Hodnocení jakosti povrchu

Druhy polymerů	50/40 [s=533mm/s; P=12W]	50/80 [s=533mm/s; P=24W]	100/40 [s=1066mm/s; P=12W]	100/80 [s=1066mm/s; P=24W]
NR	3-4	4	3-4	3-4
NBR	2-3	3-4	2-3	3
NR-SBR	3-4	4	3-4	4
PA66	2	2-3	1	1-2
PC	4	4-5	3-4	3
PP	1	2-3	2	1-2
PTFE	1-2	3	2	1-2
PVC	3	3-4	3	3
PMMA	2	3	2	2

1 - velmi dobrá jakost povrchu

2 - dobrá jakost povrchu

3 - průměrná jakost povrchu

4 - špatná jakost povrchu

5 - velmi špatná jakost povrchu

ZÁVĚR

Tato diplomová práce shrnuje základní poznatky z oblasti mikroobrábění polymerních materiálů laserem. Jednalo se o materiály polyamid 66, polykarbonát, polypropylén, polytetrafluoretylén, polyvinylchlorid, přírodní kaučuk, nitril-butadienový kaučuk a polosyntetický kaučuk.

Teoretická část je věnována fyzikální podstatě laserového záření, jeho vlastnostem, konstrukci a dělení laserů dle různých hledisek, dále je zde nastíněna problematika laserového mikroobrábění a v závěru literární rešerše je podán přehled o materiálech vybraných pro experimentální obrábění.

Cílem experimentální části práce bylo studium vlivu laserového paprsku na polymerní materiály. Za tímto účelem bylo provedeno experimentální obrábění vzorků na CO₂ laseru Merkury L30 ve Firmě Mechanika PV. V praktické části byly dále aplikovány vybrané metody měření na vyhodnocení „laserové obrobitelnosti“ a porovnání kvality obráběných ploch při různých technologických parametrech zařízení. Hloubkou drážky vytvořené laserovým paprskem byly určeny materiály s nejlepší „laserovou obrobitelností“. S měnícími se procesními podmínkami se měnila nejen dosažená hloubka drážky, ale i vhodnost jednotlivých materiálů pro obrábění. Některé výsledky, zvláště u nižších výkonů laseru, poukazují na velmi těžkou obrobitelnost materiálu a pro laserové aplikace nepoužitelné. Nový systém snímání topografie povrchu pomohl přesně určit parametry výsledné plochy. Jejich zobrazení ve 2D a 3D umožňuje získat reálnou představu o struktuře a jakosti laserem opracované plochy a lépe si tak můžeme představit účinek laserového paprsku. Současně byly kontrolovány veličiny drsnosti Ra, Rz, Rt a Rmr kontaktním i bezkontaktním měřidlem. Rozdíly v naměřených hodnotách dosahovaly minimálních hodnot. Můžeme tedy konstatovat, že pokud by drsnost byla měřena na kterémkoli z nich, výsledná hodnota je blízká skutečnosti. Na přístroji Talysurf byla vygenerována křivka nosného podílu. Tento ukazatel výskytu nerovností je natolik vypovídající, že nám poskytne kompletní přehled celé struktury měřené délky. Ostatní analýzy tedy v konečném důsledku představovaly spíše doplňující měření a pro příští studie bych jako dostačující rozbor doporučoval vyhodnocení pouze těchto křivek. Náhled do oblasti změny materiálu po obrábění a tím ovlivnění mechanických vlastností v podobě mikrotvrdoti nevyšel podle očekávání. Limitující faktory měření neumožnily provést výzkum u všech materiálů. Přesto jsme za-

znamenal téměř poloviční pokles mikrotvrlosti u materiálu PVC způsobenou degradací materiálu, pnutím v povrchové vrstvě či jinými účinky.

Oblast výzkumu vlivu laserového paprsku na polymerní materiály je velice zajímavá a rozsáhlá problematika, jejíž studium může být námětem pro další práce, které mohou přinést zajímavé výsledky nejen v oblasti vhodnosti použití jednotlivých materiálů pro obrábění. Hlavním směrem, který by tyto studie mohly následovat, je vliv laserového obrábění na elastomerní materiály.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SEDLÁČEK, K.: *Laser v mnoha podobách*. 1. vyd. Praha : Naše vojsko, 1982. 256 s.
- [2] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [3] SIEGMAN, A. E.: *Lasers*. University Science Books, Sausalito 1986. 1283 s. ISBN 978-0-935702-11-2.
- [4] BAHAA, E., A., SALEH, MALVIN, C., T.: *Základy fotoniky, svazek 1,2,3 a 4*. MATFYZPRESS, Praha 1996. ISBN 80-85863-00-6.
- [5] PASCHOTTA, R.: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. [online]. Poslední revize 2009-01-18, [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.rp-photonics.com>>
- [6] MM Průmyslové centrum [online]. roč. 2008, č. 5 [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.mmspektrum.com>>. ISSN 080504
- [7] TRUMPF Laser Technology [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.trumpf-laser.com>>
- [8] Manufacturing Research Laboratory [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.mrl.columbia.edu/ntm/ch04s4.html>>
- [9] WWW stránky studentů a zaměstnanců BF JU [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <http://tomcat.prf.jcu.cz/sima/vybrane_kapitoly/laser_spektrometrie.htm>
- [10] Fyzika polymerů [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/Fyzika%20polymeru.htm>>
- [11] ELEKTRO odborný časopis pro elektroniku [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271> <<http://www.mrl.columbia.edu/ntm/ch04s4.html>>
- [12] MikroDesignum [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>
- [13] Mitutoyo [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/poster_drsnosti_ra_cze_a3.pdf>

- [14] MAŇKOVÁ, I.: *Progresivní technologie*. 1. vyd. Viehela, Košice. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [15] VUT v Brně [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Obsah.htm>>
- [16] Západočeská univerzita v Plzni [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <zcu.yc.cz/TD/DRSNOST.doc>
- [17] Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm>
- [18] Gymnázium, Střední odborná škola a Vyšší odborná škola Ledec nad Sázavou [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.gvi.cz/files/chemie/mml.pdf>>
- [19] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/Fyzika%20polymeru.htm>>
- [20] LaserPro [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.laserproi.com/>>
- [21] OŠTĀDAL, L.: *Měření tvrdosti kovů*. Bakalářská práce. Obhájeno 2008.
- [22] KOČMAN, K., PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. 2. vyd. VUT v Brně, Brno. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [23] Air Liquide [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>>
- [24] SVĚTLO časopis pro světelnou techniku a osvětlování [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35057>
- [25] The essential component for medical manufacturing [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.medicaldevice-network.com/contractors/manufacturing/veldlaser>>
- [26] Drsnost povrchu [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>>
- [27] Technická univerzita Liberec [online]. [cit. 2010]. Dostupné na www: <<http://www.ksp.tul.cz>>

- [28] CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., KOLOMAZNÍK, K., DVOŘÁK, Z.,: *Termofyzikální vlastnosti vybraných látek (doporučeno pro výuku předmětu Procesní inženýrství studijního programu Procesní inženýrství)*. 1. vyd. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín. 122 s. ISBN 978-80-7318-787-3.
- [29] DVOŘÁK, Z., JAVOŘÍK, J.,: *Konstrukce výrobků, konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín. 146 s.
- [30] IMECO TH[online]. [cit. 2010]. Dostupné na [www: <http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/CLI%20\(CZ\).pdf >](http://www.imeco-th.cz/Download/Prospekty/CLI%20(CZ).pdf)
- [31] Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd [online]. [cit. 2010]. Dostupné na [www: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf >](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D	Plošné zobrazení
3D	Prostorové zobrazení
ABS	Akrylonitril butadien styren
Al	Chemická značka hliníku
C	Chemická značka uhlíku
Cl	Chemická značka chlóru
CNC	Počítačem řízené obrábění
d	Délka
DPI	Krok posuvu laserového paprsku
F	Chemická značka fluoru
F	Síla
h	Hloubka
HK	Symbol mikro-tvrlosti Knoopovy zkoušky
HV	Symbol mikro-tvrlosti Vickersovy zkoušky
IT	Stupeň přesnosti
l	Délka
LED	Elektroluminiscenční dioda
m	Hmotnost
N	Chemická značka dusíku
NBR	Nitril-butadienový kaučuk
NR	Přírodní kaučuk
NR-SBR	Polosyntetický kaučuk
O	Chemická značka kyslíku
P	Výkon

PA 6	Polyamid 6
PA 66	Polyamid 66
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmetakrylát
POM	Polyoxymetylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTFE	Polytetrafluoretylen
PVC	Polyvinylchlorid
Ra	Průměrná aritmetická úchylka povrchu
Rmr	Materiálový poměr povrchu - nosný podíl
Rt	Celková výška profilu drsnosti
Rz	Aritmetická hloubka profilu
s	Pracovní rychlost
š	Šířka
v	Výška
τ	Čas
www	World Wide Web

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: a) světlo žárovky, b) sluneční záření , c) monochromatické světlo, d) laserové záření (d). Různé barvy představují různou vlnovou délku.	13
Obr. 2: Pracovní oblasti různých metod pro a) slitiny hliníku, b) nelegovanou ocel, c) vysokolegovanou ocel [23]	16
Obr. 3: Podíl typů laseru na trhu [6]	17
Obr. 4: Procentuální rozdělení jednotlivých technologií [6]	17
Obr. 5: Přehled typů laserů [6].....	18
Obr. 6: Prvky laseru [3]	19
Obr. 7: Princip stimulované emise.....	20
Obr. 8: Příklady elektrického a optického čerpání.....	21
Obr. 9: Příklady základního módu [5]	23
Obr. 10: Profily amplitudy. Dvě barvy ukazují různé elektrické pole hodnot [5]	24
Obr. 11: Optické rezonátory.....	25
Obr. 12: Spektrální šířka pásma [7]	26
Obr. 13: Podmínky pro dosažení oscilace laseru	26
Obr. 14: Porovnání výstupního záření impulzních laserů a) s vnějším modulátorem a b) s vnitřním modulátorem.....	27
Obr. 15: Spínání zisku.....	28
Obr. 16: Spínání činitele jakosti Q resonátoru	28
Obr. 17: Otvírání dutiny	29
Obr. 18: Otvor v HDPE vrtán a) rotujícím vrtáčkem o $\phi 100 \mu\text{m}$, b) KrF laserem o $\phi 75 \mu\text{m}$ [25]	31
Obr. 19: Princip úběru materiálu při vrtání [7]	32
Obr. 20: Jednorázové vrtání (vlevo) a nárazové vrtání (vpravo)	32
Obr. 21: Princip trepanace	33
Obr. 22: Princip spirálovitého vrtání	33
Obr. 23: Princip značení součástí: a) přes masku 1 - laser, 2 - maska, 3 - objektiv pro zaostření paprsku, 4 - obrobek; b) vychylováním paprsku 1 - laser, 2,3 vychylovací zrcadla, 4 objektiv, 5 - obrobek [6]	35
Obr. 24: Tmavění povrchu.....	36
Obr. 25: Zesvětlení povrchu	37
Obr. 26: Schéma laserového rytí.....	37

<i>Obr. 27: Schéma laserového odtavování</i>	38
<i>Obr. 28: Typy kopolymerních řetězců</i>	40
<i>Obr. 29: Schematické znázornění molekul lineárního (a), rozvětveného (b) a sesíťovaného polymeru (c)</i>	40
<i>Obr. 30: Probíhající děje při polymeraci</i>	42
<i>Obr. 31: Schematické znázornění vzorku</i>	50
<i>Obr. 32: Náhled na zhotovené vzorky</i>	50
<i>Obr. 33 Laser výrobce LaserPro Mercury L30</i>	51
<i>Obr. 34: Mitutoyo Linear Height Gage LH-600D</i>	52
<i>Obr. 35: Schéma chyby vzniklé velkou nerovností povrchu</i>	53
<i>Obr. 36: Tvrdoměr Affri DM-2 D</i>	53
<i>Obr. 37: Talysurf CLI 500</i>	54
<i>Obr. 38: Mitutoyo Surfest SJ-301</i>	55
<i>Obr. 39: Mikroskop ProScope HR</i>	56
<i>Obr. 40: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 50/40</i>	58
<i>Obr. 41: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 100/40</i>	59
<i>Obr. 42: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 50/80</i>	59
<i>Obr. 43: Graf srovnávající jednotlivé hodnoty měření při nastavení stroje 100/80</i>	60
<i>Obr. 44: Celkové srovnání naměřených hodnot</i>	61
<i>Obr. 45: Principiální schéma snímání povrchu konfokální sondou [30]</i>	63
<i>Obr. 46: Detail fokusace paprsku nad měřenou plochou</i>	63
<i>Obr. 47: Grafické znázornění odrazivosti kontrolovaného materiálu</i>	64
<i>Obr. 48: Znázornění orientace přístroje</i>	65
<i>Obr. 49: Profil před (a) a po (b) aplikací metody pro vyrovnání přímosti</i>	65
<i>Obr. 50: Pracovní prostředí programu Talymap</i>	66
<i>Obr. 51: a) primární profil povrchu s nefiltrovanou střední čarou, b) filtrovaná střední čára profilu drsnosti</i>	67
<i>Obr. 52: Stanovení Ra</i>	68
<i>Obr. 53: Stanovení Rt</i>	69
<i>Obr. 54: Stanovení Rz</i>	69
<i>Obr. 55: Stanovení nosné křivky [26]</i>	69
<i>Obr. 56: Ra plochy 50/40 [$s=533$ mm/s; $P=12$W]</i>	70
<i>Obr. 57: Rz plochy 50/40 [$s=533$ mm/s; $P=12$W]</i>	71

<i>Obr. 58: Rt plochy 50/40 [s=533mm/s; P12W]</i>	71
<i>Obr. 59: Abbott - Firestenovy křivky (křivka nosného podílu)</i>	72
<i>Obr. 60: PA 66</i>	73
<i>Obr. 61: PC</i>	73
<i>Obr. 62: PP</i>	73
<i>Obr. 63: PTFE</i>	74
<i>Obr. 64: NR</i>	74
<i>Obr. 65: NBR</i>	74
<i>Obr. 66 NR-SBR</i>	75
<i>Obr. 67: Vývoj parametrů drsnosti materiálu PVC</i>	75
<i>Obr. 68: Abbott - Firestonovy křivky pro PVC</i>	76
<i>Obr. 69: 2D povrch PVC získaný přístrojem Talysurf</i>	76
<i>Obr. 70: 3D povrch PVC získaný přístrojem Talysurf</i>	77
<i>Obr. 71: PVC 50/40 [s=533mm/s; P=12W]</i>	77
<i>Obr. 72: PVC 50/80 [s=533mm/s; P=24W]</i>	78
<i>Obr. 73: PVC 100/40 [s=1066mm/s; P=12W]</i>	78
<i>Obr. 74: PVC 100/80 [s=1066mm/s; P=24W]</i>	78
<i>Obr. 75: Vickersova zkoušky + deformace vtisku [21]</i>	82
<i>Obr. 76: Schematický postup zkoušky</i>	82
<i>Obr. 77: a) tvar jehlanu podle Knoopu b) tvar vtisku [21]</i>	83
<i>Obr. 78: Povrch PC s procesními podmínkami a) 50/40 [s=533 mm/s; P=12W], b) 100/40[s=1066mm/s; P=12W], c) 100/80 [s=1066mm/s; P=24W]</i>	84
<i>Obr. 79: Vyhodnocení výsledků</i>	85
<i>Obr. 80: Detail vtisku do matrice</i>	85
<i>Obr. 81: 100/80 [s=1066mm/s; P=24W]</i>	86
<i>Obr. 82: 100/40 [s=1066mm/s; P=12W]</i>	86
<i>Obr. 83: 50/80 [s=533mm/s; P=24W]</i>	86
<i>Obr. 84: 50/40 [s=533mm/s; P=12W]</i>	87
<i>Obr. 85: PA</i>	88
<i>Obr. 86: PC</i>	89
<i>Obr. 87: PMMA</i>	89
<i>Obr. 88: PP</i>	90
<i>Obr. 89: PTFE</i>	90

<i>Obr. 90: PVC</i>	91
<i>Obr. 91: NBR</i>	91
<i>Obr. 92: NR</i>	92
<i>Obr. 93 : NR-SBR</i>	92
<i>Obr. 94: PMMA</i>	93
<i>Obr. 95: PP</i>	94
<i>Obr. 96: PC</i>	94
<i>Obr. 97: PTFE</i>	95
<i>Obr. 98: PVC</i>	95
<i>Obr. 99: NBR</i>	96
<i>Obr. 100: NR</i>	96
<i>Obr. 101: NR-SBR</i>	97

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Dělení technologií ad 1.[6]</i>	14
<i>Tab. 2: Posouzení vhodnosti použití technologie pro různé druhy materiálu[14]</i>	15
<i>Tab. 3: Technologické parametry vybraných metod obrábění [14]</i>	15
<i>Tab. 4: Použité polymery a jejich rozdělení</i>	45
<i>Tab. 5: Charakteristické schéma použitých polymerů</i>	46
<i>Tab. 6: Vlastnosti použitých polymerů [28]</i>	47
<i>Tab. 7: Technická specifikace</i>	51
<i>Tab. 8: Parametry použitého výškoměru</i>	52
<i>Tab. 9: Parametry použitého tvrdoměru</i>	54
<i>Tab. 10: Technická specifikace</i>	55
<i>Tab. 11: Technická specifikace</i>	56
<i>Tab. 12: Vybraná pracovní nastavení</i>	57
<i>Tab. 13: Naměřené hloubky opracování</i>	58
<i>Tab. 14: Parametry měření 2D</i>	64
<i>Tab. 15: Parametry měření 3D</i>	66
<i>Tab. 16: Parametry měření</i>	67
<i>Tab. 17: Charakteristiky drsnosti ČSN ISO EN 4289:1999</i>	68
<i>Tab. 18: Zkušební zatížení pro Vickersovu zkoušku</i>	82
<i>Tab. 19: Zkušební zatížení pro Knoopovu zkoušku</i>	83
<i>Tab. 20: Výsledky měření mikrotvrdosti materiálu PVC</i>	84
<i>Tab. 21: Hodnocení jakosti povrchu</i>	98