

Výzkum vlivu jakosti povrchu formy na jakost polymerních výrobků

Bc. Jiří Mrlík

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Baťa ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Mrlík

Osobní číslo: T12459

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Výrobní inženýrství

Forma studia: prezenční

**Téma práce: Výzkum vlivu jakosti povrchu formy na jakost
polymerních výrobků**

Zásady pro vypracování:

- 1) Popište základní druhy dokončovacích operací a integritu povrchu po obrábění.**
- 2) Popište technologii vstřikování.**
- 3) Provedte návrh a výrobu tvarových dutin vstřikovací vložky.**
- 4) Určete vliv jakosti povrchu formy na jakost povrchu výrobků.**
- 5) Porovnejte ekonomickou výhodnost.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Čop

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: MRLÍK JIŘÍ

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 1.5.2014



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce pojednává o vlivu jakosti povrchu formy na jakost polymer-
ních výrobků.

Teoretická část obsahuje souhrn z oblasti dokončovacích metod a jejich rozdělení, integritu
povrchu, vyhodnocování jakosti povrchu a popis technologie vstřikování včetně vstřikova-
cího stroje a formy.

V praktické části se práce zabývá popisem výroby tvarových vložek vstřikovací formy a
dokončením funkčních ploch. Následně byly tyto vložky použity k experimentu. Poslední
část obsahuje vyhodnocení výsledků měření.

Klíčová slova: jakost povrchu, vstřikování, dokončovací operace

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on influence of mold surface quality on the surface quality
of polymer products. The theoretical part includes summary of cutting finishing methods,
dividing them, integrity of surface, appraisal of surface quality and description of injection
technology including injection mold and injection machine. Practical part is about descrip-
tion of manufacturing shaped mold inserts and cutting finishing their surfaces. The shaped
mold inserts were subsequently in experiment. Last part includes evaluation of measured
results.

Key words: surface quality, injection, cutting finishing methods

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Čopovi za odborné vedení, věcné připomínky a věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Šálkovi a panu Ing. Vladimíru Šumberovi za odbornou pomoc při realizaci praktické části práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 DOKONČOVACÍ OPERACE	12
1.1 DOKONČOVACÍ OPERACE NÁSTROJI S DEFINOVANOU GEOMETRIÍ NÁSTROJE	12
1.1.1 Jemné frézování	12
1.1.2 Jemné soustružení	13
1.1.3 Vystružování	14
1.2 DOKONČOVACÍ OPERACE NÁSTROJI S NEDEFINOVANOU GEOMETRIÍ NÁSTROJE	15
1.2.1 Broušení	15
1.2.2 Honování	18
1.2.3 Superfinišování	20
1.2.4 Lapování.....	22
1.2.5 Leštění	23
1.3 TVÁŘECÍ DOKONČOVACÍ METODY	25
1.3.1 Válečkování.....	25
1.3.2 Kuličkování	27
1.3.3 Vyhlazování	28
1.3.4 Protahování – kalibrování	28
1.4 NEKONVENČNÍ METODY DOKONČOVÁNÍ	29
1.4.1 AJM.....	30
1.4.2 AFM	32
1.4.3 Chemické leštění	33
1.4.4 Elektrochemické honování.....	34
1.4.5 Elektrochemické leštění	34
1.4.6 ECG.....	34
1.4.7 LBM	35
2 VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	37
2.1 INTEGRITA POVRCHU	37
2.1.1 Drsnost povrchu	38
2.1.2 Geometrická přesnost.....	41
2.1.3 Tvrdost	42
2.1.4 Struktura materiálu	42
2.1.5 Opaly a trhliny.....	42
2.1.6 Zbytková napětí.....	43
2.2 METODY MĚŘENÍ JAKOSTI POVRCHU	43
2.2.1 Dotykové měření jakosti povrchu	43
2.2.2 Bezdotykové měření jakosti povrchu.....	45
3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	47
3.1 PRINCIP VSTŘIKOVÁNÍ.....	47
3.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	50
3.2.1 Plastikační a vstřikovací jednotka.....	50
3.2.2 Uzavírací jednotka	56
3.2.3 Vstřikovací forma.....	57

II PRAKTICKÁ ČÁST	61
4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	62
5 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE	63
5.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 470H 1000-400	63
5.2 VSTŘIKOVACÍ FORMA	64
5.3 SUŠIČKA GRANULÁTU ARBURG THERMOLIFT 100-2	65
5.4 SOUSTRUH TOS ŽEBRÁK S32	66
5.5 UNIVERZÁLNÍ FRÉZKA FHV-50PD	67
5.6 ROVINNÁ BRUSKA BRH 20.03F	68
5.7 DRSNOMĚR MITUTOYO SURFTTEST SJ-201	69
5.8 MATERIÁLY	70
5.8.1 Tvarové vložky vstřikovací formy	70
5.8.2 Vstřikované materiály	73
6 NÁVRH A VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK.....	75
6.1 POSTUP VÝROBY VLOŽKY	76
6.2 POSTUP VÝROBY FUNKČNÍ PLOCHY	77
6.2.1 Ocel EN 1.2343 (ČSN 19 552)	77
6.2.2 Měď EN CW004A	79
6.2.3 Dural EN AW-7075:	80
6.3 ZNAČENÍ VLOŽEK	82
7 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	83
8 MĚŘENÍ DRSNOSTI VZORKŮ.....	85
9 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	86
9.1 OCELOVÁ TVAROVÁ VLOŽKA	87
9.1.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra	87
9.1.2 Vyhodnocení parametru drsnosti Rz	89
9.2 DURALOVÁ TVAROVÁ VLOŽKA	91
9.2.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra	91
9.2.2 Vyhodnocení parametru drsnosti Rz	93
9.3 MĚDĚNÁ TVAROVÁ VLOŽKA.....	95
9.3.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra	95
9.3.2 Vyhodnocení parametru drsnosti Rz	97
10 ZÁVĚR.....	99
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	101
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	103
SEZNAM OBRÁZKŮ	104
SEZNAM TABULEK.....	107

ÚVOD

Úspěch výrobní společnosti v konkurenčním boji závisí na snaze vyrábět své produkty za co nejnižší cenu, ale při dodržení požadované kvality. Dále tento úspěch závisí na schopnosti společnosti flexibilně reagovat na zákaznické potřeby a požadavky a to jak v kontextu kvality tak i požadovaného množství v různých termínech dodání. Tyto okolnosti nutí společnosti zkracovat výrobní proces při dodržení kvality vyrobených dílců.

K masivnímu rozšíření plastových výrobků dochází od druhé poloviny 20. století, zejména díky jejich vlastnostem jako jsou odolnost proti korozi, nízká hmotnost, vysoká chemická odolnost aj. Mezi další výhody patří možnost vytvořit v jednom kroku tvarově složitý výrobek, který by se jinou technologií špatně vyráběl. S tím je spojen i rychlý vývoj samotných výrobních technologií. Jsou kladeny čím dál větší nároky na kvalitu, životnost a zejména cenu výrobku. Dnešní náročný zákazník se již nespokojí pouze s kvalitním a levným výrobkem. Výrobek musí také dobře vypadat, vzhled totiž prodává. Tento postoj vede k vysokým nárokům jakosti funkčních ploch dutin vstříkovacích forem, což je v přímém rozporu s výslednou cenou výrobku. Ovšem vzhledem ke konkurenčnímu boji je časově a finančně nevhodné dokončovat tyto povrchy nad rámec, který vstříkovaný materiál nedokáže využít.

Proto se předkládaná diplomová práce zabývá vlivem jakosti povrchu formy na jakost polymerních výrobků. Cílem práce je zjistit, do jaké míry jsou polymerní materiály schopny kopírovat povrch dutiny formy. Výsledky mohou dopomoci určit k jakým technologickým metodám se ubírat při dokončování povrchů dutin vstříkovacích forem.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DOKONČOVACÍ OPERACE

Dokončovací metody slouží k odstranění nepřesností předchozích operací s předpokladem dodržení tvarových, rozměrových, kvalitativních a ekonomických požadavků na výrobek.

Cílem je zlepšení:

- jakosti povrchu,
- rozměrové přesnosti,
- geometrické přesnosti.

Použití dokončovacích metod funkčních ploch je velmi nákladné a často časově náročné. Hodnocení procesu výroby ukazuje, že více než polovinu výrobních nákladů zaujímá dokončovací operace.

Dokončovací metody obrábění funkčních ploch dělíme na:

- metody obrábění s definovanou geometrií nástroje
 - jemné soustružení, jemné frézování, zaškrabávání, protahování, atd.
- metody obrábění s nedefinovanou geometrií nástroje
 - broušení, honování, lapování, leštění, superfinišování, atd.
- tvářecí metody dokončování funkčních ploch
 - kuličkování, válečkování, hlazení diamantem, atd.
- nekonvenční metody dokončování
 - chemické, elektrické a paprskové metody obrábění.

1.1 Dokončovací operace nástroji s definovanou geometrií nástroje

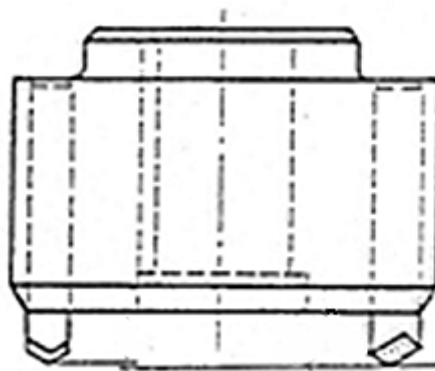
U těchto metod dokončování jsou důležité správně zvolené geometrické veličiny, vysoká řezná rychlost, malý průřez třísky a malá rychlost posuvu. Takto zvolené podmínky zajišťují lepší strukturu povrchu.

1.1.1 Jemné frézování

Jemné frézování je dokončovací metoda, při které je materiál obrobku odebírán břitem či břity otáčejícího se nástroje. Jedná se tudíž o třískové obrábění. Hlavní pohyb koná nástroj. Tento pohyb je otáčivý. Vedlejší pohyb koná obrobek, ale v některých případech může

veškeré pohyby konat nástroj. Posuv nejčastěji koná součást kolmo k ose nástroje. Moderní víceosé CNC frézky jsou schopny plynule měnit posuvné pohyby a hlavně jsou schopny tyto pohyby vykonávat ve všech směrech.

Pro tuto aplikaci se používá fréza s jedním nebo více zuby, na kterých je připevněna břitová destička, která je nejčastěji vyrobena ze slinutých karbidů nebo z polykrystalického nitridu boru. Podoba čelní frézy se dvěma noži je vidět na Obr. 1. Nejvyšší jakost povrchu se dosahuje použitím frézy s jedním zubem. Zub frézky vytváří krátké třísky proměnné tloušťky, proto lze o řezném procesu říct, že je přerušovaný. Tato vlastnost vede ke zvýšené náchylnosti projevů chvění důsledkem kolísání řezných sil a nerovnoměrného zatížení stroje. [1]



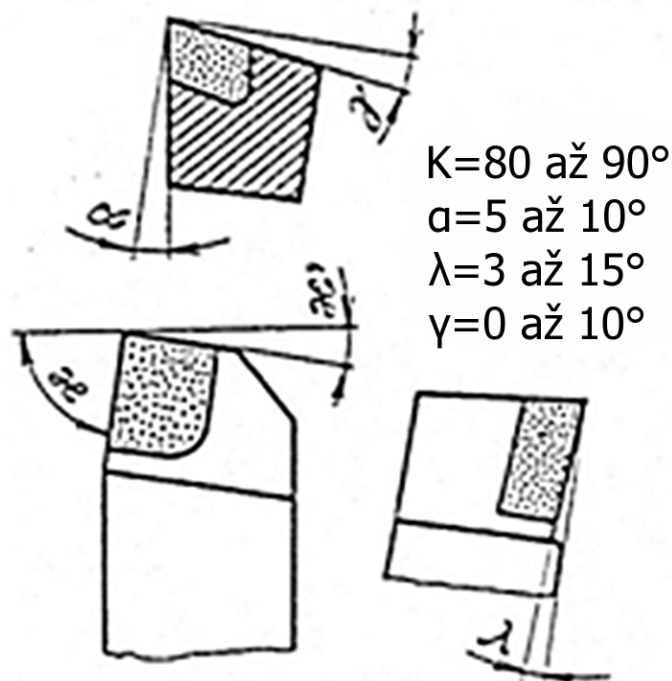
Obr. 1 Čelní fréza se 2 noži pro jemné frézování [7]

Podobně jako při jemném soustružení je i jemné frézování charakteristické úběrem malé hloubky třísky a malou posuvovou rychlostí. Hloubka třísky se pohybuje v rozmezí 0,03-0,1mm a doporučený posuv se pohybuje v rozmezí 0,04-0,08mm na zub. Jemným frézováním lze dosáhnout hodnot drsnosti $R_a = 0,4\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 7$. [7]

1.1.2 Jemné soustružení

Jedná se o třískové obrábění, nejčastěji jednobřítým nástrojem vyrobeným ze slinutých karbidů nebo diamantu. Stejně jako při hrubovacím soustružení i zde koná hlavní pohyb obrobek a tento pohyb je otáčivý. Pohyb nástroje je potom vedlejším pohybem. Charakteristickým znakem, oproti klasickému soustružení, je použití vyšších řezných rychlostí společně s úběrem malého průřezu třísky a malým posuvem. Dále se liší nástrojové úhly od nástrojových úhlů klasického soustružení, zejména úhel nastavení hlavního a vedlejšího

ostří $\chi=80-90^\circ$. Velikost jednotlivých nástrojových úhlů u jemného soustružení je zachycena na Obr. 2. Běžný soustružnický nůž má úhel χ okolo 60° .



Obr. 2 Nůž pro jemné soustružení [7]

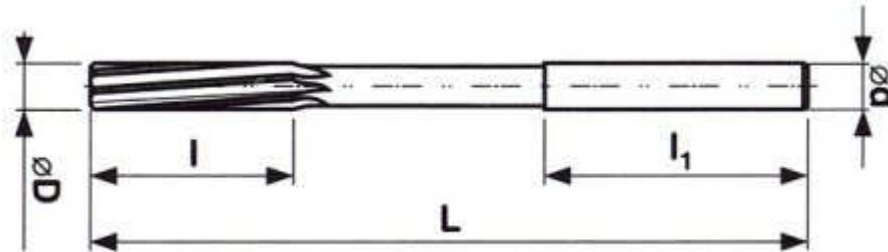
Obráběný povrch musí být již předobroben. Přídavek na jemné soustružení je 0,15-0,25mm při použití nástroje ze slinutých karbidů nebo 0,02-0,25mm při použití diamantového nástroje. Posuvová rychlost se doporučuje volit v rozmezí 0,02-0,1mm/otáčka. Přídavek se odebrává na jeden záběr, a tudíž lze tuto metodu označit za ekonomicky výhodnou.

Jemným soustružením lze dosáhnout hodnot drsnosti $R_a = 0,2\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 5-7$. [7]

1.1.3 Vystružování

Vystružování se provádí na předpřipravených dírách. Během vystružování dochází k úběru materiálu po malých vrstvách. Výsledná díra má požadovaný geometrický tvar, přesný rozměr a vysokou jakost povrchu. Lze vystružovat díry válcové i kuželové. Vystružování je možné rozdělit na ruční vystružování a strojní vystružování. Výstružník má za řeznou hranou úzkou fazetku, kterou kalibruje a vede nástroj. Aby nedocházelo k rozšíření díry či ke zhoršení povrchu uvnitř díry, je ke konci nástroje postupně zvětšován jeho průměr. Výstružníky mohou mít různou podobu. Jednou z nich je výstružník s válcovou stopkou na Obr. 3.

Vystružování převládá v hromadné výrobě. V kusové výrobě se více používá vyvrtávání. Jestliže jsou nároky na výsledné parametry drsnosti a přesnosti díry vysoké, předchází vystružování ještě vyhrubování pomocí výhrubníku.



Obr. 3 Výstružník s válcovou stopkou

Přídavky na vystružování závisí na požadované výsledné přesnosti a drsnosti, ale také na materiálu obrobku. Podle velikosti díry se pohybuje v rozmezí 0,1-0,4mm. Vystružováním je možné dosáhnout hodnot drsnosti $R_a = 0,4\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 5-7$. Při použití výstružníků s jednou řeznou hranou lze dosáhnout až drsnosti $R_a = 0,15\mu\text{m}$. [7]

1.2 Dokončovací operace nástroji s nedefinovanou geometrií nástroje

Uložení zrn nástrojů s nedefinovanou geometrií je buď volně, nebo vázaně. V obou případech jsou zrna statisticky rozložena, proto nelze určit jejich geometrii řezání jinak než statisticky. Broušící zrna jsou minerály s tvary mnohostěnů o rozměrech 0,003-3mm. Broušící zrna, která jsou vázána pojivem, tvoří broušící, lapovací a honovací nástroje. Tyto nástroje jsou tedy složeny z velkého množství broušících zrn, která dohromady tvoří pevný celek s velkými póry.

Na začátku procesu broušící zrno vniká do materiálu tak, že zrno nejprve pružně a poté plasticky deformuje povrch materiálu. Jelikož je úhel mezi obrobkem a čelem zrna malý, nemůže zpočátku vzniknout tříška. Deformovaný materiál obtéká zrno. Tím dochází ke zpětnému toku materiálu k hřbetní ploše nástroje. Tříška se začne vytvářet až při dosažení kritické hloubky řezu. [3]

1.2.1 Broušení

Technologie broušení se uplatňuje v oblastech obrábění, kde jsou vyšší požadavky na přesnost rozměrů, tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení používá při obrábění materiálů, které není možné obrobit jinými metodami nebo v případech, kdy je broušící metoda hospodárnější než jiné metody obrábění. Broušením lze také dokončovat povrchy obrobků.

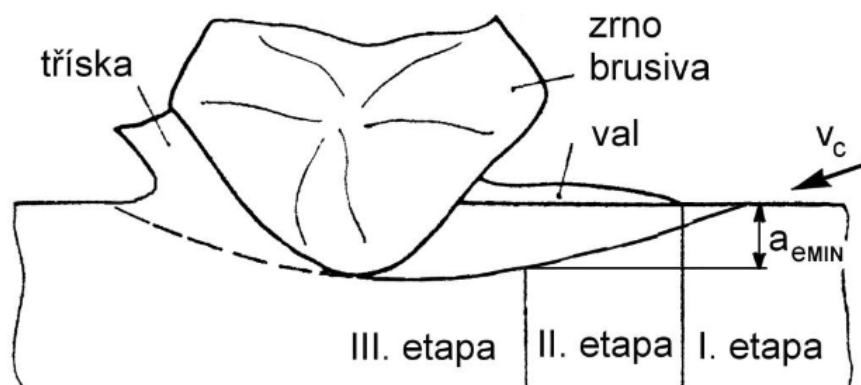
Broušení se od frézování liší zejména různorodostí geometrického tvaru broušicích zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše broušicího nástroje (nedefinovaná geometrie nástroje). Úhel čela zrn není neměnný a bývá většinou záporný. Broušicí proces se provádí při vysokých řezných rychlostech (30 až $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a při malých průřezech třísky (10^{-3} až 10^{-5} mm^2).

Od způsobů obrábění, které používají nástroj s definovanou geometrií, se práce brusného kotouče liší schopností tzv. samoostření. Tato vlastnost souvisí se slabými vazbami ukotvení broušicího zrna ve vazbě kotouče. Na otupené zrno začne působit zvýšená řezná síla, která toto zrno vylomí a jeho funkci zastane nové dosud neotupené zrno.

Běžným broušením lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0,4\text{--}1,6\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 5\text{--}7$. Při jemném broušení lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0,1\text{--}0,4\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 3\text{--}5$.

Vznik třísky

Při broušení vnikají zrna brusiva do odebírané vrstvy materiálu a tím je dosahováno žádaného tvaru, rozměrů a jakosti povrchu obrobku. Po určité době a odebrání určité vrstvy materiálu, začne docházet k odřezávání částic materiálu v podobě třísek. Proces broušení je možno rozdělit do tří etap, jak lze vidět na Obr. 4.



Obr. 4 Vznik třísky při broušení [22]

- I. etapa** – nástroj narazí do obráběné plochy a zrna brusiva po ní začnou klouzat; tato etapa je doprovázena vznikem tepla a pružné plastické deformace;
- II. etapa** – brusné zrno vytváří na povrchu obrobku rýhu, tím se zvětšuje tloušťka vrstvy kovu připadajícího na dané zrno a na okrajích rýhy se tak tvoří tzv. val; v této etapě se teplota zvyšuje pouze lokálně, síly působící na zrno se zvětšují a vzniká plastická deformace;

- III. etapa** – velikost řezné síly působící na vrstvu čelem zrna brusiva již dosahuje takové velikosti, že zrno brusiva proniká do větší hloubky obráběného materiálu, ve kterém posouvá částice kovu a tím dochází k oddělování materiálu a následnému vzniku třísky; i v této poslední etapě nastává plastická deformace, která zapříčiňuje usmýknutí částic kovu. [22]

Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření rozlišujeme:

- rovinné broušení (výsledkem je rovinná plocha),
- broušení do kulata (výsledkem je rotační povrch),
- broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem),
- tvarovací broušení (broušení závitů, ozubených kol apod.),
- kopírovací broušení (broušení s řízenou změnou posuvu, NC stroje),
- broušení tvarovými brusnými kotouči (profil brusného kotouče určuje konečný profil obrobku). [1]

Podle aktivní části broušícího kotouče se specifikuje:

- obvodové broušení (broušení obvodem kotouče),
- čelní broušení (broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose).

Podle vzájemné polohy broušícího kotouče a obrobku se charakterizuje:

- vnější broušení (broušení vnějšího povrchu obrobku),
- vnitřní broušení (broušení vnitřního povrchu obrobku).

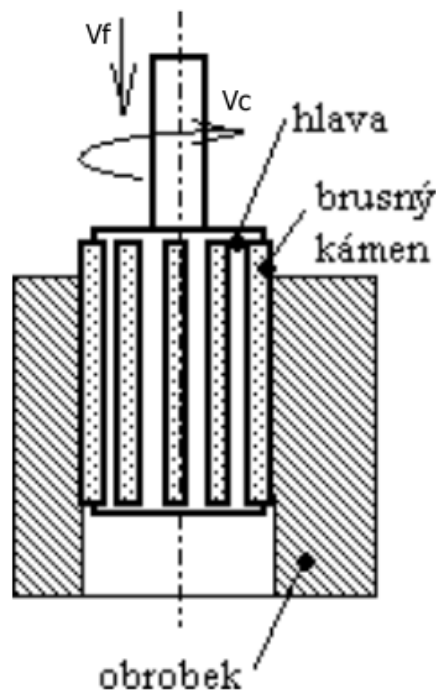
Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k broušícímu kotouči (termínem „stůl“ se označuje pohyblivá část broušícího stroje vzhledem k jeho základu, na stůl brusky se upevňuje obrobek nebo broušící vřeteník) se definuje:

- axiální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče),
- tangenciální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D),
- radiální broušení (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči),
- obvodové zápichové broušení (posuv stolu je plynulý radiální),
- čelní zápichové broušení (posuv stolu je plynulý axiální). [1]

1.2.2 Honování

Honování je dokončovací metoda obrábění, při které je jakost obrobků zvyšována řezným účinkem jemného brusiva. Nejčastější použití této metody lze nalézt při dokončování vnitřních válcových ploch (vnitřní honování). Honováním se dokončují hydraulické, pneumatické a brzdové válce, válce spalovacích motorů, bubny, pouzdra, ložiska vřeten apod. Honovat lze kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky a další materiály.

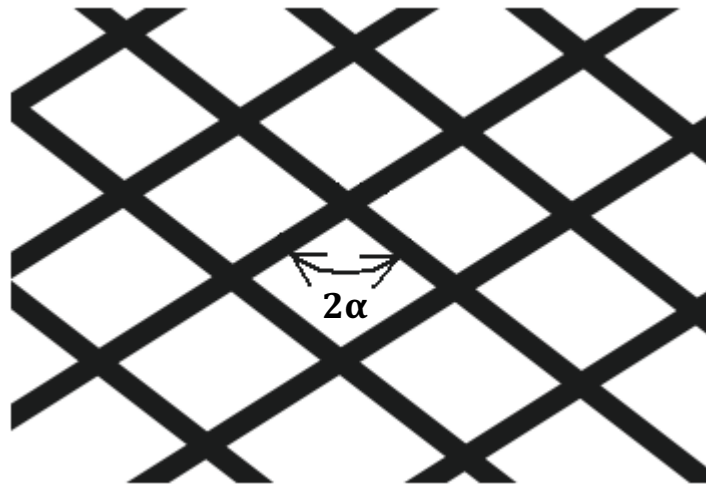
Jedná se o broušení malou rychlostí jemným brusivem vázaným v honovacích kamenech (lištách), které jsou upevněny v honovací hlavě. Při tomto procesu se intenzivně používají řezné kapaliny. Během honování vnitřních ploch vykonávají honovací kameny v díře složený šroubovitý pohyb, který je složen z kombinace rotačního a posuvného vratného pohybu honovací hlavy ve směru osy. Dráhy zrn brusiva se přitom překrývají a na dokončovaném povrchu se objevují charakteristické křížové stopy. Obr. 5 je grafickým vyjádřením principu honování.



Obr. 5 Princip honování [2]

Je možné honovat válcové díry průchozí i neprůchozí, s drážkami různých tvarů a velikostí, v rozsahu průměrů 1 až 750 mm a délek až 24 m a s použitím přídatného zařízení i kuželové díry. Mezi přednosti honování patří dosažení vysoké přesnosti geometrického tvaru.

Lze jím, v rozsahu přídávku, odstranit kuželovitost, ovalitu a soudkovitost, nelze však změnit polohu osy díry. [1]



Obr. 6 Stopy po honování – křížové stopy

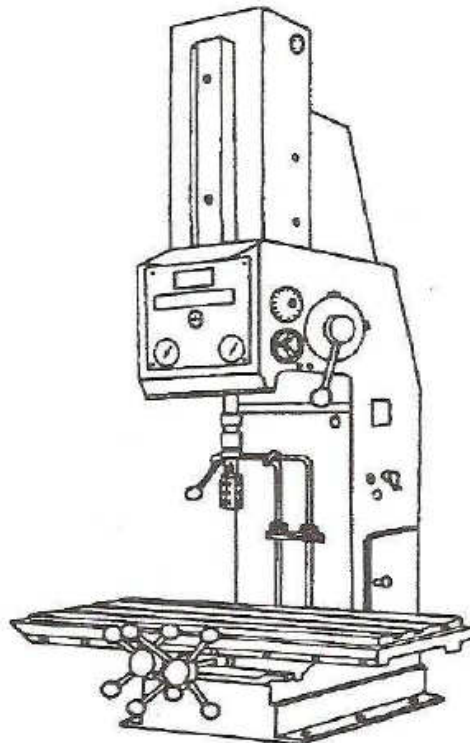
Úhel 2α na Obr. 6 charakterizuje křížové stopy po honování. Velikost úhlu α se pohybuje v rozmezí $20-55^\circ$. Nejprve se hrubuje při vyšších hodnotách α a poté následuje dokončovací honování, při kterém se volí nižší hodnoty α . Velikost úhlu α se vypočte následovně:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_f}{v_c} \quad (1)$$

Kde: v_f – rychlost posuvu [m/min],

v_c – řezná rychlost [m/min].

Honování je prováděno honovacími stroji viz Obr. 7. Přídavek na honování se podle obráběného materiálu pohybuje v rozmezí $0,02-0,08\text{mm}$. Honováním lze dosáhnout drsnosti povrchu $R_a = 0,1\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 3-5$. [2]

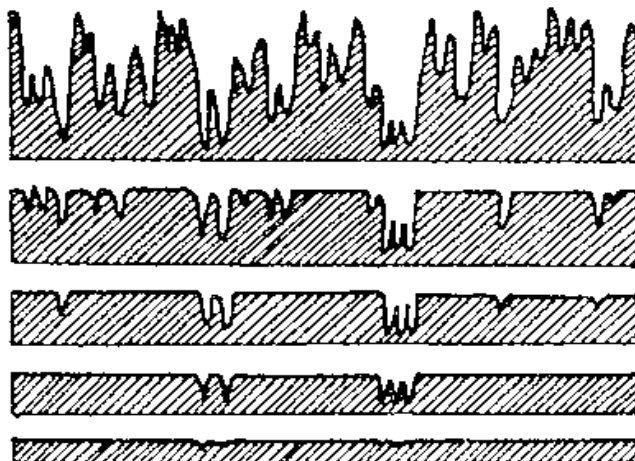


Obr. 7. Svislý jednovřetenový honovací stroj [1]

1.2.3 Superfinašování

Superfinašování je dokončovací metoda obrábění, kterou lze označit jako vysoce produktivní. Touto technologií je možné dokončovat vnější a vnitřní rotační, tvarové i rovinné plochy. Převážně se používá pro dokončování valivých ložisek a součástí v automobilovém průmyslu. Superfinašovat je použitelné u obrobků z kalené i nekalené oceli, litiny, slitin těžkých kovů a plastů.

Superfinašování je zvláštní druh broušení, při kterém se odbrušují vrcholky nerovností povrchu obrobku velmi jemnými zrný superfinašovacího kamene. Jak je vidět na Obr. 8, v průběhu superfinašovacího procesu dochází ke zvětšování nosného podílu. Tato technologie je charakterizována kmitavým pohybem nástroje, silou vyvolávající malý tlak na plochu obrobku a malými reznými rychlostmi. Charakteristiky superfinašování jsou vyjádřeny v kinematickém schématu na Obr. 9.



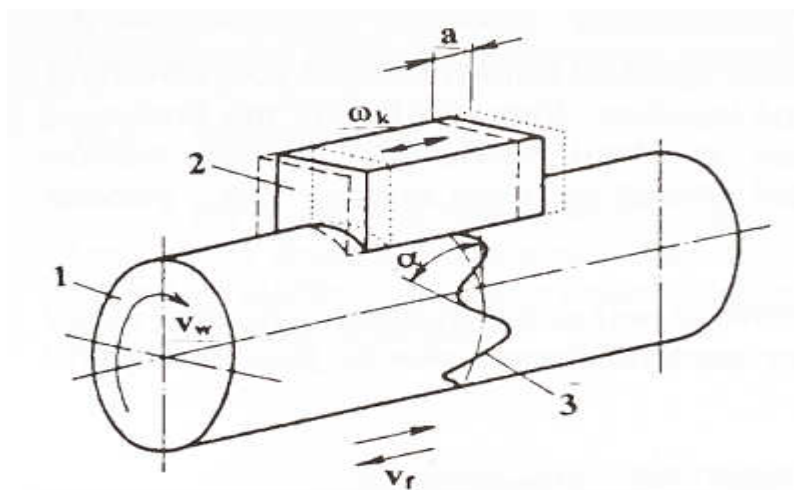
Obr. 8. Průběh superfinišovacího procesu
– zvětšování nosného podílu [1]

Podobně jako u honování, tak i u superfinišování vytváří nástroj křížové stopy, které charakterizuje úhel α . Úhel α je funkcí rychlosti podélného posuvu obrobku a rychlosti otáčení obrobku podle vztahu:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_f}{v_w} \quad (2)$$

Kde: v_f – rychlost kmitavého pohybu,

v_w – rychlost otáčení obrobku.



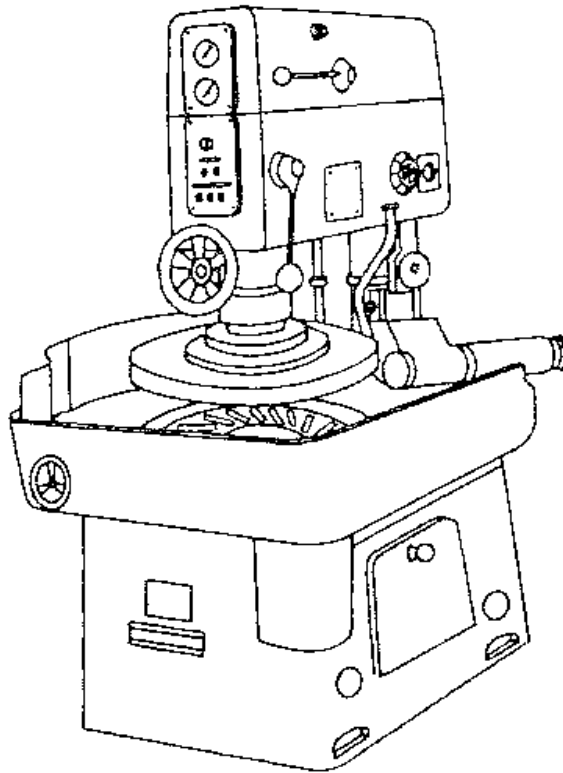
Obr. 9. Schéma kinematiky superfinišování [1]

1 – obrobek; 2 – superfinišovací kámen; 3 – stopa po jednom zrně brusiva; v_w – rychlost otáčení obrobku; v_f – rychlost podélného posuvu obrobku; a – amplituda; ω_k – frekvence kmitavého pohybu; α – úhel sklonu stopy po jednom zrně brusiva

Superfinašovací kameny obsahují brusivo z umělého korundu, karbidu křemíku, diamantu nebo kubického nitridu bóru. Přídavek na superfinašování se pohybuje okolo $10\mu\text{m}$. Touto technologií lze dosáhnout drsnosti povrchu $Ra = 0,01\mu\text{m}$ a stupně přesnosti až $IT = 2$. [2]

1.2.4 Lapování

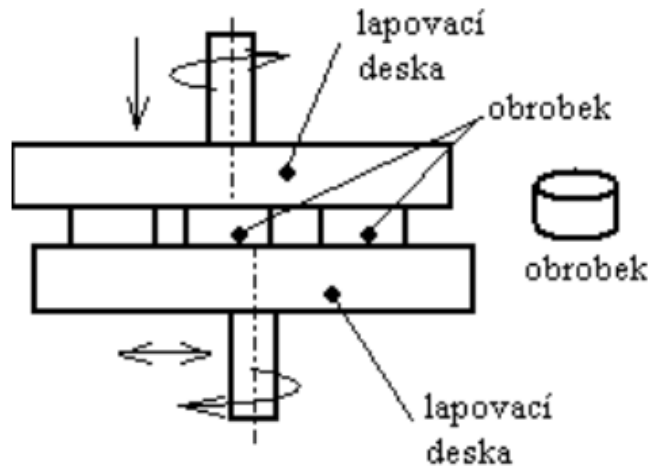
Lapování je dokončovací metoda obrábění, po které obrobek dosahuje nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Tuto metodu lze použít pro dokončování rovinných, válcových a tvarových vnějších tak i vnitřních ploch. Lapování provádí speciální lapovací stroje. Jedním z nich je svislý lapovací stroj na Obr. 10. Lapují se funkční plochy měřidel (koncové měrky, kalibry), důležitá závitová spojení, ozubení, součásti motorů automobilů apod. Lapováním lze ručně dokončovat měkké i tvrdé materiály v kusové výrobě, strojně potom v sériové a hromadné výrobě. [1]



*Obr. 10. Svislý lapovací stroj pro lapování
vnějších válcových a rovinných ploch [2]*

Jedná se o zvláštní druh broušení, při kterém dochází působením volného brusiva k úběru materiálu. Z principu lapování na Obr. 11 je zřejmé, že během lapování se vzájemně pohybuje lapovací nástroj a obrobek. Mezi ně je přiváděno brusivo. Při použití měkkých lapovacích nástrojů může dojít k zamačkání či k jinému upevnění zrn brusiva do nástroje. La-

povací nástroje kopírují povrch obrobku – lapovací plochy mají negativní tvar obrobku. Mezi nevýhody této technologie patří velká pracnost, malá produktivita a s tím spojené vysoké náklady na jednotku obrobeneé plochy. Z těchto důvodů se všude, kde je to možné, nahrazuje lapování honováním nebo superfinišováním.



Obr. 11. Princip lapování [1]

Jako brusivo se používá korund, karbid křemíku, diamant, kubický nitrid bóru, Cr_2O_3 . Přídavek na lapování se podle obráběného materiálu pohybuje v rozmezí 60-30 μm . Lapováním lze dosáhnout drsnosti povrchu $R_a = 0,005\mu\text{m}$ a přesnosti IT = 1. [1]

1.2.5 Leštění

Jedná se o dokončovací operaci, pomocí které jsou odstraňovány drobné nerovnosti, je docílen zrcadlový lesk a vysoká kvalita obrobeneého povrchu. Oproti broušení jsou při leštění odstraňovány pouze vrcholky nerovností a probíhá tak pouze malý úběr materiálu.

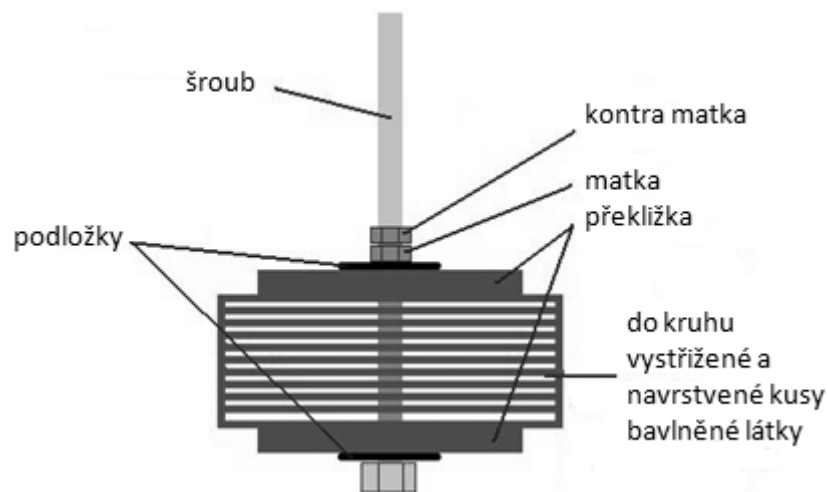
V praxi je možné se setkat s následujícími typy leštění:

- mechanické,
- chemické,
- elektrochemické.

Mechanické leštění

Materiál je z povrchu obrobku odebírán působením zrn tvrdých brousících materiálů. Zrna jsou buď pevně přichycena na leštícím nástroji, nebo jsou volně nanášena mezi nástroj a obrobek.

Existuje velké množství leštících kotoučů lišících se účelem a způsobem jejich použití. V praxi je tak možné se setkat např. s bavlněnými leštícími kotouči, které jsou určeny pro první dva stupně leštění většiny kovů. Dále také se sisalovými leštícími kotouči, které se využívají ke kartáčování a jemnému předlešťování nebo také s bavlněnými, vlněnými a plastovými stěrkami používanými převážně při odstraňování emulzí a zbytkových nečistot při válcování plechů. Základní upevnění leštících kotoučů na nosný šroub vystihuje Obr. 12. Na nosném šroubu jsou leštící kotouče umístěny mezi destičky z překližky a zafixovány pomocí matek.



Obr. 12 Leštící kotouč [22]

Na povrch kotoučů je, před samotným leštěním, nutné nanést např. některý z těchto prostředků: nanesení směsi a brusiva, přidání zrn brusiva do základního materiálu kotouče, nanesení leštících past,...

Leštěním pomocí kotoučů lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0,1-0,4\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 4-7$. Při leštění pásy lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0,1-0,4\mu\text{m}$ a stupně přesnosti $IT = 3-6$.

Chemické leštění

Podstatou chemického leštění je úběr materiálu působením roztoku na povrch obrobku. Vznikem chemické reakce na povrchu obrobku dochází k rovnoměrnému odebírání materiálu z vrcholů nerovností povrchu. Zdárný průběh chemického leštění ovlivňuje především míra očištění povrchu obrobku, složení a koncentrace roztoku, teplota roztoku, čas a množství kovu, které je v roztoku rozpuštěno.

Tento způsob leštění je účelně využíván při obrábění součástí složitých tvarů a pro jednoduhost zařízení a rychlost procesu leštění je zařazován v sériové i hromadné výrobě. Nevýhodou chemického leštění jsou vysoké pořizovací náklady výrobního zařízení a vysoké náklady spojené s regenerací roztoku.

Chemickým leštěním lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0,1-0,4\mu\text{m}$ a stupně přesnosti IT = 5–8.

Elektrochemické leštění

Při tomto typu leštění jsou vrcholky nerovností postupně elektrochemicky rozpouštěny. Obráběná součást představuje anodu ponořenou do elektrolytu, která je umístěna mezi katody. Takto je možné leštit rovinné, vnější i vnitřní rotační a tvarové plochy. Elektrochemickým leštěním lze obrábět předměty z celé řady materiálů, jako jsou např. slitiny hliníku, korozivzdorné oceli, kalené nástrojové oceli, konstrukční oceli, mosaz, bronz, atd.

Elektrochemickým leštěním lze dosáhnout drsnosti $R_a = 0,1-0,8\mu\text{m}$ a stupně přesnosti IT = 6–9. [22]

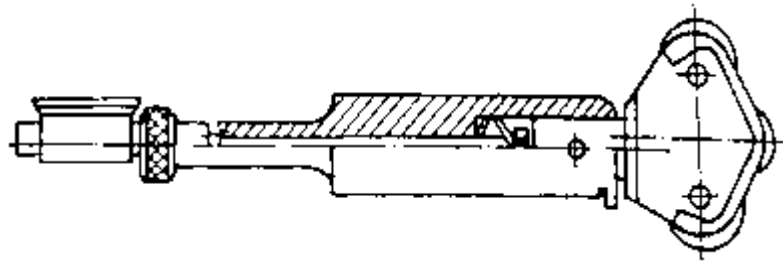
1.3 Tvářecí dokončovací metody

Tvářecí dokončovací metody obrobených povrchů využívají plastickou deformaci povrchové vrstvy. Plastická deformace probíhá do hloubky až několika desetin milimetrů. Tím dochází ke zlepšení struktury povrchu a ke zvýšení pevnosti a tvrdosti. V povrchové vrstvě vznikají tlaková napětí, čímž se zvýší mez únavy materiálu, jeho odolnost proti opotřebení a odolnost proti korozi. [2]

1.3.1 Válečkování

Statické válečkování

Během statického válečkování se odvaluje po dokončované ploše váleček. Výsledek válečkování ovlivňuje průměr válečku, protože válečky s menším průměrem zvyšují hloubku zpevnění. Naproti tomu válečky s větším průměrem sice nepůsobí do takové hloubky, ale vytváří povrch s nižší drsností. K válečkování slouží válečkovací hlava, na jejímž konci jsou umístěny jednotlivé válečky. Na Obr. 13 je jako příklad znázorněna válečkovací hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch.



Obr. 13. Válečkovací hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch [2]

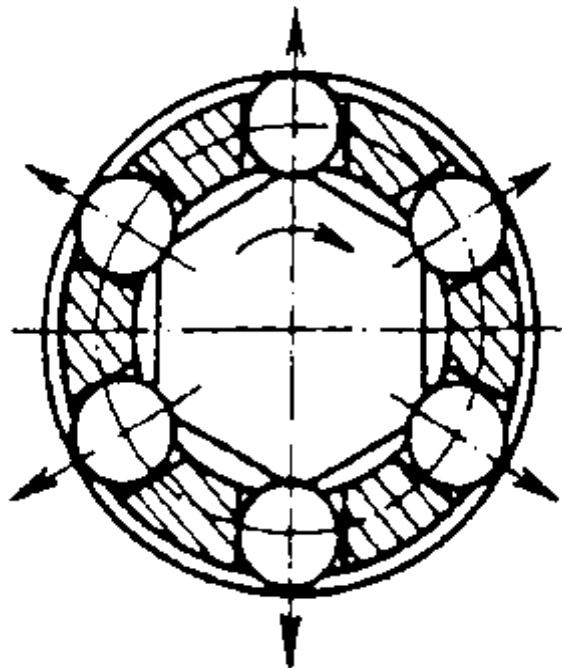
Pro tuto technologii se volí přídavek 0,01 až 0,03mm. Dosahovaná rozměrová přesnost je $IT = 6-8$ a drsnost povrchu $Ra = 0,1-0,4\mu\text{m}$.

Dynamické válečkování

Dynamické válečkování na Obr. 14 charakterizuje silový impulz vyvozený na váleček pomocí rotujícího trnu nebo kroužkem s vačkovými plochami uvnitř nástroje.

Předností dynamického válečkování je získání kvalitní zpevněné vrstvy.

Drsnost povrchu je horší oproti statickému válečkování. Při dynamickém válečkování se dosahuje $Ra = 0,2-0,8\mu\text{m}$. [2]



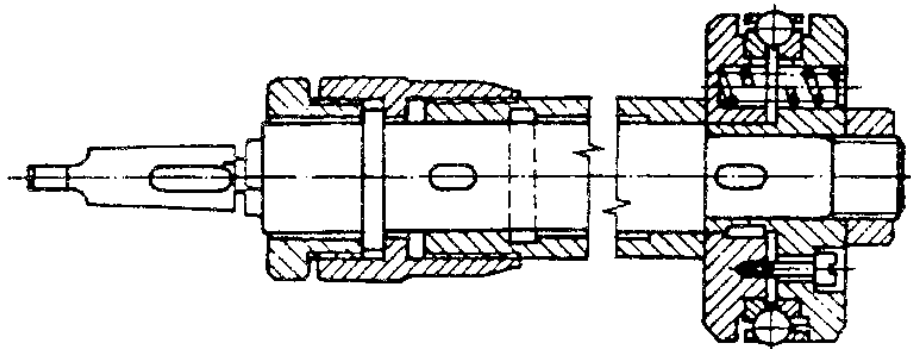
Obr. 14 Princip dynamického válečkování [2]

1.3.2 Kuličkování

Statické kuličkování

Statické kuličkování je podobné statickému válečkování, jen místo válečku je tvářecím nástrojem kulička. Ta je uložena v držáku nebo na kroužku tak, aby se plynule odvalovala po povrchu.

Touto technologií se dokončují vnější a vnitřní rotační plochy, tvarové rotační plochy a rovinné plochy u součástí z tvárných materiálů, jejichž pevnost nepřesahuje 1000MPa a tažnost dosahuje minimálně 12%. Jelikož je styková plocha kuličky menší než válečku, postačují k válečkování menší síly než v případě válečkování. Za nevýhodu lze považovat ochotu kuliček ke kopírování nerovností povrchu. Dosahovaná rozměrová přesnost je $IT = 6-8$ a výsledná drsnost povrchu $Ra = 0,1-0,4\mu\text{m}$. Jak lze vidět na Obr. 15, stejně jak u statického válečkování, tak i u statického kuličkování jsou kuličky upevněny na konci kuličkovací hlavy.



Obr. 15 Kuličkovací hlava pro statické kuličkování děr [1]

Dynamické kuličkování

Dynamické kuličkování nachází nejčastěji uplatnění pro zpevnění povrchové vrstvy tvarově složitých součástí, při kterém se na dokončovaný povrch vrhá proud kuliček o průměru 0,3 až 3mm z kalené oceli nebo bílé litiny rychlostí až $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dosahovaná drsnost povrchu $Ra = 0,8-1,6\mu\text{m}$.

Vibrační kuličkování

Vibrační kuličkování se podobně jako dynamické kuličkování používá pro dokončování tvarově složitých součástí. Technologie se provádí nárazy ocelových nebo litinových kuliček na součásti umístěné v nádobě, které je udělován kmitavý pohyb ve třech směrech.

1.3.3 Vyhlazování

Princip dokončovací metody vyhlazováním spočívá ve vzniku plastické deformace v povrchové vrstvě obrobku za studena. Plastická deformace v povrchové vrstvě rotujícího obrobku vzniká přitlačováním nástroje s kuželovou špičkou, o definovaném poloměru zaoblení, k jeho povrchu. Nástroj je k povrchu přitlačován konstantní silou. Na povrchu obráběné součásti se nacházejí výstupky a prohlubně. Tyto výstupky působením tlaku nástroje na povrchu součásti „tečou“ do prohlubně a dochází tak k vyhlazování povrchu.

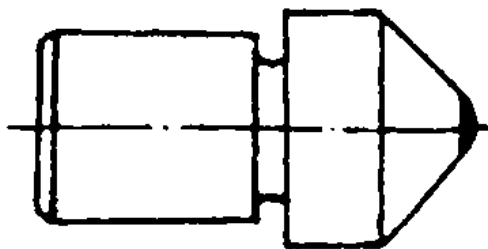
Nástroje pro vyhlazování jsou nejčastěji vyráběny z kalené oceli, slinutých karbidů, kubického nitridu bóru, ale také z diamantu. Působením tření dochází k zahřívání povrchu součásti a povrch je proto nutné chladit.

Vyhlazováním dochází ke zvyšování meze únavy materiálu součásti a zvyšování odolnosti součásti proti opotřebení a korozi. Při vyhlazování lze dosáhnout drsnosti povrchu

$R_a = 0,1-0,4\mu\text{m}$. [20]

Vyhlazování povrchu diamantem

Pro dokončení tepelně zušlechťených ocelí se používá vyhlazování povrchu diamantem. Podobu diamantového vyhlazovacího nástroje je znázorněna na Obr. 16. Na rozdíl od většiny beztrískových metod, v tomto případě nedochází k odvalování nástroje. Drsnost vyhlazené plochy dosahuje po jednom až třech průchodech až drsnosti povrchu $R_a = 0,2\mu\text{m}$. [1]

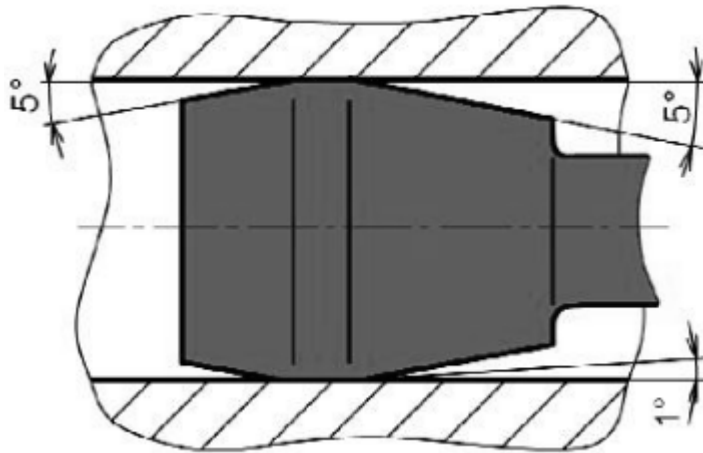


Obr. 16 Diamantový vyhlazovací nástroj [1]

1.3.4 Protahování – kalibrování

Protahování je dokončovací operací, při které dochází k dokončování již obrobených otvorů. Těmito otvory jsou protahovány tzv. trny, které jsou opatřeny zuby. Při protahování dochází k postupnému záběru jednotlivých zubů do obráběného materiálu. Poslední část trnu je kalibrační částí. Používají se, ale také samostatné kalibrační trny, jako je např. trn

na Obr. 17, které mají o několik tisícín milimetru větší průměr, než je průměr kalibrované díry.



Obr. 17 Speciální kalibrovací trn [20]

Na výrobu protahovacích trnů se využívají rychlořezné oceli nebo slitiny ocelí a pro zvýšení trvanlivosti se na funkční plochy zubů a kalibračních částí nanášejí tvrdé oteruvzdorné povlaky např. nitrid titanu. [21]

Výsledná díra má jen o několik tisíc větší průměr než měla před kalibrováním. Případná zbytková tahová napětí vzniklá předchozí operací se změní na tlaková, která jsou pro životnost obrobku mnohem výhodnější. Zároveň se zlepšením vzhledu díry a také se zlepší drsnost povrchu na $Ra=0,005-0,4\mu\text{m}$. [20]

1.4 Nekonvenční metody dokončování

Označení nekonvenční metody dokončování je používáno pro širokou škálu mechanických, elektrických, tepelných a chemických procesů úběru materiálu, které byly vyvinuty většinou po roce 1940. Oproti konvenčním metodám nezávisí v tomto případě úběr materiálu na jeho mechanických vlastnostech, jako jsou: tvrdost, pevnost, houževnatost. Těmito metodami se dají obrábět těžko nebo jinak neobrobitelné materiály. Při nekonvenční obrábění často v místě úběru nepůsobí žádná řezná síla, nevzniká řezný odpor a díky malému mechanickému zatížení během obrábění nedochází k deformaci obrobku. Jako nevýhodu oproti konvenčním metodám lze spatřovat velkou energetickou náročnost a malý úběr materiálu.

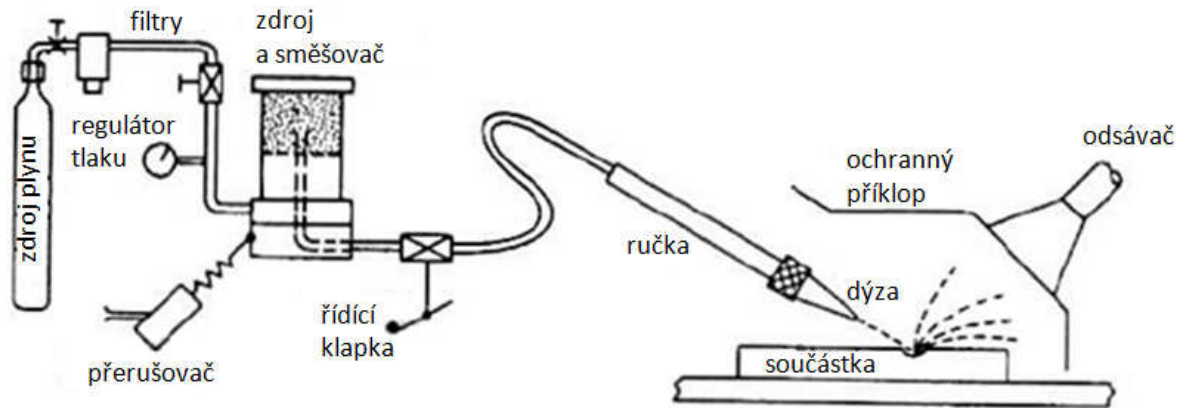
Dělení nekonvenčních metod:

- **mechanické**
 - USM obrábění ultrazvukem,
 - AJM, AFM obrábění proudem brusiva,
 - WJM, AWJM obrábění vodním paprskem,
- **chemické**
 - CM chemické obrábění,
 - PCM fotochemické obrábění,
- **elektrochemické**
 - ECM elektrochemické obrábění,
 - ECG elektrochemické broušení,
- **elektrotepelné**
 - EDM elektrojiskrové obrábění,
 - LBM obrábění laserem,
 - EBM obrábění paprskem elektronů,
 - IBM obrábění paprskem iontů,
 - PAM obrábění paprskem plazmy. [10]

Dále si popíšeme pouze technologie používané pro dokončování, protože ne všechny výše uvedené se k dokončení obrobku používají. Často následují ještě další operace.

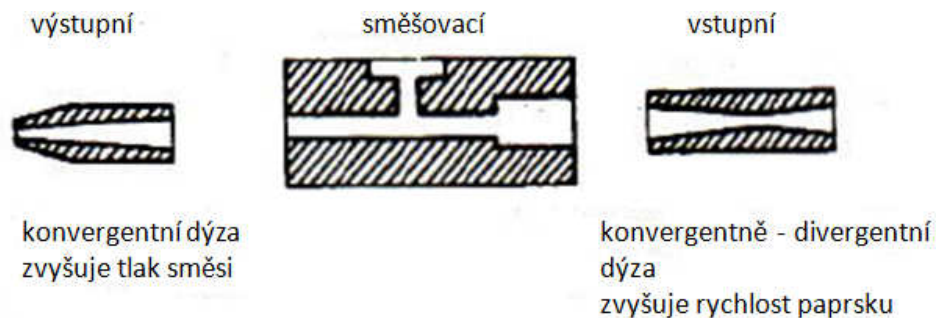
1.4.1 AJM

AJM, Abrasive Jet Machining, obrábění proudem volného brusiva patří k dokončovacím metodám ve výrobním procesu. Z Obr. 18 je zřejmý základní princip obrábění AJM, kdy volné abrazivní částice ve vysokorychlostním proudu stlačeného plynu naráží na povrch obrobku a tím dochází k úběru materiálu. Velikost abrazivních částic se pohybuje mezi 10–50 μ m. Pro leštění povrchu se volí menší abrazivní částice. Nejčastěji jsou na bázi taveného oxidu hlinitého Al_2O_3 a karbidu křemíku SiC. Rychlost částic při obrábění je mezi 150–300m/s.



Obr. 18 Princip ručního obrábění abrazivním paprskem [10]

Směs plynu a abrazivních částic prochází přes dýzu na obrobek. Ta se skládá ze tří částí - vstupní, směšovací a výstupní. Každá část má svou funkci a dopomáhá vzniku vysokorychlostního a vysokotlakého abrazivního paprsku. Konstrukce každé z částí dýzy, je patrná z průřezu rozložené dýzy na Obr. 19. Dýzy jsou vyrobeny z karbidu wolframu WC nebo ze syntetického safíru. Safírová dýza má oproti dýze z karbidu wolframu vyšší životnosti, ale i vyšší cenu.



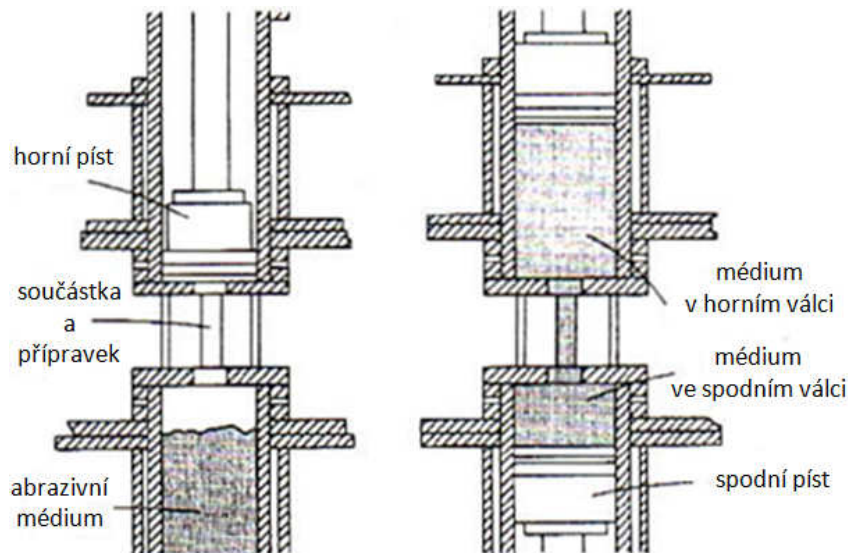
Obr. 19 Řez rozloženou dýzou [10]

Povrch opracovaný technologií AJM se vyznačuje matnou granulovanou strukturou. Dosažovaná drsnot povrchu R_a je v rozmezí $0,15\text{--}1,5\mu\text{m}$. Tato hodnota je ovlivněna velikostí zrna, druhem použitého prášku, velikostí otvoru dýzy a vzdáleností dýzy od povrchu součásti. Při tomto procesu nedochází k deformacím obrobku, protože na něj působí velmi malé síly. Tepelné působení na povrch součásti je minimální.

AJM se nejčastěji používá při opracování těžkoobrobitelných a křehkých materiálů jako je sklo a keramika. Dokončují se tak povrchy, vyřezávají plýtké tvary a otvory na poměrně malých plochách. [10]

1.4.2 AFM

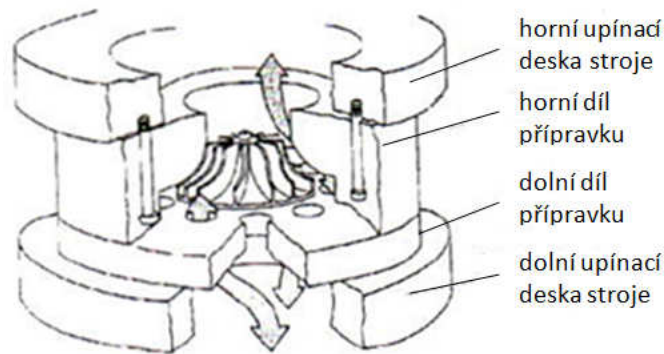
AFM, Abrasive Flow Machining, představuje proces dokončování povrchů pomocí polotuhého viskózního abrazivního média, které je protlačeno přes obrobek. Odstraňuje se tak malé množství materiálu a dokončený povrch má vysokou kvalitu. Obrobek se upevní v přípravku, který vymezí místa, kudy nemá abrazivní médium proudit.



Obr. 20 Detail pracovního procesu AFM [10]

V dolním válci je před pracovním procesem umístěno brusné médium a během cyklu se přemístí pístem přes přípravek s obrobkem do horního válce a odtud zpět do dolního válce. Stroj na přetlačení média vyvozuje tlak 0,7-22MPa. Detailněji je možné vidět pracovní proces AFM na Obr. 20.

Abrazivní médium se skládá z polotuhého polymeru na bázi kaučuku s kapalným mazivem, který je nosičem abrazivních zrn. Výslednou viskozitu média ovlivňuje poměr polymeru a brusiva a teplota média. Tato vlastnost zaručuje použití jednoho média pro různé průřezy průchodů mezi obrobkem a přípravkem. Průřez přípravkem používaným při technologii AFM je na Obr. 21. Viskozita a rychlost proudění média mají vliv na intenzitu úběru materiálu a velikost zaoblení hran. Jako brusivo jsou využívána zrna karbidu křemíku SiC, karbidu bóru B₄C, oxidu hliníku Al₂O₃ a diamantu o velikostech 0,005-1,5mm. Platí, že čím větší velikost zrna, tím větší úběr materiálu. Pro dokončování povrchů se volí velmi jemná zrnitost.



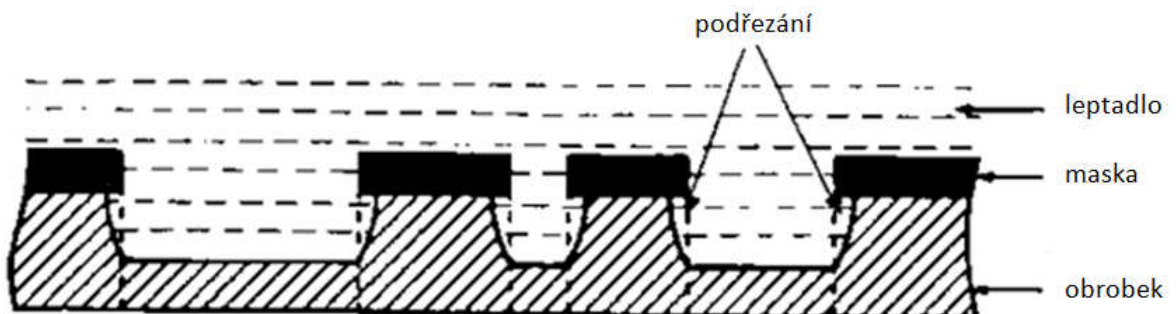
Obr. 21 Příklad přípravku pro AFM [10]

Původně byla technologie AFM vyvinutá pro odjehlování dílců v leteckém průmyslu, ale díky vysoké flexibilitě a nízkým nákladům se rozšířila do dalších odvětví. AFM se používá pro zaoblování hran, odstranění deformačně přetvořených vrstev na těžko dostupných plochách, leštění a odjehlování.

Opracovaný povrch má lesklý vzhled a vysokou jakost. Úběr materiálu není rovnoměrný, proto nelze odstranit touto technologií rozměrovou nepřesnost. Nejnižší dosahovaná $R_a = 0,05\mu\text{m}$. [10]

1.4.3 Chemické leštění

Tato metoda je založena pouze na účincích chemických reakcí mezi obráběným materiálem a reaktivním prostředím, kterým mohou být zásady nebo kyseliny. Kromě principu chemického leštění, je z Obr. 22 zřejmé i to, že místa, které se nemají leštit je nutno nejprve pokrýt maskou. Masky jsou chemicky odolná látka nebo speciální povlak jako jsou gumy a plasty. Složení leptadla závisí na materiálu obrobku. Pro leptání oceli a hliníku se používají kyseliny. Zásady jsou vhodné pro nikl a měď.



Obr. 22 Princip chemického leštění [10]

Obrobek se ponoří do leptadla, které se nechá účinkovat. Intenzita úběru materiálu se pohybuje asi 0,025mm/min. Dosahovaná drsnost je různá dle materiálu. U ocelí lze dosáhnout až $R_a = 1\mu\text{m}$, hliník a jeho slitiny $R_a = 0,76\mu\text{m}$, titan a jeho slitiny $R_a = 0,38\mu\text{m}$. [10]

1.4.4 Elektrochemické honování

Elektrochemické honování je vysoce produktivní dokončování obrobků z elektricky vodivých materiálů. Proces představuje kombinaci mechanického honování s elektrochemickým úběrem materiálu. Díky tomu je úběr až trojnásobný oproti úběru při konvenčnímu honování. Honovací kameny se odizolují a elektrický proud prochází přes elektrody připevněné mezi kameny a umístěné tak, že mezi elektrodami a obrobkem vznikne mezera 0,075-0,125mm. Elektrody se neopotřebovávají. Elektrolyt je pod tlakem přiváděn přes otvory mezi kameny. Konvenční i elektrolytický úběr probíhají zároveň.

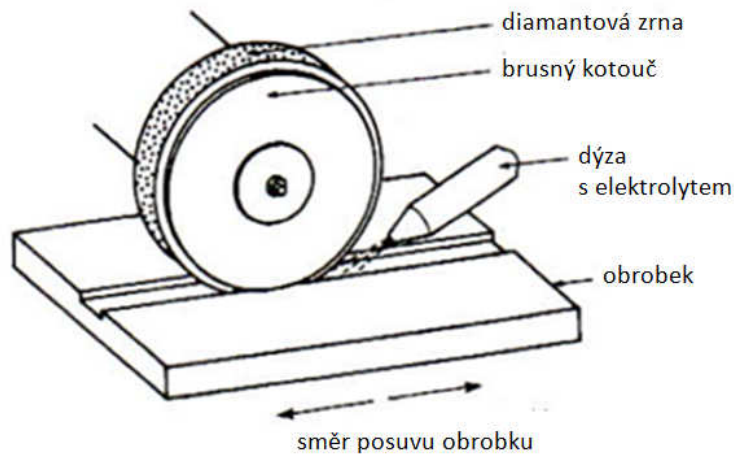
Až 90% úběru materiálu se ubírá elektrochemickým rozpouštěním, takže mezi kameny je menší tlak a tím se docílí zmenšení deformací u tenkostěnných dílů. Teplota obrobku i nástroje je pod 100°C. Nedochozí tak k tepelnému ovlivnění obrobku. Proces probíhá při nízkém napětí okolo 30V. [10]

1.4.5 Elektrochemické leštění

Správnou volbou proudové hustoty a elektrolytu je možné dosahovat lesklých povrchů. Obrobek je zapojený na anodu. Mezera mezi anodou a katodou musí být velká v poměru k velikosti nepravidelností povrchu, které mají být odstraněny. Elektrochemické leštění se používá také pro přípravu metalografických vzorků. [10]

1.4.6 ECG

ECG, Electrolytical Grinding, elektrochemické (elektrolytické) broušení, na Obr. 23, využívá úběr materiálu účinkem elektrolytu a jen malá část materiálu je ubírána brusnými zrnky. Kovový broušící kotouč s nevodivým brusivem (diamant, Al_2O_3 , SiC) vázaným vodivým kovovým pojivem je odizolován od ostatních částí stroje. Elektrolyt je přiváděn do prostoru mezi kotouč a obrobek. Někdy je elektrolyt přiváděn póry nebo otvory v kotouči. Brusná zrna kotouče vyčnívají nad kovové pojivo. Fungují tak jako izolant a vytváří konstantní mezeru mezi nástrojem a obrobkem. Tato mezera bývá okolo 0,025mm.



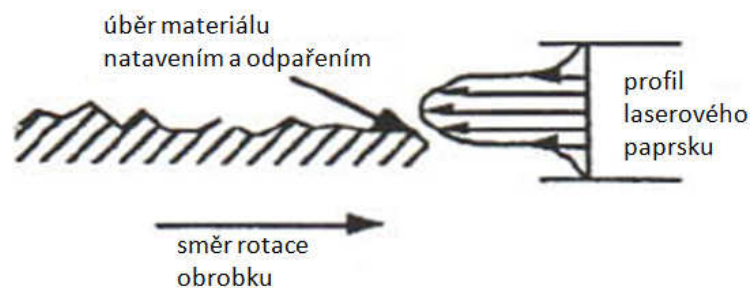
Obr. 23 Elektrochemické broušení [10]

Většina materiálu je odebrána elektrolyticky a jen 5-10% materiálu je odebráno abrazivním účinkem brousících zrn. Nejčastěji se používá nízké stejnosměrné napětí o velikosti 4-8V s proudovou hustotou 100-240 A/cm². Dosahovaná drsnost povrchu je Ra = 0,2-0,3μm. [10]

1.4.7 LBM

Základem principu leštění laserem je přetavení tenké povrchové vrstvy za působení povrchového pnutí. Nejčastěji se takto leští kovové materiály, ale i plasty a keramika. Výhodou je možnost automatizace a selektivního leštění. Takto vyleštěný povrch dosahuje drsnosti povrchu až Ra = 0,1 μm.

Další možností je tangenciální užití laserového paprsku u rotačních součástí. Na Obr. 24 lze vidět, že paprsek působí na povrch součásti tangenciálně a ne kolmo, čímž dochází k natavování mikronerovností.



Obr. 24 Tangenciální užití laserového paprsku [10]

Mezi nevýhody technologie LBM patří vyšší energetická náročnost, která je o řád vyšší na jednotku materiálu než např. při broušení. Místo působení řezu musí být dobře odvětráváno, protože výpary kovů jsou pro člověka toxickými.

Za výhody lze považovat flexibilitu technologie, která je vhodná pro obrobky širokého rozsahu rozměrů a komplexnosti, neopotřebovávání nástroje a možnost opracovávání různých materiálů. [10]

2 VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Povrch průmyslových součástek nebo obrobků si můžeme představit jako fyzickou hranici mezi obrobkem a okolním prostředím. Reálný povrch obrobku definují mezinárodní normy ISO jako soubor charakteristických vlastností, které fyzicky existují a oddělují vlastní obrobek od okolního prostředí.

Mezi základní ČSN EN ISO normy týkající se problematiky struktury povrchu patří norma ČSN EN ISO 4287 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu a norma ČSN EN ISO 4288 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.

Pojem jakost, z hlediska technologie výroby, značí přesnost:

- rozměrů,
- geometrického tvaru,
- polohy,
- drsnosti povrchu.

Vztah mezi funkcí a jakostí povrchu je možné hodnotit ze dvou hledisek:

- textury povrchu - především drsnost,
- fyzikálních a chemických vlastností povrchové vrstvy.

2.1 Integrita povrchu

Vlastnosti povrchové vrstvy jsou ovlivněny stupněm zpevnění a strukturálními změnami, které jsou přímo úměrné množství zbytkových napětí. S rostoucí intenzitou řezání, způsobenou stále se zvyšující rychlostí řezání, je nutné zaměřit pozornost na změnu vlastností povrchové vrstvy součásti oproti vrstvám materiálu ve větší vzdálenosti od povrchu.

Většina porušení materiálu vzniká na povrchu nebo těsně pod ním. Tím se ukazuje, že mezní stav závisí na místních vlastnostech materiálu v nejnamáhavějším místě a ne na průměrných vlastnostech celého průřezu. Z hlediska únavové pevnosti to znamená, že stopy po obrábění fungují jako vruby.

Všechny změny nastávající v povrchové vrstvě, lze brát jako změny jakosti. Integrita povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsled-

ky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.

Do dnešní doby neexistuje způsob, jak komplexně zhodnotit nově vytvořenou plochu z pohledu její integrity. Zatím nejspolehlivější zkouškou integrity je skutečné nasazení součásti do provozu. [13]

Integrita povrchu je složena z několika složek, pomocí kterých lze popsat vlastnosti daného povrchu, jeho kvalitu a předpovídat vhodnost použití dané součásti v různých podmínkách. Mezi složky integrity povrchu se řadí:

- drsnost povrchu,
- geometrická přesnost,
- změny tvrdosti v povrchové vrstvě,
- změny struktury v povrchové vrstvě,
- tepelné změny,
- trhliny,
- zbytková napětí. [24]

2.1.1 Drsnost povrchu

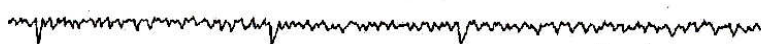
Drsnost povrchu, nebo také struktura povrchu, je část geometrických úchylek reálného povrchu s relativně malou vzdáleností mezi sousedními nerovnostmi. [12]

Základní pojmy

Drsnost povrchu je jemná nerovnost daná technologií výroby - stopy po obrábění. Povrch obrobku je dále ovlivněn mechanismem tvoření třísky, který má za následek např. vytrhávání materiálu z povrchu což má poté vliv na náhodný charakter povrchu obrobku.

Vlnitost povrchu označuje rozlehlejší periodickou nerovnost. Je to nejčastěji důsledek vibrace soustavy stroj-nástroj-obrobek. Dále lze vlnitost chápat jako část, na které je vytvořena drsnost.

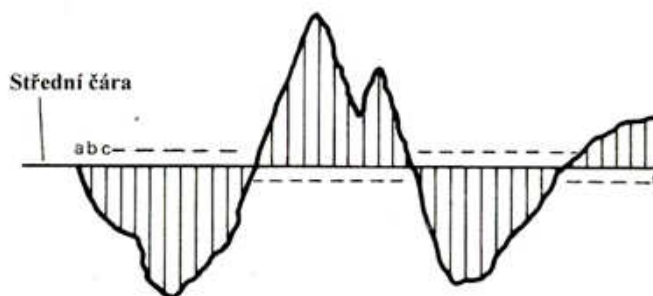
Pro lepší pochopení rozdílu mezi drsností a vlnitostí povrchu je uveden Obr. 25, který představuje jejich grafickou podobu.





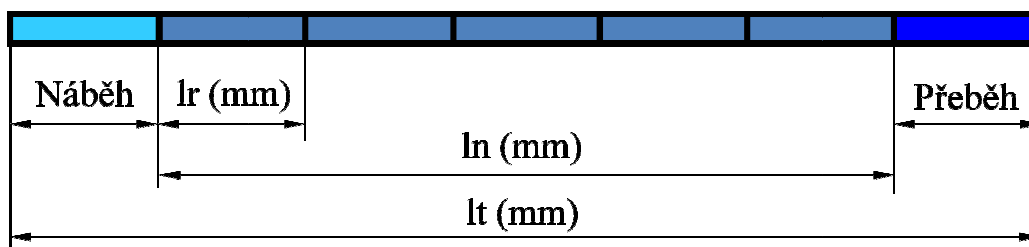
Obr. 25 Drsnost a vlnitost povrchu [11]

Střední čára na Obr. 26 je čarou, která probíhá středem vrcholů a prohlubní. Součet ploch ohraničených profilem nerovnosti nad touto čarou je roven součtu ploch pod touto čarou.



Obr. 26 Střední čára [11]

Pokud měříme drsnost povrchu součásti, přístroj rozdělí měřený úsek do několika oddílů jak je vidět na Obr. 27. Východiskem je základní délka, jejíž velikost je dle platné normy funkcí profilu drsnosti a opakuje se během jednoho měření tři až pětkrát. Délka náběhu a přeběhu je potom shodná se základní délkou.



Obr. 27 Schéma měřící dráhy snímače [11]

l_r - základní délka profilu drsnosti

l_n - vyhodnocovaná délka profilu

l_t - celková délka snímání

n - počet základních délek

Základní délka l_r je vzdálenost ve směru osy X. Slouží k nalezení nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil drsnosti.

Vyhodnocovaná délka l_n je vzdálenost ve směru osy X. Slouží k posouzení vyhodnocovaného profilu.

Celková délka l_t je délka všech základních délek zvětšená o náběh a přeběh měřícího snímače.

Parametry profilu

Parametry profilu nerovnosti lze rozdělit do tří základních skupin:

- výškové parametry - určují velikosti vrcholů a prohlubní,
- frekvenční parametry - určují velikost roztečí nepravidelností,
- hybridní parametry - kombinace výškových a frekvenčních parametrů. [11]

Výškové parametry

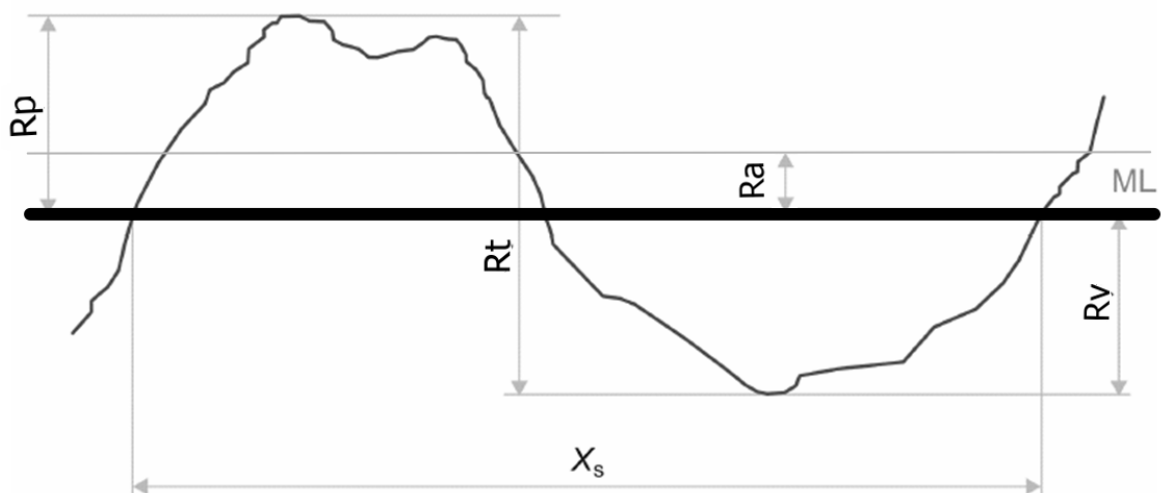
R_p - výška výstupku profilu. Je vzdáleností (Z_p) mezi střední čarou (ML) profilu a nejvyšším bodem výstupku profilu.

R_v - hloubka prohlubně profilu. Je vzdáleností (Z_v) mezi střední čarou profilu a nejnižším bodem prohlubně profilu.

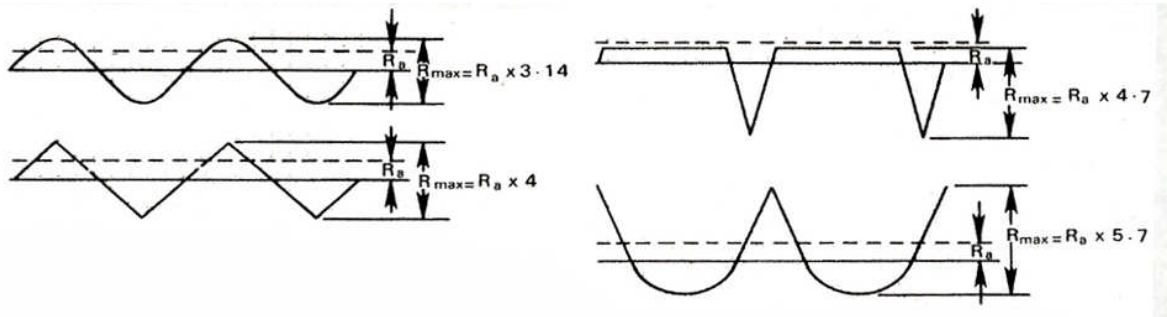
R_t - celková výška profilu. Je součtem výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu v celé vyhodnocované délce.

R_z - výška profilu je součtem nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v základní délce.

R_a - průměrná aritmetická odchylka. Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Hodnota parametru R_a nedává 100% informaci o tvaru nepravidelností povrchu (Obr. 29)



Obr. 28 Prvek profilu [12]



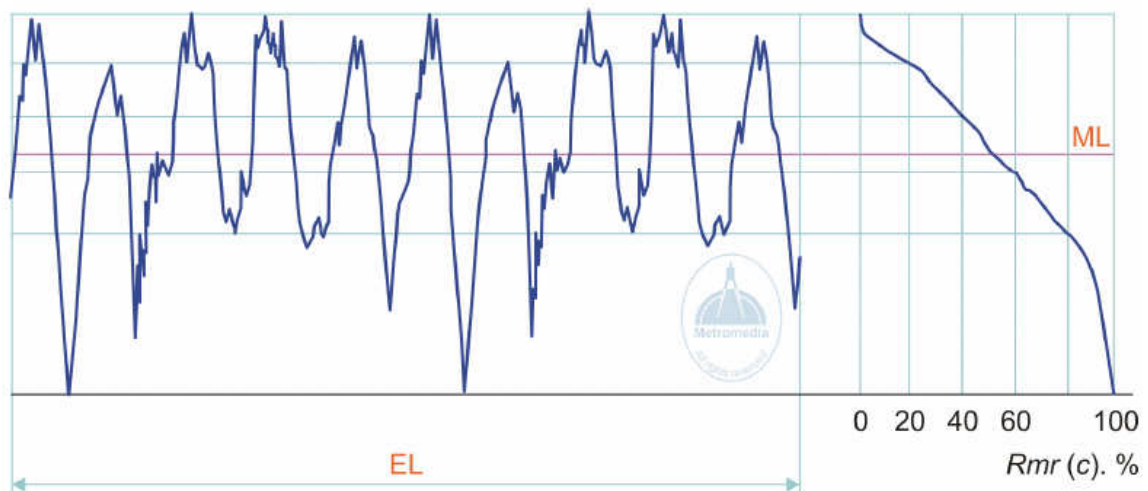
Obr. 29 Příklady profilu [11]

Frekvenční parametry

Xs - rozestup prvku profilu. Jedná se o průměrnou délku úseku střední čáry profilu obsahující prvek profilu. [12]

Rmr - relativní materiálový poměr. Je poměrem délky nosné plochy, v kterékoliv hloubce profilu, k celkové délce profilu vyjádřeným v %.

Křivka materiálového podílu profilu - Abbot-Firestonova křivka je grafickým znázorněním závislosti hodnot relativního materiálového poměru na výšce profilu. [12]



Obr. 30 Křivka materiálového podílu [12]

2.1.2 Geometrická přesnost

Na geometrickou přesnost má vliv celá řada faktorů. Jedná se především o tuhost soustavy, opotřebení nástroje, řezné podmínky a prostřední. Míru odchylky od geometrické přesnosti udává rozdíl mezi nejvyššími a nejnižšími hodnotami profilu. Při dokončovacích obráběcích operacích může docházet, např. vlivem špatně nastavených řezných podmínek, opo-

třebením nástroje, nižší tuhostí soustavy,... ke vzniku geometrických nerovností. Tyto geometrické nepřesnosti mají značný vliv nejen na profil a drsnost povrchu, ale i na přesnost a stálost uložení součásti při montáži nebo používání, na životnost součásti atd. [24]

2.1.3 Tvrdost

Faktory ovlivňujícími tvrdost povrchové vrstvy jsou: vznik a množství tepla, schopnost snížit teplo a schopnost odvádět teplo z řezného prostředí. Při obrábění dochází ke vzniku tepla. V případě, že není do řezného prostředí přiváděna žádná procesní kapalina, dochází k neustálému nárůstu tohoto tepla. Vlivem narůstající teploty a nepřítomnosti procesní kapaliny dochází k druhotnému zakalení povrchové vrstvy součásti. Pod druhotně zakalenou vrstvou leží vrstva popouštěná a pod ní ještě vrstva o hodnotě tvrdosti jádra. Ke zjištění průběhu tvrdosti v povrchové vrstvě se využívá diamantového jehlanu, který se vtiskuje do 0,3 mm hloubky povrchu. Následně se určuje nejvyšší, nejnižší a průměrná tvrdost z min. 60-ti vtisků a je stanovena směrodatná odchylka měření. [24]

2.1.4 Struktura materiálu

Působením vysokého mechanického zatížením a vznikajícího tepla při dokončovacích operacích obrábění součásti, mohou nastat změny ve struktuře materiálu. Jakékoliv takto vzniklé negativní změny jsou nežádoucí z důvodu jejich vlivu na následné užité vlastnosti tohoto materiálu. Pod užitnými vlastnostmi je myšleno např. zkrácení doby životnosti z důvodu trhlin materiálu. Trhliny vznikají důsledkem nahromadění napětí v místech negativních změn v materiálu. [24]

2.1.5 Opaly a trhliny

Jak již bylo zmíněno, při dokončovacím obrábění vzniká velké teplo. Toto vzniklé teplo neovlivňuje pouze strukturu materiálu, ale také může docházet ke vzniku opalů. V případě opalů se jedná o změny strukturálního charakteru. Proto, pokud chceme zjistit jejich přítomnost na povrchu materiálu, je nutné materiál nejprve podrobit odleptání. Opaly mají podobu různě zbarvených oxidů a jejich rozloha na povrchu materiálu může být plošná nebo lokální.

Po dokončení obráběcího procesu se mohou v povrchové vrstvě součásti objevit trhliny, které jsou důsledkem objemových změn při ochlazování. Trhliny se mohou vyskytnout jednak na okrajích samotných opalů nebo mohou být příčinou strukturálních změn. V prů-

běhu používání součásti může docházet k rozšiřování stávajících trhlin nebo ke vzniku nových trhlin, což je značně nežádoucí. [24]

2.1.6 Zbytková napětí

Hlavní příčinou vzniku zbytkových napětí jsou:

- nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu,
- nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu,
- nerovnoměrné změny struktury - vyvolané působením tepla a mechanických sil,
- chemické procesy - spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy.

Každá technologická operace mění zbytkové napětí jen v takovém objemu materiálu, ve kterém vyvolá plastickou deformaci a tepelně ji ovlivní.

Zbytková napětí po obrábění vznikají v oblasti pružně-plastických deformací při tvorbě třísky. Na jakost povrchové vrstvy má největší vliv dokončovací operace. Při nevhodném sledu operací může zůstat zbytkové napětí v povrchové vrstvě z předchozího obrábění.

Kontrolní metody, jako měření tvrdosti, drsnosti a tvarových úchylek, nemusí rozpoznat rozdílná povrchová napětí a to nejen co do velikosti ale i smyslu.

Dle experimentů tahová zbytková napětí únavovou pevnost snižují a tlaková naopak zvyšují. Lze očekávat, že během provozu součásti může při vyšších teplotách dojít k relaxaci zbytkových napětí. [13]

2.2 Metody měření jakosti povrchu

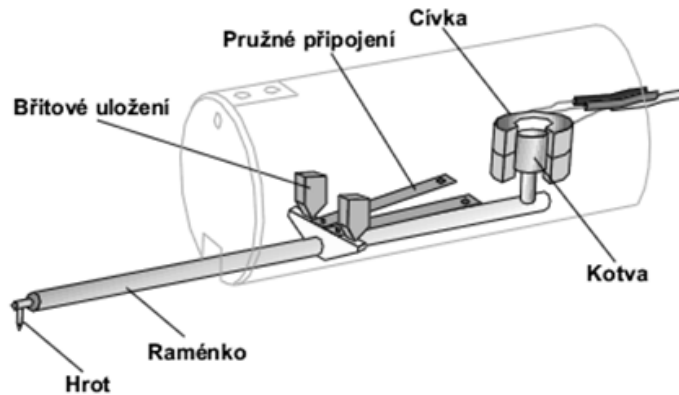
Dle způsobu kontaktu měřícího zařízení s vyhodnocovaným povrchem lze metody měření jakosti povrchu rozdělit do dvou skupin na:

- dotykové,
- bezdotykové.

2.2.1 Dotykové měření jakosti povrchu

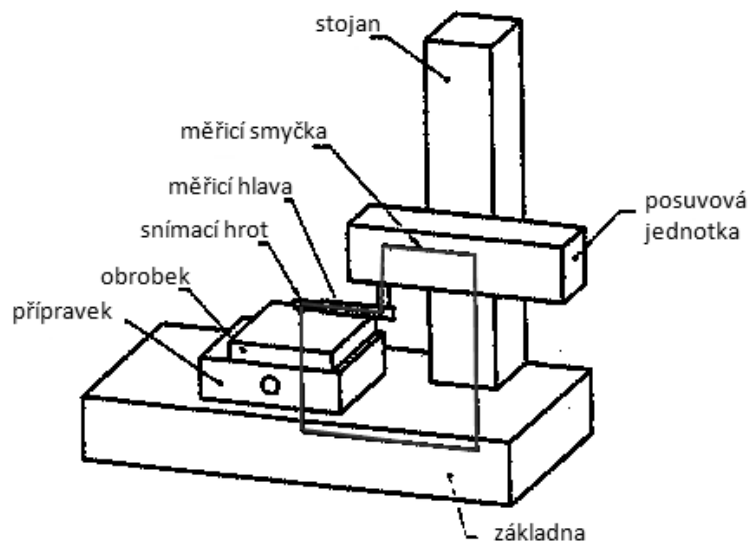
Ke snímání struktury povrchu slouží profilometry. Profilometry jsou měřicí přístroje, které ke zkoumání povrchu používají snímací hrot. Snímací hrot na posuvném raménku je posouván po povrchu. Jedná se o vertikální pohyb hrotu přes výstupky a prohlubně, který je následně indukčním měřidlem převáděn na elektrický signál viz Obr. 31. Pomocí snímacího hrotu jsou tak získávány úchylky povrchu ve formě jeho profilu. Na základě těchto úda-

jú jsou dále vypočítány parametry drsnosti povrchu a zaznamenán daný profil. Přístroje lze propojit s počítačem, což umožní s naměřenými daty dále pracovat v příslušném softwaru.



Obr. 31 Indukční snímač [11]

Konstrukčně je profilometr uspořádán do tzv. měřicí smyčky. Z Obr. 32 lze vidět, že měřicí smyčka představuje uzavřený řetězec zahrnující všechny mechanické části, které postupně propojují měřený objekt a snímací hrot.



Obr. 32 Měřicí smyčka [11]

Jako snímací hrot je využíván diamantový měřicí hrot ve tvaru kuželu. Vrchol kuželu svírá úhel 90° nebo 60° a je zaoblen na 2, 5, nebo $10\mu\text{m}$. Měřicí síla se pohybuje v rozmezí 0,6-2mN.

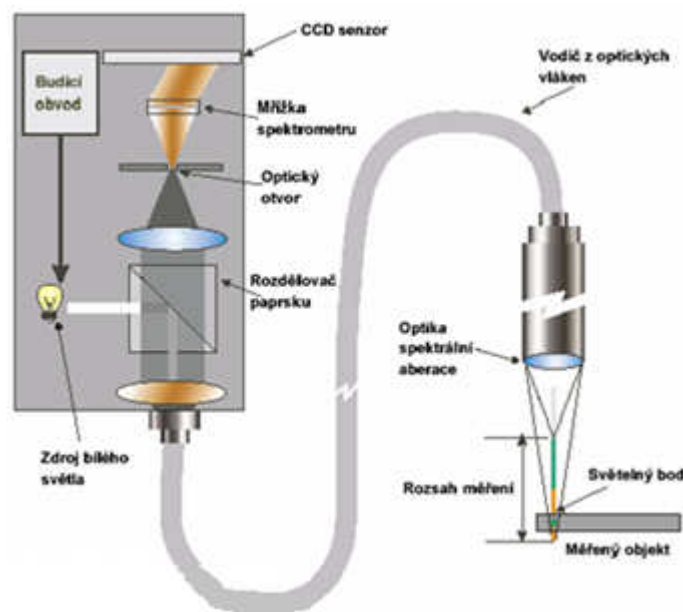
Mezi přednosti používání dotkových měřících přístrojů patří jejich schopnost překonávat zbytky materiálu a olejový film, schopnost měřit strojírenské povrchy a také to, že při tomto způsobu měření jsou jednoznačně definovány ISO standardy a povrchy. [11]

2.2.2 Bezdotykové měření jakosti povrchu

Bezdotykové metody, nebo také optické metody měření jakosti povrchu, představují moderní metodu vyhodnocování struktury povrchu. K bezdotykovému měření povrchu je nejčastěji využíván tzv. CLA snímač a také Laserový snímač.

CLA snímač

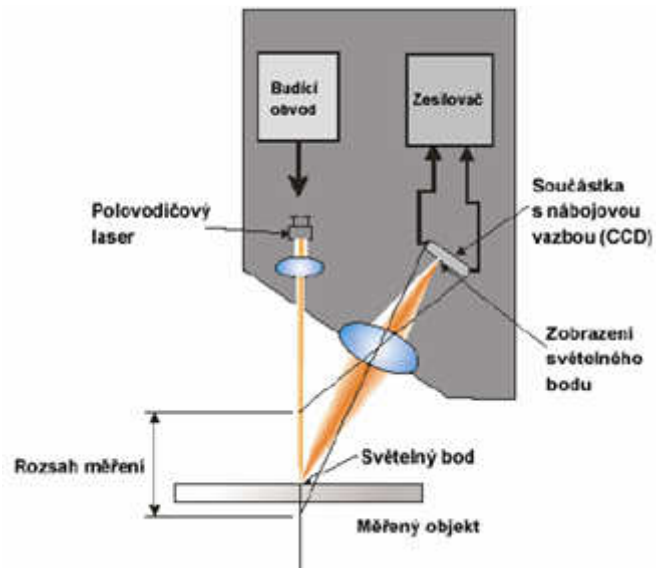
Princip CLA snímače, znázorněný na Obr. 33, spočívá v rozkladu bílého světla, které prochází optikou se spektrální aberací, přes kterou je dále směřováno na kontrolovaný povrch. Rozložení světla je provedeno dle vlnových délek a v každém bodě povrchu dochází k zaostření pouze určité vlnové délky. Světlo, které se odrazí z povrchu snímaného objektu, prochází otvorem zpět. Tento otvor propustí jen světlo zaostřené vlnové délky. Propuštěné světlo je dále vychýleno pomocí spektrometru na CCD senzor, kde je následně každému bodu přiřazena prostorová poloha.



Obr. 33 CLA snímač [11]

Laserový snímač

Obr. 34 uvádí snímání struktury povrchu pomocí laserového snímače. Toto snímání je zahájeno vysláním paprsku z polovodičového laseru. Vyslaný paprsek se odrazí od měřeného povrchu zpět do přijímacího optického systému. Zde je paprsek zaostřen na CCD snímacím poli, které zajišťuje špičkovou hodnotu rozdělení množství světla v bodě paprsku. Na základě CCD obrázkových prvků na ploše bohu paprsku jsou poté určeny přesné polohy zaměřeného bodu. [11]



Obr. 34 Laserový snímač [11]

V porovnání s dotykovými snímači je snímání bezdotykovým způsobem rychlejší, měření lze provádět i na choulostivých materiálech a nemůže dojít k poškození snímače měřenou součástí.

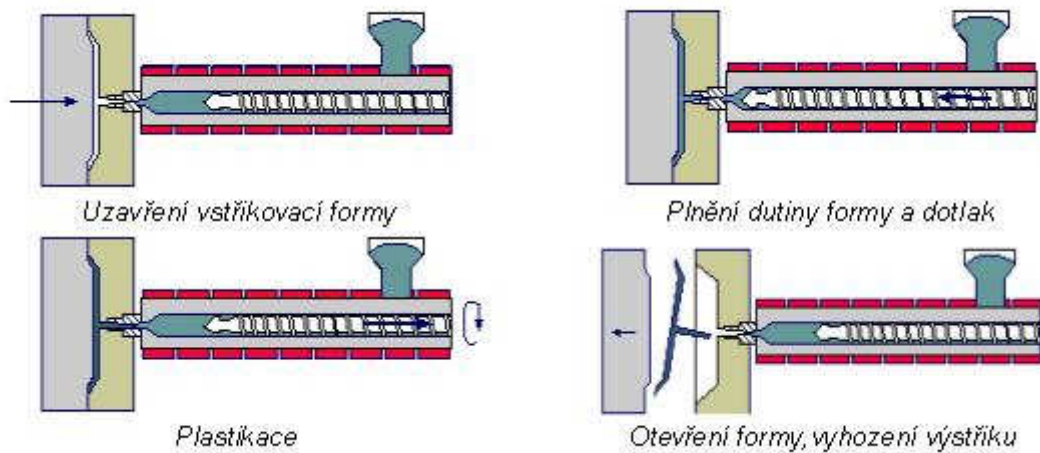
3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování patří mezi hlavní technologie zpracování plastů. Jedná se o přerušovaný, cyklický děj, při kterém probíhá neizotermický proces. Vstřikováním lze ekonomicky produkovat kvalitní a dostatečně přesné výrobky. Výstřiky mohou být z poměrně širokého spektra plastů. Jedná se především o téměř všechny termoplasty, některé reaktoplasty a také kaučuky.

Při vstřikování se mění v jednom kroku polymer (nejčastěji granule) v hotový výrobek. Často je tak vystříknutý výrobek ihned po vyjmutí z formy odeslán přímo spotřebiteli nebo je dále používán při kompletaci větších celků. Jedná se tedy nejčastěji o vstřikování hotové výrobků nebo polotovarů. Vstřikování má i další výhody. Např. správným navržením formy lze eliminovat nutnost dalšího opracování výstřiku. Vtokové zbytky v případě termoplastů je možné po rozemletí recyklovat a tím se mohou ztráty polymeru zmenšit na minimum. Vstřikovací cyklus je relativně krátký a je možné jej automatizovat. [6]

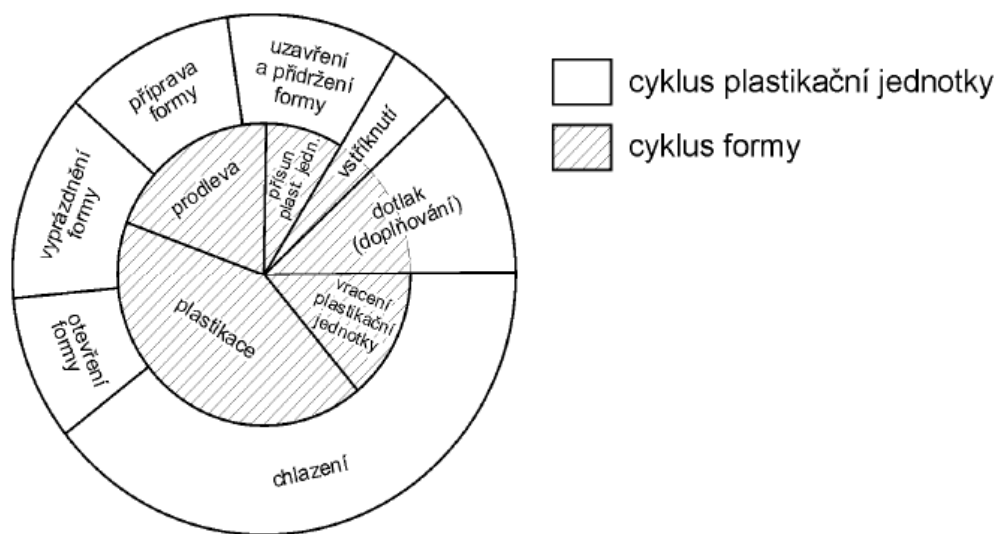
3.1 Princip vstřikování

V případě vstřikování se jedná o cyklící proces, jehož průběh je názorně vidět na Obr. 35. Plast, nejčastěji v podobě granulí, se nasype do násypky, ze které je šnekem nebo pístem odebírán a dopravován do tavicí komory vstřikovacího stroje. Zde se účinkem tepla a tření stává z plastu tavenina. Tato tavenina je poté vstříknuta do dutiny temperované formy, kterou zcela vyplní a získá tak její tvar. Následuje fáze dotlaku, jejíž úkol je snížení smrštění a rozměrových změn. Již během prvního kontaktu plastu s formou dochází k jeho zchlazení, až postupně dojde k jeho úplnému zatuhnutí a zafixování do tvaru hotového výrobku. Nyní se forma otevře, výrobek se z formy pomocí vyhazovačů vyhozen a celý cyklus může začít znovu. [9]



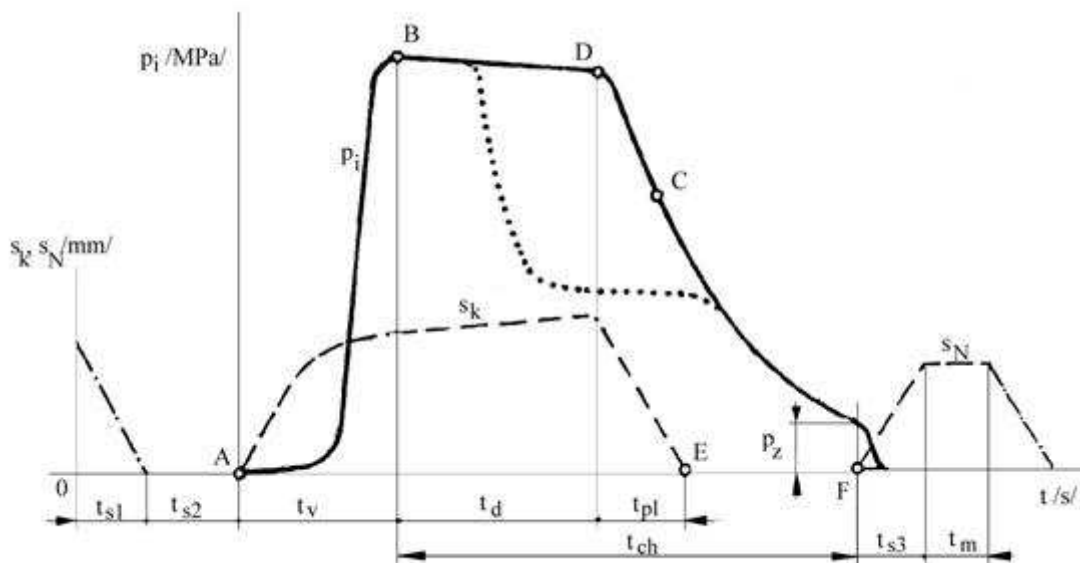
Obr. 35 Vstříkovací cyklus [9]

Z Obr. 36 je zřejmé, že vstříkovací cyklus lze rozdělit na 2 části a to na část plastikační jednotky a část formy. Jednotlivé časové úseky vstříkovacího cyklu trvají různě dlouho a jsou ovlivněny procesními podmínkami procesu vstříkování.



Obr. 36 Časové rozložení vstříkovacího cyklu

Vstříkovací cyklus lze dále posuzovat z hlediska závislosti tlaku zpracovávaného plastu na čase. Obr. 37 je grafickým vyjádřením průběhu tlaku v dutině formy během procesu vstříkování.



Obr. 37 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [9]

s_k – pohyb šneku, s_n – pohyb nástroje (formy)

Na začátku vstřikovacího cyklu je forma prázdná a je otevřená. V čase nule dostane stroj impulz ke startu vstřikovacího cyklu. Pohyblivá část formy (nejčastěji levá strana) se přisune k pevné části a dojde k uzavření a uzamknutí formy. Následuje pohyb šneku či pístu v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování taveniny do dutiny formy. V této části cyklu šnek vykonává pouze posuvný pohyb, neotáčí se a tak napodobuje funkci pístu. Po zaplnění dutiny uvnitř formy je tavenina ještě stlačena a tlak dosáhne maxima.

S prvním kontaktem taveniny a formy dochází mezi nimi k předávání tepla a tavenina chladne. Chlazení trvá až do vyhození výstřiku z formy. Doba chlazení se často dělí na chlazení za plného vstřikovacího tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Doba chlazení závisí na teplotě formy, tloušťce stěny výrobku, na materiálu formy a typu vstřikovaného plastu. Po dobu chlazení se výstřik smršťuje a deformuje. Aby se tomu jevu alespoň z části zamezilo, je nutno úběr materiálu kompenzovat dodatečným přísunem taveniny do dutiny formy – dotlakem. Předpokladem pro provedení dotlaku, je že nedošlo k zatuhnutí vtokového ústrojí výstřiku, a že před čelem šneku zůstalo v rezervě dostatek taveniny. Tato rezerva se nazývá "polštář". Polštář nesmí být příliš velký, aby nedocházelo k tepelné degradaci taveniny. Nejčastěji se volí 10% z průměru šneku.

Po dotlaku následuje plastikace další dávky plastu. Šnek se začne otáčet a tím nabírá granulát z násypky, plastikuje jej a přemísťuje před čelo šneku. Zároveň s otáčením šnek koná

pohyb vzad. Plastikace materiálu se děje přestupem tepla z vyhřívané komory šneku a třením mezi stěnou komory a šnekem - tzv. frikčním teplem.

Po ukončení fáze dotlaku, tlak uvnitř formy klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z . Příliš vysoká hodnota zbytkového tlaku má za následek vysoké vnitřní napětí ve výstřiku, které může u křehkých materiálů vést až k popraskání. Po zchladnutí výstřiku dojde k otevření formy a vyhození výstřiku z formy. [9]

3.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj se skládá ze tří základních prvků:

- plastikační a vstřikovací jednotka,
- uzavírací jednotka,
- vstřikovací forma.

Vstřikovací proces nejčastěji probíhá na plně automatizovaných strojích, čímž se dosahuje co nejkratších cyklů a zároveň co největší hospodárnosti. Nevýhodou vstřikování jsou vysoké pořizovací náklady jak na stroj, tak i na formu. Proto je tato technologie vhodná pro hromadnou a velkosériovou výrobu. Pro maximalizaci automatizace celého procesu lze vstřikovací stroje doplnit např. o manipulátory, roboty, temperační zařízení, mísící zařízení, sušárny, dopravníky a tím vytvořit celou linku. [9]

Mezi základní charakteristiku vstřikovacího stroje patří hodnota maximálně vstřikovaného objemu výstřiku. Tato hodnota určuje, kolik materiálu je stroj schopný vstříknout a to včetně vtokových zbytků. Dále se udává maximální vstřikovací tlak. Mimo to je stroj ještě charakterizován i maximální uzavírací silou, jíž se rozumí síla držící formu uzavřenou. Důležitým parametrem je i maximální rozměr formy, kterou lze na stroj namontovat. [6]

3.2.1 Plastikační a vstřikovací jednotka

Tato jednotka plní dva hlavní úkoly:

- přeměňuje granulát na homogenní taveninu,
- dopravuje (vstřikuje) taveninu zvolenou rychlostí a pod vysokým tlakem do dutiny formy.

Dále můžeme plastikační a vstřikovací jednotky rozdělit na:

- šnekové,
- pístové,
- kombinované.

a) Šnekové

Oproti pístové jednotce dosahuje šneková jednotka mnohem vyššího plastikačního výkonu. Šnek plastikuje taveninu a zároveň funguje jako píst. Mezi výhody patří vysoká teplotní a materiálová homogenita taveniny a výstřiky mají menší náklonnost ke smršťování, díky menším vnitřním napětím.

Šnek

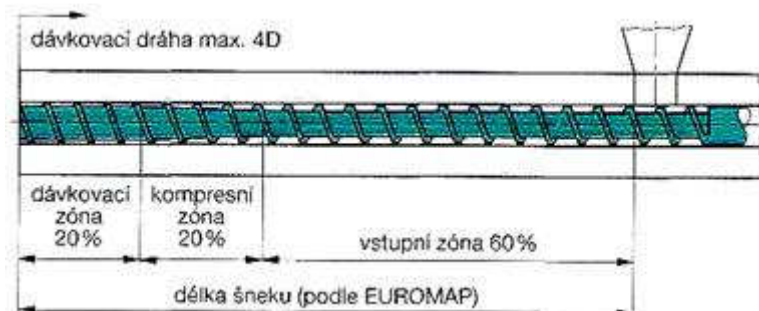
Konstrukce šneku odpovídá jeho funkci, tj. dávkování, doprava, plastikace, hnětení a vstříknutí materiálu do dutiny formy. V současné době se nejčastěji používá diferenciální šnek. Typickou charakteristikou diferenciálního šneku je kompresní poměr. Kompresní poměr vyjadřuje poměr objemu profilu šneku pro jedno stoupání závitů pod násypkou a v oblasti trysky. Obvykle se tento poměr pohybuje v rozmezí 1,5-4,5. Změny kompresního poměru se nejčastěji dosahuje změnou hloubky drážky šneku.

Šnek má tři funkční pásma:

- vstupní (dopravní),
- přechodové (kompresní),
- výstupní (homogenizační).

Poměr jednotlivých pásem na celkové délce diferenciální šneku, je znázorněn na Obr. 38.

[9]



Obr. 38 Diferenciální šnek [9]

1. Vstupní pásmo

Toto pásmo je pod násypkou. Jeho charakteristickou vlastností je neměnná hloubka drážky šneku. Ve vstupním pásmu dochází ke stlačení nabraného granulátu, jeho zahřívání a tím k vytěsnění vzduchu. Na konci tohoto pásma může dojít i k částečnému natavení granulátu.

2. Přechodové pásmo

V tomto prostředním pásmu se průměr jádra šneku zvětšuje, čímž se směrem k trysce zmenšuje hloubka drážky šneku. To má za následek značné stlačení materiálu, proto se tomuto pásmu také někdy říká kompresní pásmo. V tomto pásmu je tání granulátu nejintenzivnější, ale tavenina je teplotně nehomogenní.

3. Výstupní pásmo

Zde se tavenina homogenizuje. Hloubka drážky šneku je konstantní, ale je menší než ve vstupním pásmu.

Zakončení šneku je konstruováno tak, aby připravená tavenina měla co nejmenší tendenci vracet se zpět do šneku. Tato tendence je vyšší, čím je nižší viskozita taveniny. Tento problém řeší tupé ukončení šneku, prodloužené zakončení špičky šneku nebo zpětný ventil.

Délka šneku se vyjadřuje jako poměr jeho délky a průměru L/D . Šnek na zpracování termoplastů má obvykle délku 15-20D. [9]

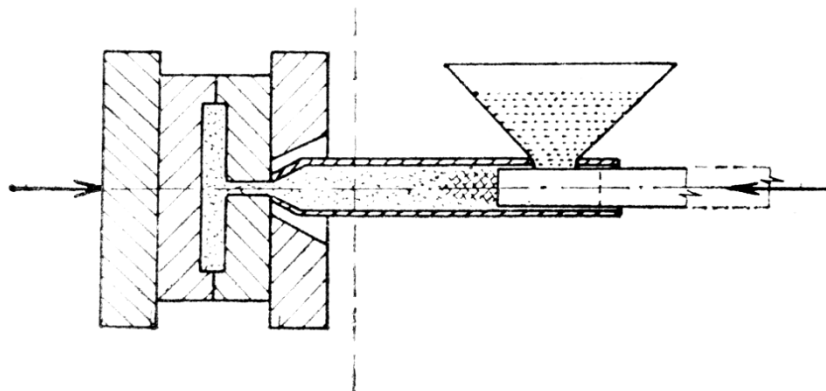
Tavící komora

Tavící komora je obvykle rozdělena na tři a více topná pásma. Každé pásmo je samostatně vytápěno a ovládáno. Nejnižší teplota je v pásmu pod násypkou. Toto pásmo je chlazeno, aby nedocházelo k natavení granulátu. Natavený granulát by vytvořil zátku a ucpal násypku, čímž by se zamezil přístup dalšího materiálu do šneku. Nejvyšší teplota je u trysky. [9]

b) Pístové

Plastový granulát je protlačován tavící komorou pomocí vstřikovacího pístu. Při tomto pohybu je granulát intenzivně zahříván vnějším zdrojem tepla, až přejde do taveniny. Mezi nevýhodu patří omezený prostup tepla do středu tavící komory, z důvodu malé teplotní vodivosti polymerů. Tím dochází i k nehomogenitě taveniny. Proto se používají komory s torpédem nebo žebry. Tato úprava však vede ke ztrátě vstřikovací tlaku (až 70%). Základní schéma pístové plastikací a vstřikovací jednotky uvádí Obr. 39.

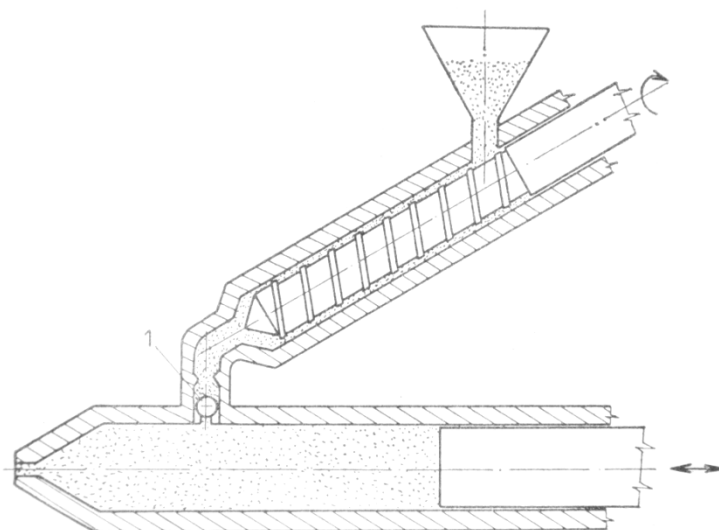
Mezi klady pístových plastikačních a vstřikovacích jednotek patří jednoduchost stroje a možnost vstřikovat s vysokými tlaky a vysokými rychlostmi.



Obr. 39 Pístová plastikační a vstřikovací jednotka [6]

c) **Kombinované**

Jak je vidět z Obr. 40 kombinovaná plastikační a vstřikovací jednotka spojuje výhody obou druhů jednotek. Plastikaci granulátu plastu provádí komora se šnekem. Vzniklá tavenina se přemístí do komory pístu a může se vstřikovat. Kombinovaná plastikační a vstřikovací jednotka se používá zejména pro objemné výstřiky a výstřiky z reaktoplastů.



Obr. 40 Kombinovaná plastikační a vstřikovací jednotka [6]

Tryska

Vstřikovací jednotku zakončuje vstřikovací tryska, která má převést taveninu, pokud možno bez tlakových ztrát, do dutiny formy. Trysky mohou být našroubovány nebo upevněny pomocí bajonetového spoje.

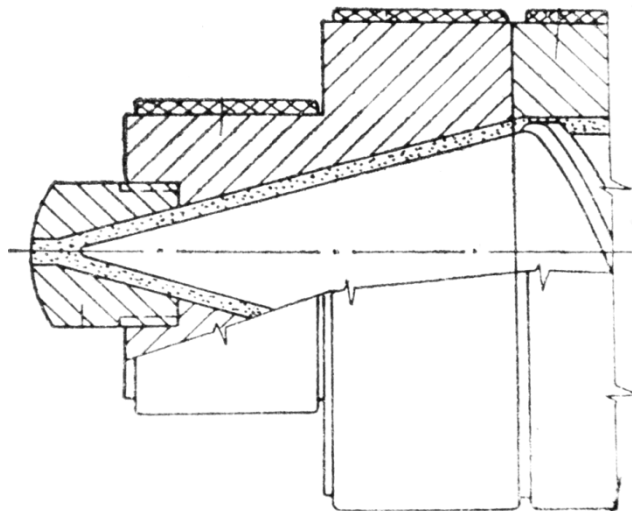
Dle vlastností zpracovávaného plastu, jeho viskozity a tepelné stability můžeme dělit trysky na trysky:

1. otevřené,
2. uzavíratelné.

1. Otevřená tryska

Otevřená tryska se používá pro vysoce viskózní materiály, případně pro tepelně nestabilní hmoty. Jak je možno vidět na Obr. 41 vnitřní kónický hladký kanál je bez mrtvých prostorů, kde by případně mohla nastat degradace taveniny. Dosedací plocha trysky bývá kulová s menším poloměrem zakřivení než má vtoková vložka formy.

Plastikace nejčastěji probíhá s tryskou dosednutou na naplněnou formu, aby nedocházelo k výtoku taveniny z plastikační jednotky. Tento problém lze odstranit zpětným posunem šneku po skončení plastikace a tím se zamezí samovolnému vytékání taveniny. [6]



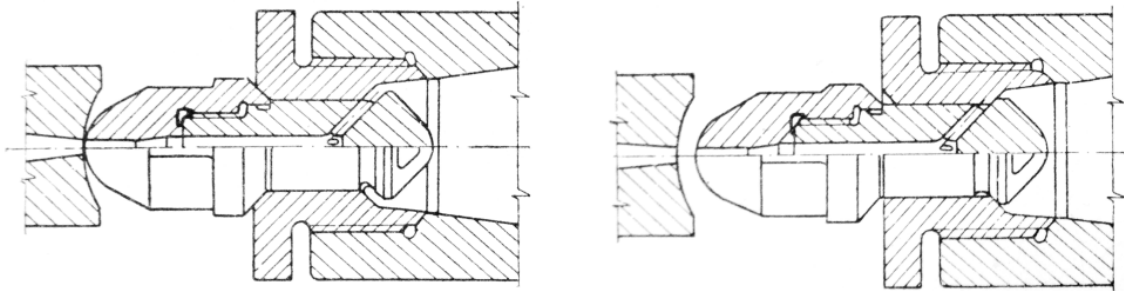
Obr. 41 Otevřená tryska [6]

2. Uzavíratelná tryska

Využívá se na středně a zejména na nízkoviskózní materiály. Uzavíratelné trysky lze je dělit na:

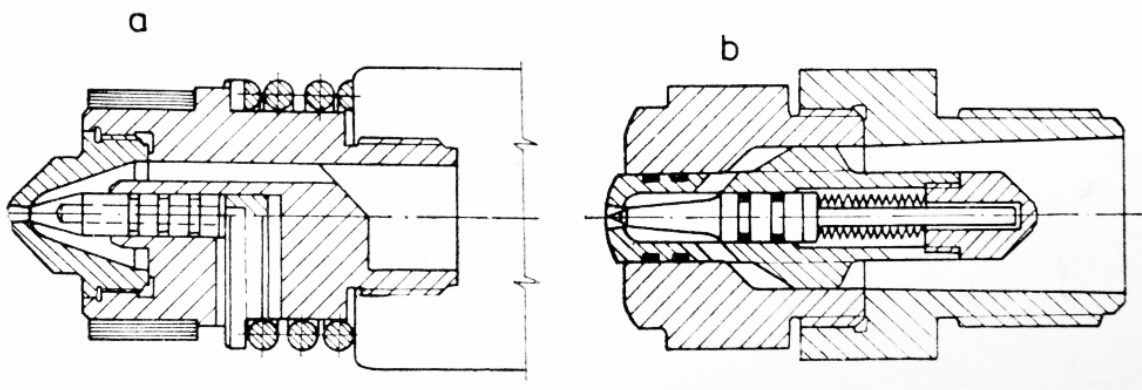
- posuvné,
- jehlové.

Z vyobrazeného principu posuvné uzavíratelné trysky na Obr. 42 je zřejmé, že k otevření posuvové trysky dochází silou vyvolanou dosednutím vstřikovací jednotky na vtokovou vložku. Po oddálení jednotky od formy trysku uzavře pružina. [6]



Obr. 42 Princip posuvné uzavíratelné vložky [6]

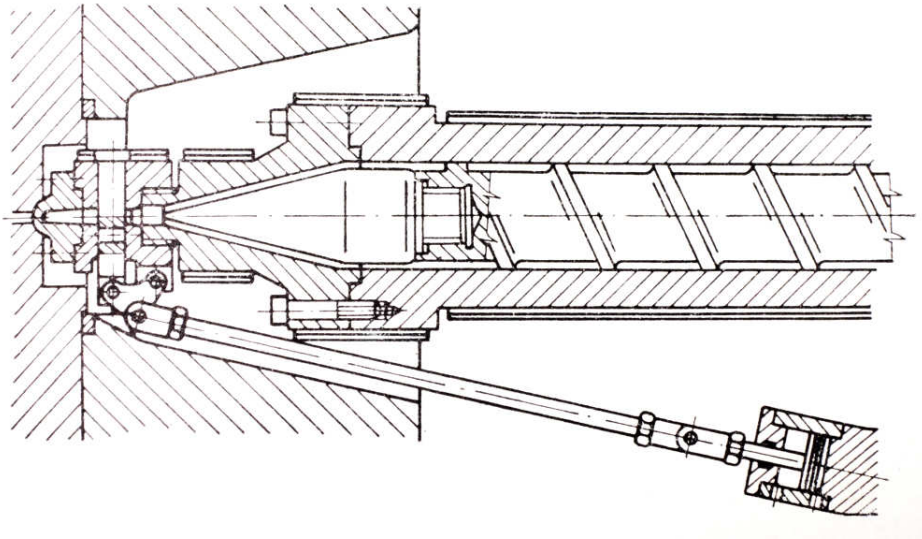
Princip jehlové trysky lze zjednodušeně popsat jako pružinou zatížený bezpečnostní ventil. Kónická jehla dosedá na vnitřek trysky. Ta je poté otevřena tlakem taveniny působícím na kužel jehly. Tavenina o dostatečném tlaku překoná sílu pružiny působící na jehlu, jehla se posune od ústí trysky a tím začne proudit tavenina z trysky. Obr. 43 představuje dvě možnosti konstrukčního umístění pružiny u jehlové uzavíratelné vložky.



Obr. 43 Jehlové uzavíratelné vložky [6]

a - s vnější pružinou, b - s vnitřní pružinou

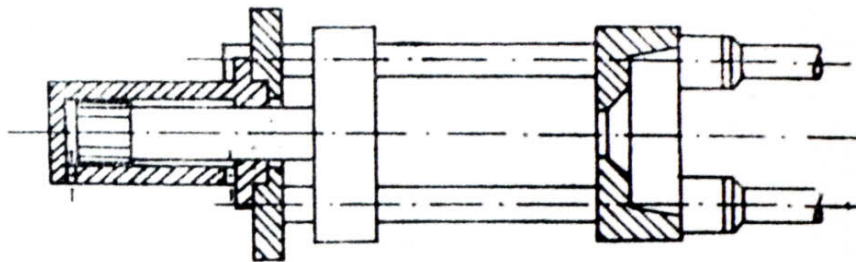
Nevýhodou uzavíratelných trysek oproti otevřeným je omezené proudění taveniny uzavíracím mechanismem. Dále hrozí vzniku mrtvých prostorů, kde se může tavenina zastavit a degradovat. Tento problém řeší uzavíratelné trysky ovládané z vnější strany, viz Obr. 44. [6]



Obr. 44 Uzavíratelná vložka ovládaná zvnějšku [6]

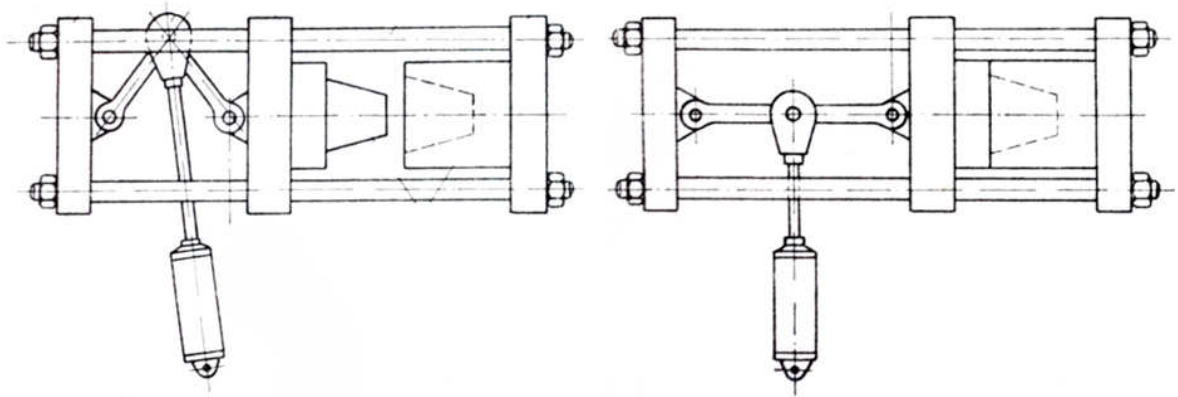
3.2.2 Uzavírací jednotka

Úkolem uzavírací jednotky je co nejrychleji uzavírat a otevírat formu a držet ji uzavřenou větší silou než vyvolává tlak taveniny na stěny dutiny formy. V opačném případě by se forma při vstřikování pootevřela, což by mělo za následek zatečení taveniny do dělicí roviny a výrobu zmetku. Při činnosti formy je vhodné rozlišovat přísouvací sílu a uzavírací sílu. Současné uzavírací jednotky dokážou bohatě programovat průběh rychlosti uzavírání a velikost uzavírací síly. [6]



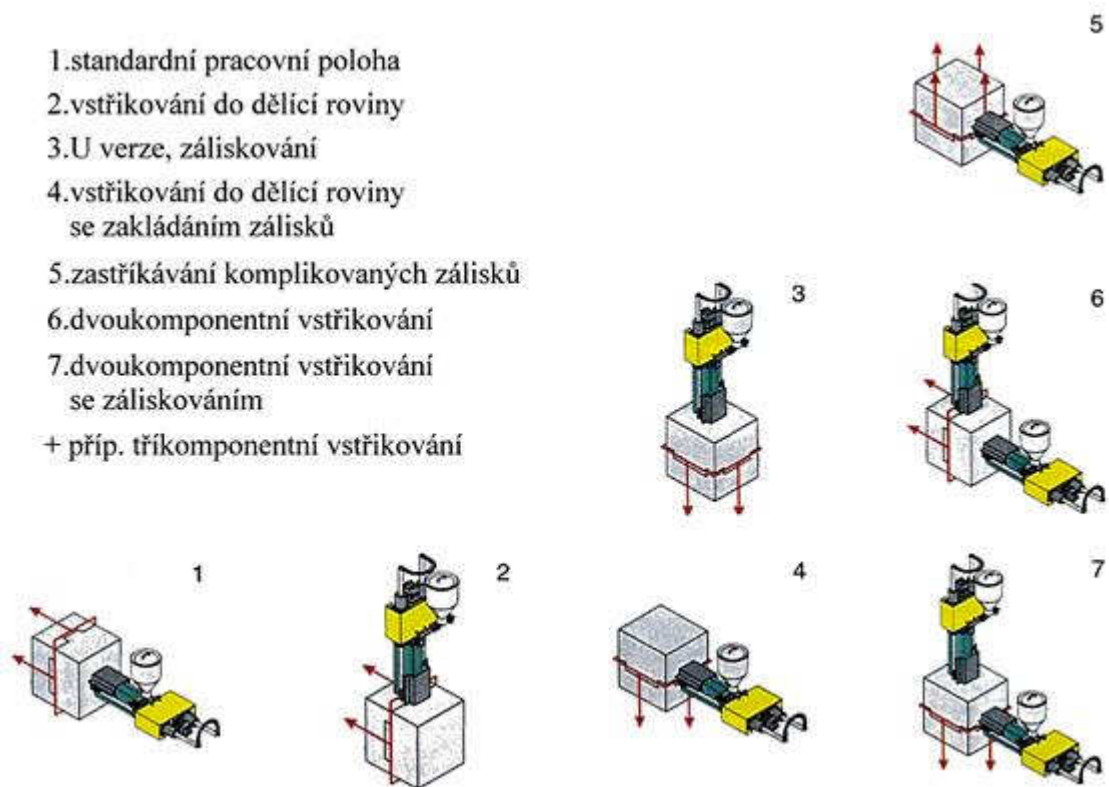
Obr. 45 Hydraulická uzavírací jednotka [6]

Hlavní části uzavírací jednotky jsou: opěrné desky spojené s ložem stroje, pohyblivé desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy, upínací desky s otvorem pro trysku stroje, na kterou se připevní nepohyblivá část vstřikovací formy, vedení pro pohyblivou desku, z uzavíracího a přidržovacího mechanismu. Existuje celá řada uzavíracích systémů, např. hydraulické (Obr. 45), mechanické, kombinace hydraulického a mechanického způsobu (závorování) (Obr. 46) a elektrické.



Obr. 46 Uzavírací jednotka s kloubovým uzávěrem ovládaným hydraulicky [6]

Nejčastější poloha mezi uzavírací jednotkou a vstřikovací jednotkou je horizontální. Jsou však případy, kdy je odlišné uspořádání výhodnější, např. při vícekomponentním vstřikování. Další možné způsoby uspořádání vzájemné polohy mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou uvádí Obr. 47. [9]



1. standardní pracovní poloha
 2. vstřikování do dělicí roviny
 3. U verze, záliskování
 4. vstřikování do dělicí roviny se zakládáním zálisků
 5. zastříkávání komplikovaných zálisků
 6. dvoukomponentní vstřikování
 7. dvoukomponentní vstřikování se záliskováním
- + příp. tříkomponentní vstřikování

Obr. 47 Vzájemná poloha mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou [9]

3.2.3 Vstřikovací forma

Funkcí vstřikovací formy je dát tavenině výsledný tvar výstřiku a v této podobě ho ochladit do stavu, kdy už se nedeformuje. Výstřik lze poté bez obav vyjmout z formy.

Konstrukce a výroba forem je náročná na odborné znalosti a finanční náklady, jelikož musí splňovat mnoho protichůdných předpokladů. Forma musí odolávat vysokým tlakům, nesmí se deformovat. Vyrobené výstřiku musí odpovídat přesným rozměrům a tyto výstřiky musí být jednoduše vyjmutelné z formy. Toto vše musí forma zvládat nejlépe automaticky a hlavně po celou dobu její životnosti. [6]

Materiál formy závisí na druhu zpracovávaného plastu, na použité technologii, na velikosti série a výrobku, odolnosti vůči korozi a opotřebení, na ceně, atd. Životnosti formy zásadně ovlivňuje i tepelné zpracování tvarových částí. Již při konstrukci formy se musí počítat se smrštěním taveniny při chladnutí a umístěním dělicích rovin kvůli toleranci rozměrů výstřiku. Formu lze rozdělit na stranu levou (pohyblivou) a stranu pravou (nepohyblivou).

Formy lze dělit na skupiny:

- dle násobnosti: jednonásobné a vícenásobné,
- dle konstrukčního řešení: dvoudeskové, třideskové, vytáčecí, etážové, atd.
- dle umístění vstřiku: se vstřikem do dělicí roviny a kolmo k dělicí rovině. [9]

Při určování násobnosti formy je vždy potřeba si uvědomit možnosti stroje, zejména jeho vstřikovací kapacitu. Pro velké výstřiky, případně pro ověřovací série se používá jednonásobná forma. Vícenásobné formy se používají u velkých sérií výstřiků, kde je toto řešení hospodárnější. Násobnost formy má vliv i na konstrukci samotné formy. Na Obr. 48 je pro názornost provedeno srovnání těchto konstrukcí. [6]



Obr. 48 Ukázka konstrukce jednonásobné a vícenásobné vstřikovací formy [14]

Forma je složena z tvarových desek, temperačního systému, vtokového systému, vyhazovacího systému a upínacích a vodících elementů. Tyto části lze rozdělit na konstrukční a funkční. Funkční části jsou v kontaktu s taveninou a udělují jí výsledný tvar. Konstrukční části zaručují činnost formy.

Doba, za kterou tavenina naplní dutinu formy, je velmi krátká, tudíž je důležité odvzdušnění formy, aby vzduch hnaný před čelem taveniny měl kudy uniknout z dutiny formy. V opačném případě vznikají bubliny, spálená místa, špatně vyplněné dutiny, vysoké tlaky či jiné vady na výstřících. Odvzdušnění je realizováno odvodem vzduchu skrz dělicí rovinou a odvzdušujícími kanálky, vyhazovači, apod. Platí, že by odvzdušnění nemělo zanechávat stopy na výstřiku a mělo by být vyvedeno nejlépe na protilehlé straně vtoku. [9]

Vtokový systém

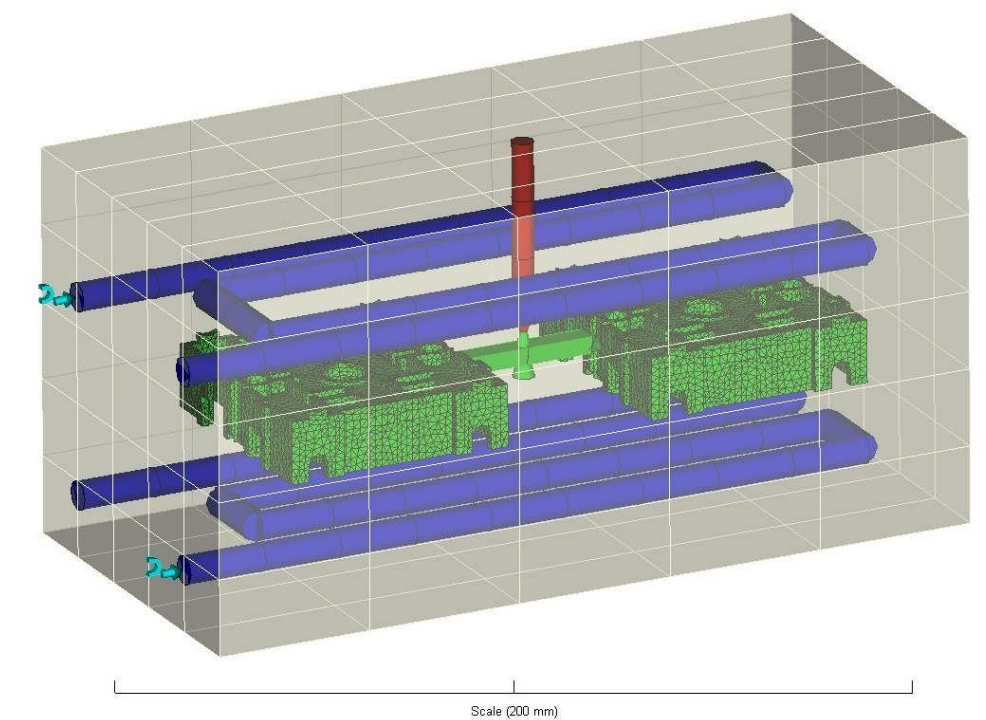
Jakost výstřiku a produktivitu procesu nejvíce ovlivňuje vtokový systém. Vtokový systém představuje systém kanálků a ústí vtoku, který zajišťuje rozvod taveniny a plnění tvarové dutiny formy. Měl by být snadno oddělitelný od výstřiku a zároveň by měl jít snadno vyhodit z formy. Konstrukce vtokového systému se odvíjí od složitosti a násobnosti formy. Umístění a druh vtoku má velký vliv na proudění taveniny, vytváření studených spojů, vzduchových kapes, orientaci makromolekul a případných plniv, anizotropii vlastností a rozměrů a tím i na kvalitu samotného výstřiku. Správně navržený vtok má zajistit plnění dutiny taveninou bez zásadních teplotních a tlakových ztrát a pokud možno ve všech místech najednou. Vtokový systém u vícenásobných forem dále musí zajistit plnění všech dutin ve stejný čas a za stejných technologických podmínek, aby jednotlivé výstřiky měly stejné vlastnosti a vzhled. [9]

Základní a konstrukčně nejjednodušší podobou vtoku je kuželový vtok, který se používá u jednonásobných forem. Využití najde zejména u masivních vylisků, kde je nutné dlouhé působení dotlaku. Největší nevýhodou kuželového vtoku je obtížné odstranění od výstřiku a nutnost následného začištění jeho stop.

Automatizace vstřikovacího procesu vyžaduje odtrhávání vtokového zbytku při vyhazování přímo ve formě. Proto byl vyvinut tzv. bodový vtok. Tento druh vtoku se uplatňuje především u třídeskových forem. [6]

Temperační systém

Aby byl proces vstřikování hospodárný, musí tavenina uvnitř formy zchladnout a zatuhnout co nejrychleji. K tomuto účelu jsou vstřikovací formy opatřeny temperačním systémem. Temperačním systémem se rozumí systém dutin a kanálů, kterými proudí temperační médium přijímající teplo z taveniny. Důsledkem nerovnoměrného chlazení výstřiků jsou deformace rozměrů a vnitřní pnutí vedoucí někdy i k prasknutí výstřiku. Proto je žádoucí, aby ochlazování výstřiku probíhalo rovnoměrně po celé jeho ploše.



Obr. 49 Ukázka temperačního systému (modře)

Temperační systém na Obr. 49 je rozdělen do dvou samostatných větví, každá se nachází na jedné straně vstřikovací formy. Toto rozdělení bývá nejběžnější. Jednotlivé větve temperačního systému mohou mít jiné chladicí médium, teplotu, rychlost proudění atd. Při konstrukci temperačního systému je důležité zohlednit celkové řešení formy včetně umístění vtoků, vyhazovacího systému, jiných dílů, atd. Průřez temperačních kanálů bývá nejčastěji kruhový, ale lze se setkat i s obdélníkovými kanály. Obecně platí, že jak z hlediska přestupu tepla, tak i pevnostního je výhodnější použít více kanálů s menším průřezem než méně kanálů s velkým průřezem. Délka a rozložení temperačních kanálů má být takové, aby rozdíl teplot na vstupu a výstupu nebyl větší než 3°C .

Vyhazovací systém

Když tavenina zatuhne a forma se otevře, je potřeba výstřik společně s vtokovým systémem dostat ven z formy. V zájmu zachování hospodárnosti je tato činnost automatizována a obstarává ji vyhazovací systém. Nejčastější způsob vyhazování je pomocí mechanických vyhazovacích kolíků, stíracích desek apod. Dalším možným způsobem je pneumatické vyhazování, které ale není tolik rozšířené. V praxi se síly potřebné na vyhození výrobku nepočítají. Důležité je umístit vyhazovače mimo pohledové části výstřiků a do zpevněných částí jako jsou např. žebra. [9]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Při vstřikování polymerních výrobků dochází k okopírování negativu povrchu dutiny formy a tím i jakosti povrchu formy. Cílem této diplomové práce byl výzkum vlivu jakosti povrchu formy na jakost polymerních výrobků a zjištění hranice, za kterou už není další zlepšení povrchu formy žádoucí a efektivní, neboť se neprojeví na jakosti výrobku a tím navyšuje náklady a čas potřebný na výrobu forem. Pro výzkum byly použity dva druhy vstřikovaného materiálu a to polypropylen a akrylonitrilbutadienstyren. Důvodem byla především jejich rozdílnost v uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhém stavu. V případě PP má uspořádaný stav makromolekulárních řetězců, je semikrystalický, kdežto ABS má neuspořádaný stav, je amorfní. Pro výrobu vložky formy byly použity tři druhy materiálu a to měď, dural a nástrojová ocel, aby se zjištění výzkumu dala více zevšeobecnit.

Úvod teoretické části byl věnován popisu a rozdělení dokončovacích metod jako je např. broušení, jemné frézování, válečkování nebo chemické lapování. Dále se zabývala popisem vyhodnocení jakosti povrchu obrobku po obrábění a integritou povrchu. Poslední úsek teoretické části práce obsahuje popis technologie vstřikování plastů a popis zařízení nutných pro výrobu plastových výstřiků.

Praktická část diplomové práce byla věnována výrobě vložek vstřikovací formy ze tří materiálů, při použití odlišných dokončovacích operací či kombinací těchto operací, s cílem vytvořit rozdílné jakosti povrchu tvarové dutiny. Před samotnou výrobou polymerních vzorků, byla na každé tvarové vložce měřena jakost povrchu funkční plochy. Vyrobené tvarové vložky byly následně použity ve vstřikovací formě, umožňující jednoduchou montáž či demontáž tvarových vložek přímo na vstřikovacím stroji, a byly vyrobeny polymerní vzorky z výše zmíněných polymerních materiálů. Po výrobě těchto vzorků bylo taktéž provedeno měření jakosti povrchu a byl porovnán vliv jakosti povrchu odpovídající tvarové vložky na jakost povrchu vyrobeného polymerního vzorku.

5 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE

5.1 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470H 1000-400

Pro výrobu zkušebních vzorků byl použit školní vstřikovací stroj značky Arburg. Konkrétně typ Allrounder 470H 1000-400 na Obr. 50 níže, který je umístěný v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství.



Obr. 50 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470H [14]

Základní parametry stroje shrnuje následující Tab. 1:

Tab. 1 Základní vlastnosti vstřikovacího stroje [14]

Uzavírací síla	1000 [kN]
Min/max. výška formy	250/500 [mm]
Max. vzdálenost mezi upínacími deskami	350 [mm]
Maximální hmotnost formy	760 [kg]
Rozměr upínacích desek	637x637 [mm]
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	470x470 [mm]
Maximální vstřikovací tlak	158 [MPa]
Vstřikovací rychlost	814 [cm ³ /s]
Maximální hmotnost vstřikované dávky	232 [g]
Maximální objem vstřikované dávky	254 [cm ³]
Průměr šneku	45 [mm]
Zdvih šneku	160 [mm]
Poměr šneku L/D	18 [-]
Maximální tlak hydraulického systému stroje	158 [MPa]
Rozměry vstřikovacího stroje (d x š x v)	4030x1645x2050 [mm]
Hmotnost stroje (bez oleje)	4900 [kg]

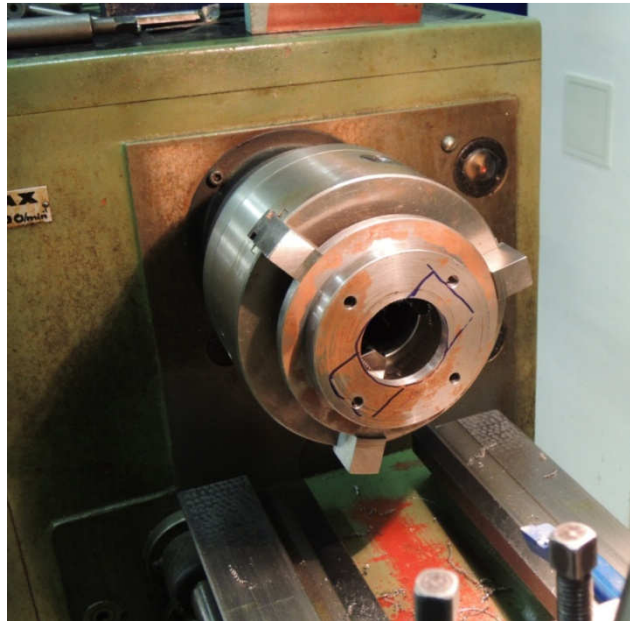
5.2 Vstřikovací forma

Aby bylo možné zkušební vzorky vyrobit, je zapotřebí nejen vstřikovacího stroje, ale i formy. Vstřikovací forma na Obr. 51 byla zkonstruována tak, aby bylo možné měnit tvarové vložky. Forma je jednonásobná s kuželovým vtokem. Tvarová vložka zároveň sloužila jako stírací deska. Díky tomu bylo po otevření formy možné vložku vysunout z dělící roviny a tím usnadnit a zrychlit výměnu tvarové vložky.



Obr. 51 Vstřikovací forma

Jelikož byla vstřikovací forma používána na jiném vstřikovacím stroji, než byla navržena, bylo nutné v první řadě přidat na vstřikovací formu dvě izolační desky z epoxidové pryskyřice, neboť byla forma příliš malá a na vstřikovacím stroji by nedošlo k jejímu úplnému uzavření. Po této úpravě bylo nutné upravit taktéž středící kroužek na straně plastikační jednotky, z důvodu malé velikosti otvoru pro trysku vstřikovací jednotky. Úpravu středícího kroužku znázorňuje obr. 52. Nejprve se na soustruhu zvětšila díra středícího kroužku a poté bylo na frézce vyrobeno obdélníkové vybrání pro specifický tvar trysky vstřikovací jednotky.



Obr. 52 Úprava středícího kroužku vstřikovací formy

5.3 Sušička granulátu Arburg Thermolift 100-2

Mnoho polymerních materiálů je hydrofilních a před zpracováním je nutné je zbavit vlhkosti sušením. V tomto konkrétním případě byl použit materiál ABS, který vyžaduje pro kvalitní výstřiky, aby byl před vstřikováním vysušen. Sušení proběhlo v sušičce značky Arburg, přesněji v modelu Thermolift 100-2, která je na Obr. 53.



*Obr. 53 Sušička Arburg
Thermolift 100-2*

Tato sušička pracuje jak s přívodem čerstvého vzduchu, tak i s recirkulací vzduchu. Dále je možné dodávat kontinuálně granulát do vstřikovacího stroje, ale této možnosti nebylo

nvyužito. Celý stroj je ovládán pomocí řídicí jednotky Selogica, která může být naprogramována na samostatné spuštění a ukončení procesu sušení dle přání uživatele. [15]

Základní parametry stroje shrnuje následující Tab. 2:

Tab. 2 Základní vlastnosti sušičky [15]

Kapacita	100 [l]
Příkon topení	4,5 [kW]
Příkon ventilátoru	0,95 [kW]
Maximální spotřeba	6,2 [kW]
Množství suchého vzduchu	90 [m ³ /hod]
Množství regenerovaného vzduchu	20 [m ³ /hod]

5.4 Soustruh TOS Žebrák S32

Tento univerzální hrotový soustruh na Obr. 54 byl použit k většině úkonů při výrobě tvarových vložek pro vstřikování zkušebních vzorků a to včetně povrchů. Dále na něm byl upravován středící kroužek vstřikovací formy. Jako procesní kapalina byla použita 5% emulze Anc Fod Microtrend 217M.



Obr. 54 Soustruh TOS Žebrák S32

Základní parametry stroje shrnuje následující Tab. 3:

Tab. 3 Základní vlastnosti soustruhu

Otáčky	20-3200 [ot/min]
Počet rychlostí	3x18
Točný průměr	190 [mm]
Vzdálenost mezi hroty	750 [mm]

5.5 Univerzální frézka FHV-50PD

Univerzální frézka na Obr. 55 se používá pro obrábění kovových i nekovových dílců. Stroj je určen pro všechny důležité funkce vrtání a frézování: vertikální, horizontální, ale i úhlové. Posuv je řízený ručně nebo strojně.



Obr. 55 Univerzální frézka FHV-50PD

Frézku byla použita k vrtání a zahlubování otvorů tvarových vložek a k úpravě středícího kroužku vstřikovací formy.

Základní parametry stroje shrnuje následující Tab.4:

Tab. 4 Základní vlastnosti frézky [16]

Příkon motoru	1,5 [kW]
Max. průměr vrtání	50 [mm]
Max. průměr horizontálního frézování	100 [mm]
Max. hmotnost obrobku	100 [kg]
Otáčky vertikálního vřetene	115-1750 [ot/min]
Pracovní zdvih v ose Z	380 [mm]
Rozsah rychlosti posuvu	18-300 [mm/min]

5.6 Rovinná bruska BRH 20.03F

Jedná se o rovinnou brusku s horizontálním vřetenem a pravouhlým stolem. Tento model, uvedený na Obr. 56, se vyznačuje tím, že podélný pohyb vykonává stůl a příčný pohyb vřeteník spolu se stojanem. Vertikální pohyb vykonává také vřeteník se stojanem.



Obr. 56 Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F

Brusku byla použita pro mezioperaci broušení při přípravě vložek vstříkovací formy s nejlepší jakostí povrchu.

Základní parametry stroje shrnuje následující Tab.5:

Tab. 5 Základní vlastnosti brusky [21]

Pracovní plocha stolu	200x630 [mm]
Rozměry brousícího kotouče	250x20-50x76 [mm]
Rychlost stolu plynule regulovatelná	1-30 [m/min]
Otáčky brousícího vřetene	2550 [ot/min]
Výška stroje	2240 [mm]
Hmotnost stroje	1860 [kg]

Jako brusný kotouč byl zvolen kotouč 98A60K9V01 o vnějším průměru 220mm. Kotouč tvoří světle růžový umělý korund v keramickém pojivu. Je vhodný na broušení oceli. Procesní kapalina byla použita 5% emulze Anc Fod Microtrend 217M.

5.7 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-201

Jak pro měření profilu drsnosti povrchu vložek vstřikovací formy, tak i pro měření samotných zkušebních vzorků byl použit drsnoměr japonské firmy Mitutoyo, konkrétně model Surftest SJ-201. Tento model na Obr. 57 je tzv. dílenským profiloměrem, který se skládá ze dvou hlavních částí: senzoru a řídicí jednotky. Narozdíl od většího školního modelu SJ-301 tento model nemá integrovanou tiskárnu, postrádá dotykový displej a celkově je menší. Tomu odpovídá i zhoršení obsluhy přístroje, které je neintuitivní a bez návodu k použití lze jen stěží přístroj nastavit. Největší mírou se na tom podílí malá velikost displeje, který dokáže zobrazit pouze 3 řádky o velmi omezeném počtu znaků.



Obr. 57 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-201

Dalším rozdílem oproti vyspělejšímu modelu je možnost použití senzoru bez prodlužovacího kabelu, kdy se senzor vloží do těla řídicí jednotky a vytvoří tak jeden celek, takže je pro dílenské použití mnohem vhodnější. Této vlastnosti nebylo využito. Základní parametry stroje shrnuje následující Tab.6:

Tab. 6 Základní vlastnosti drsnoměru [17]

Měřicí rozsah	-200 až +150 [μm]
Měřicí rozsah v ose X	12,5 [mm]
Poloměr hrotu	2 [μm]
Přítlačná síla hrotu	0,75 [mN]
Měřený profil	P, R, DIN 4776
Parametry měření	Ra, Ry, Rz, Rq, S, Sm, Pc, R3z, mr, Rt, Rp, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo
Základní délka	0,25; 0,8; 2,5; 8 [mm]
Počet zákl. délek	1, 3, 5, L
Filtr	Gauss 2 CR, PC75, Gauss 50
Rozlišitelnost	0,01 [μm]

5.8 Materiály

5.8.1 Tvarové vložky vstřikovací formy

Pro zjištění vlivu materiálu vstřikovací formy, při kopírování jakosti povrchu z tvarové vložky na polymerní výrobek, byly použity tři materiály, které se v praxi běžně ve vstřikovacích strojích používají. Konkrétně se jednalo o nástrojovou ocel, měď a dural. Dural bývá používán pro malosériové výroby polymerních materiálů, ale zároveň jej lze s mědí využít i jako chladících částí. Tyto tři materiály byly vybrány rovněž z důvodu velmi odlišných teplotních vodivostí. Proto bylo nutné zjistit i vliv rychlosti ochlazování tvarové vložky na výslednou jakost polymerního výrobku a na základě těchto zjištění upravit délku chlazení výstřiku dle použitého materiálu tvarové vložky.

Ocel EN 1.2343 (ČSN 19 552)

Jedná se o středně legovanou chrom-molybden-vanadovou ocel určenou pro práci za tepla. Tato ocel patří do třídy 19, tj. nástrojová ocel. Je kalitelná v oleji a na vzduchu. Dále je vhodná pro nástroje chlazené vodou. Mezi obvyklé použití této oceli patří na nástroje velmi namáhané za tepla, jako jsou lisovací trny a matrice, nástroje na protlačování, nástroje pro výrobu šroubů a matic za tepla, nástroje pro tlakové lití, lisovací nářadí, vložky zápusťek, nože pro stříhání za tepla. [18]

Chemické složení oceli 1.2343 uvádí Tab.7 a vybrané vlastnosti této oceli potom Tab. 8.

Tab. 7 Chemické složení oceli 1.2343 [18]

Legující prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
Obsah [%]	0,33-0,41	0,80-1,20	0,25-0,50	4,80-5,50	1,10-1,50	-	0,30-0,50

Tab. 8 Vybrané vlastnosti oceli 1.2343 [18]

Hustota ρ	7850 [kg.m ⁻³]
Modul pružnosti E při 20°C	215000 [MPa]
Mez pevnosti Rm po zušlechtění	1200 [MPa]
Měrná tepelná kapacita C _p při teplotě 20°C	460 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná vodivost λ při teplotě 20°C	25 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Teplotní vodivost a	0,05 [m ² .s ⁻¹]

Mezi vlastnosti této oceli patří vysoká pevnost za zvýšených teplot, odolnost proti popouštění, odolnost proti tvorbě trhlin vlivem tepelné únavy, odolnost proti chemickému působení roztavených kovů, dobrá tepelná vodivost a nízký součinitel tepelné roztažnosti, dostatečná prokalitelnost, stálost rozměrů po kalení a popouštění, dobrá obrobitelnost a lešitelnost. [18]

V našem případě byla ocel zušlechtěna, což se projevilo změnou vlastností materiálu směrem ke středu polotovaru.

Měď EN CW004A

Tento materiál se dá označit za téměř čistou měď. Mezi hlavní rysy patří výborná elektrická a tepelná vodivost. Zpracovává se za studena i za tepla zejména ražením a hlubokým tažením. Po žhání na vzduchu musí následovat moření k odstranění oxidické povrchové vrstvy nebo lze proces žhání provést v neutrální argonové atmosféře. Vzhledem k obsahu kyslíku ve slitině nesmí být použita vodíková atmosféra při žhání. Hrozí totiž nebezpečí výbuchu. Mimo jiné vodík silně narušuje povrch této slitiny. Chemické složení slitiny je: Cu+Ag: >99,9%; O: <0,04%. [19]

V Tab. 9 jsou uvedeny vybrané vlastnosti mědi EN CW004A.

Tab. 9 Vybrané vlastnosti mědi EN CW004A [19]

Hustota ρ	8890 [kg.m ⁻³]
Modul pružnosti E při 20°C	115000 [MPa]
Mez pevnosti Rm po zušlechtnění	395 [MPa]
Měrná tepelná kapacita C _p při teplotě 20°C	380 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná vodivost λ při teplotě 20°C	388 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Teplotní vodivost a	1,02 [m ² .s ⁻¹]

Svařitelnost tohoto materiálu je dobrá za předpokladu použití technologie sváření MIG/TIG. Materiál není vhodný pro odporové svařování a svařování obloukem. [19]

Obrábění použité mědi je extrémně těžké. To se bohužel projevilo jak při následném soustružení, tak i při broušení, kdy bylo potřeba použít procesní kapaliny, neboť vznikl velmi nekvalitní povrch součásti.

Dural EN AW-7075 (AlZnMgCu1.5)

Dural je obchodní název pro slitiny 90-96% hliníku a 4-6% mědi s přísadami hořčíku, manganu atd. Dural má až pětkrát vyšší pevnost a tvrdost oproti čistému hliníku a má i nepatrně větší hustotu. Pevnost i tvrdost lze dále zvýšit tepelným zpracováním.

Tato slitina se používá v různých oblastech průmyslu ve tvaru lisovaných a válcovaných polotovarů, volných a zápusťkových výkovek. Je určen pro vysoce namáhané konstrukce dlouhodobě pracující do teploty 120°C, např. pro leteckou výrobu: kryty, výztuže, přepážky. Materiál má vysokou mez pevnosti a nízkou tažnost. Je citlivý na vrubový účinek. Dále je vhodný pro nasazení do kryogenních teplot. Používá se pouze ve stavu vytvrzeném za tepla. Zvyšováním teploty stárnutí je doprovázeno snížením pevnosti i tažnosti a zvýšením korozní odolnosti. [20]

Chemické složení duralu EN AW-7075 (AlZnMgCu1.5) uvádí Tab.10 a vybrané vlastnosti duralu potom Tab. 11.

Tab. 10 Chemické složení duralu AW-7075 [20]

Legující prvek	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn
Obsah [%]	5,00-7,00	1,80-2,80	1,40-2,00	0,10-0,25	0,20-0,60

Tab. 11 Vybrané vlastnosti duralu AW-7075 [20]

Hustota ρ	2850 [kg.m ⁻³]
Modul pružnosti E při 20°C	76000 [MPa]
Mez pevnosti R _m po zušlechťení	500 [MPa]
Měrná tepelná kapacita C _p při teplotě 20°C	960 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná vodivost λ při teplotě 20°C	150 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Teplotní vodivost a	0,16 [m ² .s ⁻¹]

Tento materiál není vhodný ke svařování, stejně tak pro aplikaci ve slané vodě a eloxování. Obrobitelnost je na dobré úrovni. [20]

5.8.2 Vstříkované materiály

Materiály ke vstříkování zkušebních vzorků byl vybrán dle následujících požadavků: snadné zpracování, dobré tokové vlastnosti, nízká cena a snadná dostupnost. Proto se vstříkoval polypropylen (PP) a akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Dále bylo nutné vzít v úvahu vstříkovací formu. Použitá vstříkovací forma není temperována, a proto bylo upuštěno od použití třetího předem zvoleného materiálu PC, který vyžaduje teplotu formy okolo 90°C, čehož nebylo možné u této formy dosáhnout a výrobky by tak byly pro měření drsnosti povrchu nepoužitelné.

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

ABS je amorfni termoplast, který dobře odolává mechanickému poškození, zejména rázům, i při nízkých teplotách. Vlhkost absorbuje málo, přesto je potřeba materiál před vstříkovaním sušit. Materiál chemicky dobře odolává kyselinám, zásadám, tukům, olejům a alkoholu. Krátkodobě snese teplotu 100°C. Vlivem UV záření ABS křehne, proto je nutné výrobky pokrýt ochrannou vrstvou absorbující UV záření. Je zdravotně nezávadný. Používá se v nábytkářském průmyslu, v automobilovém průmyslu, na trubky, na domácí spotřebiče atd.

Tento konkrétní materiál má obchodní název Starex High Gloss ABS HG-0760. Jak již z názvu vyplývá, jedná se o materiál s vysokým leskem povrchu, což by se mělo projevit pozitivně na kopírování jakosti povrchu vložek vstříkovací formy. Materiál je barven modrým pigmentem. Výrobce je Samsung Cheil Industries.

Základní vlastnosti polymeru uvádí Tab.12:

Tab. 12 Vybrané vlastnosti ABS HG-0760 [22]

Modul pružnosti v tahu E	2300 [MPa]
Tvrдость	114 [HB]
Hustota	1,05 [g/cm ³]

Polypropylen (PP)

Polypropylen patří do skupiny semikrystalických termoplastů, polyolefinů. Podíl krystalinity je 60-75%, čímž je neprůhledný. Používá se na výrobky, kde je žádána tuhost, mechanická pevnost, elektroizolační vlastnosti a nízká cena. Dále se vyznačuje dobrou chemickou odolností, dlouhodobou tepelnou použitelností kolem 100 °C a odolností proti korozi za působení napětí. Používá se na výrobu vláken, obalů, fólií.

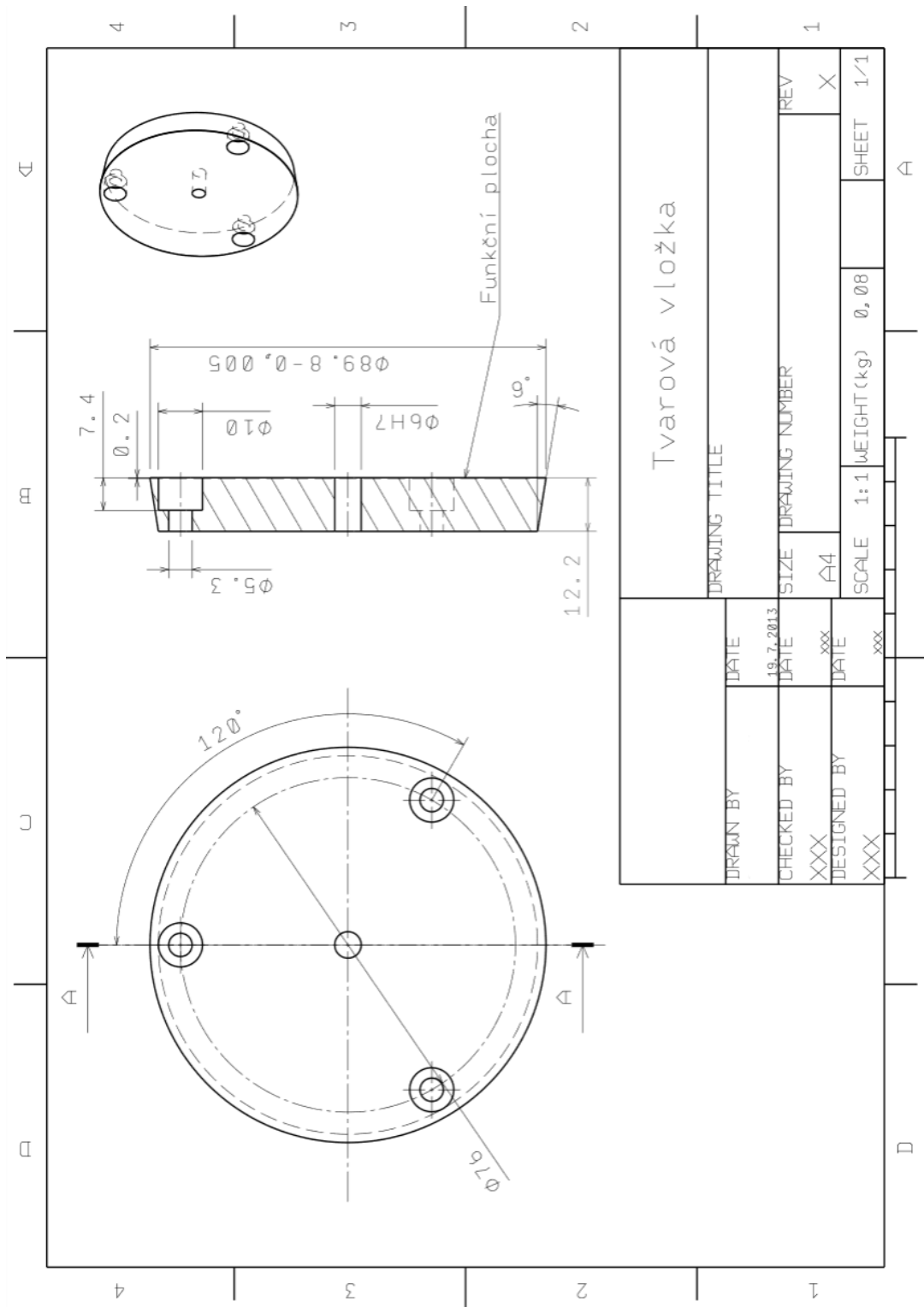
Zvolený materiál je navíc plněn z 20% krátkými skleněnými vlákny, která zlepšují mechanické vlastnosti jako např. modul pružnosti. Přesněji se jedná o materiál s názvem SYNTEGUM 1020 AFV 00/HMFL. Je barven černým pigmentem. Jeho základní vlastnosti jsou shrnuty v Tab.13:

Tab. 13 Vybrané vlastnosti PP 1020 AFV 00/HMFL [23]

Modul pružnosti v tahu E	4300 [MPa]
Tvrдость	74 [HB]
Hustota	1,04 [g/cm ³]
Obsah skleněných vláken	20 [hm.%]

6 NÁVRH A VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK

Aby bylo možné vyrobit zkušební vzorky s různou jakostí povrchu, bylo zapotřebí vyrobit nejprve vložky se specifickými nároky na jakost povrchu funkční plochy dle výkresu na Obr. 58:



Obr. 58 Výkres vložky vstříkovací formy

Vložky byly zhotoveny ze tří materiálů: dural, měď a ocel. Každý materiál reprezentovalo 10 vložek, dohromady bylo tedy 30 vložek. Každá vložka měla odlišnou jinou drsnost povrchové plochy, která byla v přímém styku se vstříkovaným polymerem. Vzorke byly očíslovány od 1 do 10 dle výsledné drsnosti jejich funkčních ploch. Nejlepší jakost povrchu byla dosažena u vložky s označením 1, naopak vložka s číslem 10 reprezentovala nejhorší jakost povrchu. Jednotlivá čísla měla alespoň rámcově odpovídat určité hodnotě drsnosti povrchu napříč všemi materiály. Dosažení naprosto přesné jakosti povrchu pro jednotlivá čísla u všech materiálů tvarových vložek je takřka nemožné. Vložky z mědi a duralu mají velmi odlišné vlastnosti při obrábění a dokončování. Tudíž při použití stejných technologických podmínek, mohlo dojít k dosažení odlišné jakosti povrchu než u ocelových vzorků. Pokud se jakosti povrchu lišily příliš, byly technologické podmínky upraveny tak, aby se jednotlivá čísla vložek pro měď, dural i oceli lišily pouze nepatrně.

Funkční plocha vzorků č. 10 až 6 byla zhotoven pouze soustružením. U vzorků č. 5 až 1 po soustružení následovalo ještě broušení a další metody dokončení. I přes veškerou snahu se nepodařilo u měděných a hliníkových vložek dosáhnout stejné drsnosti jako u vložek ocelových. Příčinou spočívá v tom, že tvrdá kalená ocel se obrábí snáze než měkké měď a dural.

Jelikož soustružení probíhalo na soustruhu TOS Žebrák S32, který má krokově stavitelné otáčky vřetena, nebylo možné plynule ovlivnit řeznou rychlost, která se zmenšující vzdáleností k ose otáčení klesá dle vztahu:

$$v_c = \frac{d \cdot n \cdot \pi}{1000 \cdot 60} \quad (3)$$

Kde: v_c - řezná rychlost [m/s],

d - průměr obrobku [mm],

n - otáčky [ot/min],

6.1 Postup výroby vložky

- 1) Z tyče kruhového průřezu byl na soustruhu upíchnut materiál šířky tloušťky vložky s přídavkem 1mm na pozdější zhotovení povrchu funkční plochy.
- 2) Na soustruhu bylo srovnáno čelo vložky a vyvrtána díra $\Phi 6H7$.
- 3) Obrobek byl umístěn na přípravek frézky a byly vytvořeny otvory $\Phi 3,5\text{mm}$ a jejich zahloubení.

4) Obrobek byl upevněn na přípravek soustruhu a bylo vytvořeno obvodové zkosení.

Všechny výše uvedené kroky znázorňuje Obr. 59.



Obr. 59 Krok 1 až 4 při výrobě vložky vstřikovací formy

6.2 Postup výroby funkční plochy

6.2.1 Ocel EN 1.2343 (ČSN 19 552)

Vložka č.10 až 6:

Soustruženo dle Tab.14.

Tab. 14 Technologické parametry soustružení ocelových vložek

Technologie		Soustružení				
Č. vzorku		10	9	8	7	6
Hloubka řezu	a_p [mm]	0,10	0,30	0,10	0,10	0,10
Přísuv	f [mm/ot]	0,32	0,15	0,16	0,04	0,01
Otáčky	n [1/min]	125	125	125	125	250
Řezná kap.		Ne	Ne	Ne	Ne	Ano

Vložka č.5:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005$ mm; posuv $v_f=7$ m/min; řezná rychlost $v_c=29,4$ m/s.
- Broušeno brusným papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut.

Vložka č.4:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax $20\mu\text{m}$ za přítomnosti procesní kapaliny. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 10 minut.

Vložka č.3:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Broušeno brusným papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut.
- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax $10\mu\text{m}$ za přítomnosti procesní kapaliny. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 15 minut.

Vložka č.2:

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,10\text{mm}$; přísv $f=0,01\text{mm/ot}$; 250ot/min .
- Leštěno brousicími kameny se zrnitostí 600, 900 a 1200 za užití petroleje jako procesní kapaliny.
- Leštěno plstí s diamantovou pastou s velikostí zrna $2,5\mu\text{m}$.

Vložka č.1:

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,10\text{mm}$; přísv $f=0,01\text{mm/ot}$; 250ot/min .
- Leštěno brousicími kameny se zrnitostí 600, 900 a 1200 za užití petroleje jako procesní kapaliny
- Leštěno plstí s diamantovou pastou s velikostí zrna $2,5\mu\text{m}$ a $1\mu\text{m}$.
- Leštěno vatou s diamantovou pastou s velikostí zrna $0,5\mu\text{m}$.

6.2.2 Měď EN CW004A

Vložka č.10 až 6:

Jelikož se jedná o hůře obrobitelný materiál, musela být použita procesní kapalina při veškerém soustružení. Použití procesní kapaliny zajistilo použitelnost výsledných funkčních ploch pro tento experiment. Soustruženo dle Tab.15.

Tab. 15 Technologické parametry soustružení měděných vložek

Materiál		Měď EN CW004A				
Č. vzorku		10	9	8	7	6
Hloubka řezu	a_p [mm]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Přísuv	f [mm/ot]	0,24	0,19	0,15	0,04	0,01
Otáčky	n [1/min]	125	125	125	125	250
Řezná kap.		Ano	Ano	Ano	Ne	Ano

Vložka č.5:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Broušeno brusným papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut.

Vložka č.4:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Leštění plstí s leštící pastou Novapax $20\mu\text{m}$ za přítomnosti procesní kapaliny. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 7 minut.

Vložka č.3:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Broušeno brusným papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut.

- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax 10 μ m za přítomnosti procesní kapaliny. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 10 minut.

Vložka č.2:

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,10$ mm; přísv $f=0,01$ mm/ot; 250ot/min.
- Leštěno brousicími kameny se zrnitostí 600, 900 a 1200 za užití petroleje jako procesní kapaliny.
- Leštěno plstí s diamantovou pastou s velikostí zrna 2,5 μ m.

Vložka č.1:

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,10$ mm; přísv $f=0,01$ mm/ot; 250ot/min.
- Leštěno brousicími kameny se zrnitostí 600, 900 a 1200 za užití petroleje jako procesní kapaliny
- Leštěno plstí s diamantovou pastou s velikostí zrna 2,5 μ m a 1 μ m.
- Leštěno vatou s diamantovou pastou s velikostí zrna 0,5 μ m.

6.2.3 Dural EN AW-7075:**Vložka č.10 až 6:**

Soustruženo dle Tab. 16.

Tab. 16 Technologické parametry soustružení duralových vložek

Materiál	Č. vzorku	Dural EN AW-7075					6	Speciální nůž na obrábění duralu
		10	9	8	7	6		
Hloubka řezu	a_p [mm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
Přísv	f [mm/ot]	0,24	0,19	0,15	0,04	0,01		
Otáčky	n [1/min]	125	125	125	125	250		
Řezná kap.		Ne	Ne	Ne	Ne	Ano		

Vložka č.5:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005$ mm; posuv $v_f=7$ m/min; řezná rychlost $v_c=29,4$ m/s.

- Broušeno brusným papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut.

Vložka č.4:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax $20\mu\text{m}$ za přítomnosti procesní kapaliny. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 9 minut.

Vložka č.3:

- Broušeno s vyjiskřováním a užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,005\text{mm}$; posuv $v_f=7\text{m/min}$; řezná rychlost $v_c=29,4\text{m/s}$.
- Broušeno brusným papírem Klingspor P2000 zrnitosti 2000 za přítomnosti procesní kapaliny. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut.
- Leštěno plstí s leštící pastou Novapax $10\mu\text{m}$ za přítomnosti procesní kapaliny. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 13 minut.

Vložka č.2:

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,10\text{mm}$; přísv $f=0,01\text{mm/ot}$; 250ot/min .
- Leštěno brousicími kameny se zrnitostí 600, 900 a 1200 za užití petroleje jako procesní kapaliny.
- Leštěno plstí s diamantovou pastou s velikostí zrna $2,5\mu\text{m}$.

Vložka č.1:

- Soustruženo s užitím procesní kapaliny: hloubka řezu $a_p=0,10\text{mm}$; přísv $f=0,01\text{mm/ot}$; 250ot/min .
- Leštěno brousicími kameny se zrnitostí 600, 900 a 1200 za užití petroleje jako procesní kapaliny
- Leštěno plstí s diamantovou pastou s velikostí zrna $2,5\mu\text{m}$ a $1\mu\text{m}$.
- Leštěno vatou s diamantovou pastou s velikostí zrna $0,5\mu\text{m}$.

6.3 Značení vložek

Při manipulaci se 30 vložkami může snadno dojít k záměně, proto jsme po dokončení veškerých obráběcích a dokončovacích operací vložky poznačili vyražením čísla a písmena na funkční plochu viz Obr. 60. Číslice značí jakost povrchu funkční plochy a písmeno značí materiál vložky. Jelikož jsme byli limitováni pouze 4 dostupnými písmeny raznic, museli jsme volit označení materiálu nelogicky. Písmeno D reprezentuje měď a písmeno C dural. Tak jsou jednoznačně označeny i zkušební vzorky, protože při vstřikování kopírují povrch vložek. Kalené ocelové vložky byly bohužel příliš tvrdé, a proto je bylo nutné značit lihovým popisovačem, stejně tak i vzorky vystříkнутé na ocelových vložkách.



Obr. 60 Hotové vložky všech 3 materiálů

7 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Vstřikovací forma byla umístěna na vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470H 1000-400. Materiálu ABS bylo naváženo požadované množství a dle materiálového listu byla zvolena teplota sušení 80°C a doba sušení 3 hodiny v sušičce Arburg Thermolift 100-2. Tyto hodnoty se shodují i s doporučením výrobce sušičky uvedeným v návodu. Po usušení byla celá dávka přemístěna do násypky vstřikovacího stroje. Materiál PP nebylo potřeba sušit.

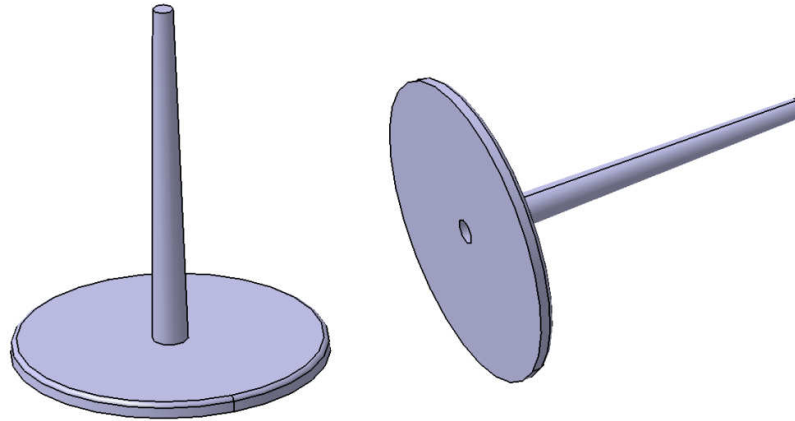
Nastavené parametry vstřikování jsou zaznamenány v Tab. 17. Jelikož nebyla forma temperována, docházelo na začátku vstřikování k potížím s vyhozením výstřiku, který zůstával v pravé straně formy. Výstřik bylo poté nutno obtížně ručně odformovávat. Po několika takovýchto cyklech se forma částečně vytemperovala a tyto problémy se již neobjevily.

Tab. 17 Technologické parametry vstřikování

Parametr	ABS	PP
Vstřikovací rychlost [mm.s ⁻¹]	60	60
Vstřikovací tlak [MPa]	90	100
Doba vstřikování [s]	0,33	0,3
Doba chlazení [s] - ocel	30	30
ostatní mat.	20	20
Dráha dávkování [mm]	12	15
Dráha přepnutí [mm]	5	7
Uzavírací síla [kN]	950	950
Doba dotlaku [s]	6	6
Velikost dotlaku [MPa]	70	80
Doba cyklu [s] - ocel	50,13	50,63
ostatní mat.	44,13	44,63
Teplota pod násypkou [°C]	40	40
Teplota zóny 2 [°C]	190	205
Teplota zóny 3 [°C]	200	220
Teplota zóny 4 [°C]	205	230
Teplota zóny 5 [°C]	210	240
Teplota zóny 6 [°C]	220	245
Teplota trysky [°C]	230	250

Doba chlazení ocelových vložek byla oproti měděným a duralovým vložkám delší, a to z důvodu několikanásobně menší teplotní vodivosti, která ovlivňuje odvod tepla z povrchu tvarové vložky. Aby byl výrobek dostatečně ochlazen, bylo nutné tuto dobu chlazení u ocelových vložek prodloužit.

Pro každou tvarovou vložku bylo vyrobeno 20 vzorků a po důkladné vizuální kontrole bylo vybráno 10 nejlépe reprezentativních vzorků, které měly povrch bez kazů, propadlin či lunkrů. Podobu vystříknutých vzorků včetně kuželového vtoku lze vidět na Obr. 61.



Obr. 61 Model vzorku včetně kuželového vtoku; vytvořeno v programu Catia V5R20

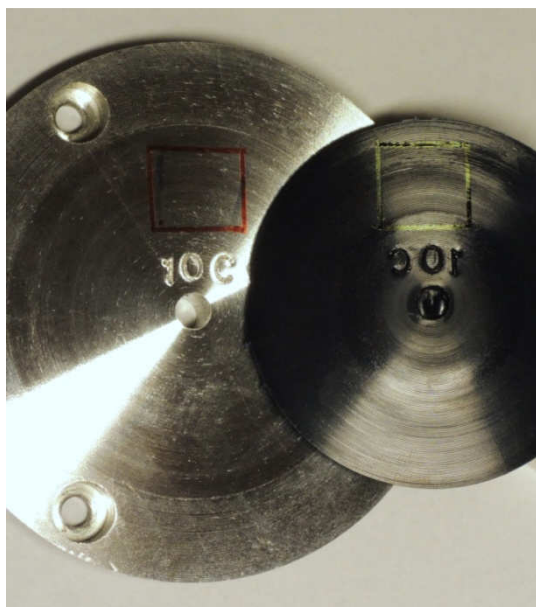
Po vyřídění vzorků jsme následně na každém odstranili kuželový vtok, začistili stopy po vtoku a v případě vzorků z ocelových vložek i poznačili číslo vložky. Ostatní vložky byly značeny ražením na funkční ploše, tudíž výstřiky nebylo potřeba ručně značit. Takto opracované vzorky (viz Obr. 62) jsme po jednom balili do bublinkové fólie, aby se jejich povrchy nezneškodily během transportu k měření.



Obr. 62 Vystříknuté zkušební vzorky

8 MĚŘENÍ DRSNOSTI VZORKŮ

Vyrobené vzorky vstřikováním byly měřeny pomocí drsnoměr Mitutoyo SJ-201. Z důvodu statistického vyhodnocení byla každá vložka měřena desetkrát. Pro každou tvarovou vložku bylo vyrobeno deset vzorků, proto na každém vzorku proběhlo pouze jedno měření. Měření probíhalo na předem vyznačeném místě vložky, nejčastěji nad označením vložky, aby pak bylo snazší nalézt toto místo na vystříknutém vzorku. Způsob označování koreponduje s Obr. 63. Jelikož ocelové vložky neměly vyražené značení, musel být pro lepší orientaci vytvořen pilníkem vryp blízko díry pro přídržovač výstřiku. Na vzorkách bylo poté pomocí značení nebo orientačních vrypů nalezeno místo, které odpovídalo měřenému místu vložky, a zde probíhalo měření.



Obr. 63 Označení místa měření

Pro korektní měření bylo nutné správně nastavit přístroj. Konkrétní nastavení drsnoměru uvádí Tab.18:

Tab. 18 Nastavení drsnoměru

Měřený profil	R
Parametry měření	Ra, Rz
Základní délka λ_c	pro $Ra < 0,1$: 0,25mm; pro $Ra > 0,1$: 0,8mm
Počet zákl. délek	5
Filtr	Gauss 50
Rychlost měření	0,25mm/s

9 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Naměřená data byla statisticky zpracována. Pro data každé vložky i sady vzorků jsme vy počítali následující hodnoty:

Odhad středního aritmetického průměru \bar{x} dle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

Kde: x_i - jednotlivé hodnoty,

n - počet hodnot.

Výběrovou směrodatnou odchylku s dle vztahu:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

A nakonec **nejistotu typu A u_A** dle vztahu:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (6) [24]$$

Z vyhodnocených dat byly vytvořeny grafy, které opticky vyjadřují vztah průměrných drsností R_a a R_z vzorků a tvarových vložek. U každého materiálu vložky jsou uvedeny dva grafy. V jednom grafu jsou zanesena všechna data a ve druhém grafu byla věnována pozornost šesti tvarovým vložkám s nejlepší jakostí povrchu a tomu je přizpůsobeno měřítko svislé osy.

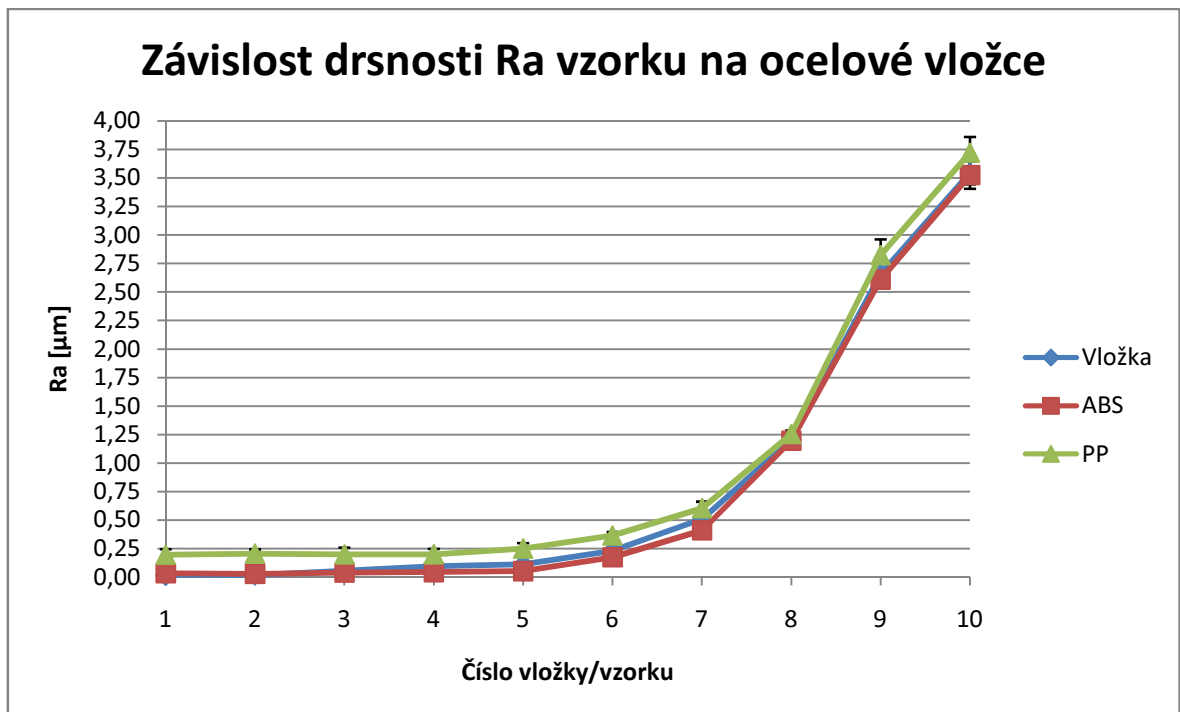
9.1 Ocelová tvarová vložka

9.1.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra

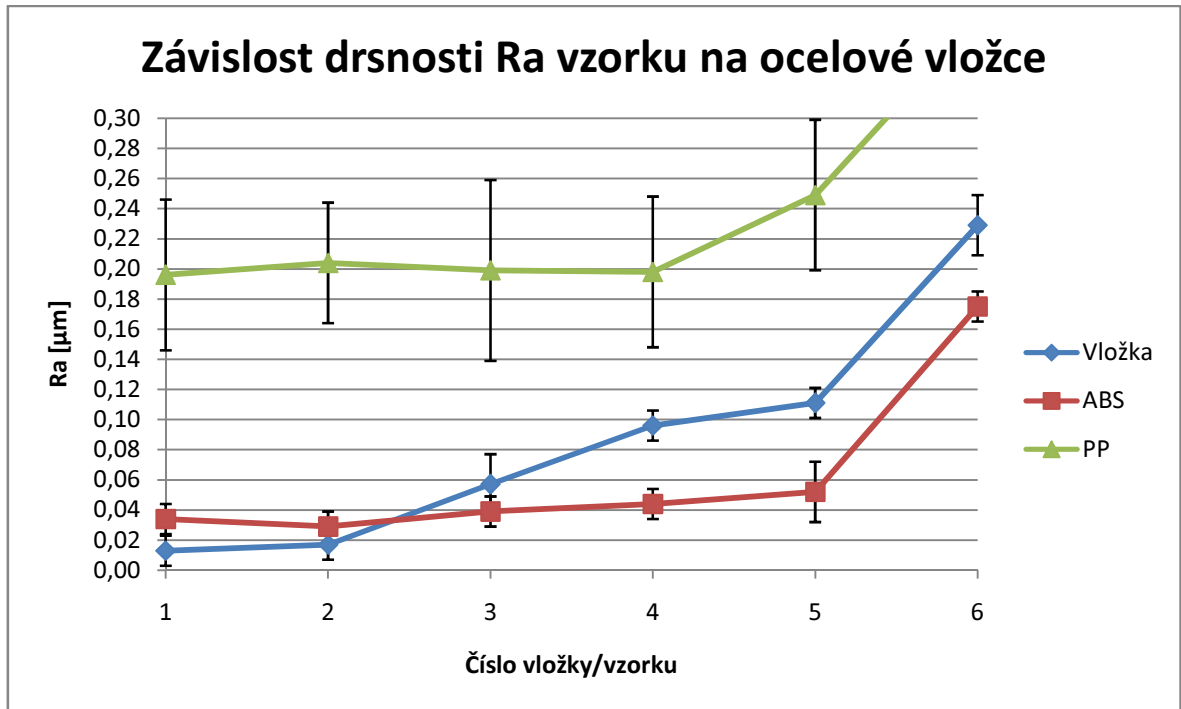
Naměřená data drsnosti Ra ocelové tvarové vložky a polymerních vzorků byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 19. a graficky zobrazena na Obr. 64 a 65.

Tab. 19 Vyhodnocená data drsnosti Ra ocelové vložky

Vložka ocelová				ABS vzorek			PP vzorek		
Číslo vložky/vzorku	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A
1	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,20	0,05	0,02
2	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,20	0,04	0,01
3	0,06	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,20	0,06	0,02
4	0,10	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,20	0,05	0,01
5	0,11	0,01	0,01	0,05	0,02	0,01	0,25	0,05	0,01
6	0,23	0,02	0,01	0,18	0,01	0,01	0,37	0,03	0,01
7	0,51	0,05	0,02	0,41	0,04	0,01	0,60	0,06	0,02
8	1,20	0,02	0,01	1,20	0,02	0,01	1,26	0,03	0,01
9	2,66	0,04	0,02	2,61	0,03	0,01	2,82	0,14	0,05
10	3,55	0,10	0,03	3,53	0,12	0,04	3,72	0,14	0,05



Obr. 64 Porovnání drsnosti Ra ocelové vložky a polymerního vzorku



Obr. 65 Detail porovnání drsnosti Ra ocelové vložky a polymerního vzorku

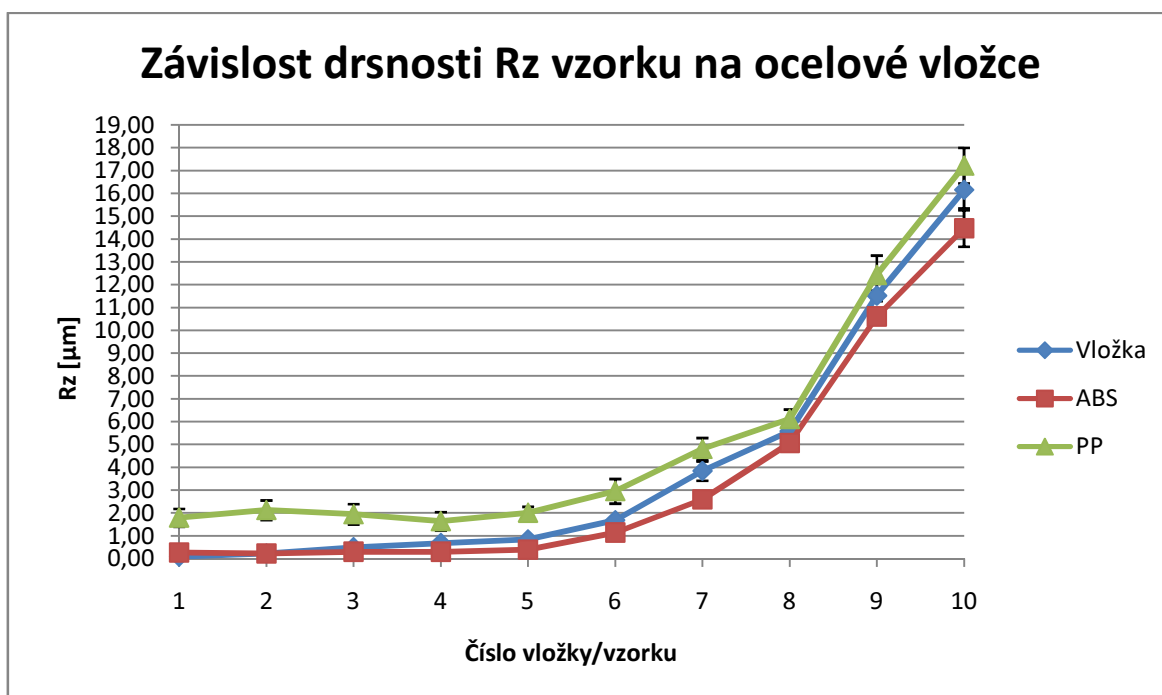
Z grafu závislosti průměrné drsnosti Ra vzorku na průměrné drsnosti Ra tvarové vložky na Obr. 64 je patrné, že materiál ABS dosahuje ve většině případů nižších hodnot drsnosti, než mají samotné tvarové vložky. Naproti tomu plněný PP má vždy větší hodnoty drsnosti Ra než vtokové vložky. To může být způsobeno přítomností krátkých skleněných vláken v PP. K zajímavému jevu dochází u tvarových vložek č.4 až 1, kde se prakticky nemění drsnost polymerních vzorků. V oblasti tvarových vložek č.1 a 2 mají polymerní vzorky z ABS dokonce horší drsnost než mají tvarové vložky. Z čehož lze usoudit, že povrch tvarových vložek se již celý nekopíruje na polymerní vzorek. Polymerní tavenina tedy nevyplňuje a není schopna vyplnit profil drsnosti povrchu tvarové vložky. Tento fakt může být zapříčiněn ochlazením polymerní taveniny, což vede poklesu viskozity. Vyhodnocená data nám tedy říkají, že v případě ocelové vložky není příliš vhodné používat přídatné dokončovací operace na obrobení tvarové vložky zaručující výslednou drsnost povrchu Ra menší než $Ra=0,11$, neboť se jakost povrchu polymerních vzorků již více nezlepšuje jak z ABS tak PP.

9.1.2 Vyhodnocení parametru drsnosti Rz

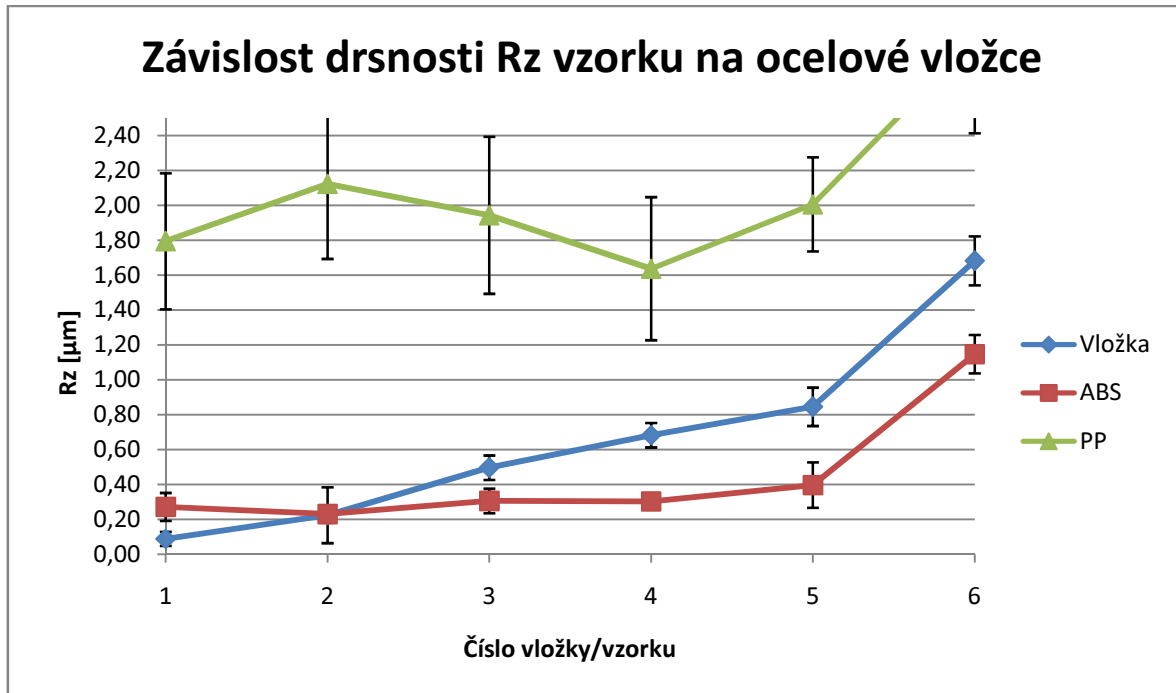
Naměřená data drsnosti Rz ocelové tvarové vložky a polymerních vzorků byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 20. a graficky zobrazena na Obr. 66 a 67.

Tab. 20 Vyhodnocená data drsnosti Rz ocelové vložky

Vložka ocelová				ABS vzorek			PP vzorek		
Číslo vložky/vzorku	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A
1	0,09	0,04	0,01	0,27	0,08	0,03	1,79	0,39	0,13
2	0,22	0,16	0,05	0,23	0,05	0,02	2,12	0,43	0,14
3	0,50	0,07	0,02	0,31	0,07	0,02	1,94	0,45	0,15
4	0,68	0,07	0,02	0,30	0,04	0,01	1,64	0,41	0,14
5	0,85	0,11	0,04	0,40	0,13	0,04	2,01	0,27	0,09
6	1,68	0,14	0,05	1,15	0,11	0,03	2,95	0,54	0,18
7	3,84	0,42	0,15	2,59	0,31	0,10	4,80	0,49	0,16
8	5,57	0,22	0,07	5,07	0,33	0,11	6,12	0,42	0,14
9	11,52	0,23	0,08	10,60	0,16	0,05	12,43	0,85	0,28
10	16,15	0,80	0,27	14,46	0,80	0,27	17,22	0,78	0,26



Obr. 66 Porovnání drsnosti Rz ocelové vložky a polymerního vzorku



Obr. 67 Detail porovnání drsnosti Rz ocelové vložky a polymerního vzorku

Průběh křivek drsností Rz na Obr. 66 se velmi podobá průběhu křivek drsností Ra, jen s tím rozdílem, že bylo dosaženo vyšších hodnot. Hodnoty Rz jsou asi 6krát vyšší než měřené hodnoty Ra. Z grafu závislosti průměrné drsnosti Rz polymerního vzorku na průměrné drsnosti Rz tvarové vložky je patrné, že materiál ABS dosahuje ve většině případů nižších hodnot drsností Rz podobně jako u předchozí vyhodnocované veličiny Ra, než mají samotné vtokové vložky. To může být způsobeno nedostatečnou zatékavostí taveniny pro vyplnění celého průřezu profilu povrchu tvarové vložky. Plněný PP má vždy větší hodnoty drsnosti Rz než tvarové vložky. Stejně jako v případě vyhodnocení drsnosti Ra i v případě drsnosti Rz dochází u tvarových vložek č.4 až 1 k zajímavému jevu, kdy se prakticky nemění drsnost polymerních vzorků. V oblasti tvarových vložek č.1 a 2 dosahují vzorky z ABS dokonce horší drsnosti, než mají tvarové vložky. K podobnému jevu na opačné straně jakostního spektra v rozsahu zhotovených tvarových vložek nedochází. Hranice vysokých hodnot jakostí povrchu Ra a Rz tvarových vložek, při nichž by se přestal kopírovat povrch tvarových vložek na polymerní vzorek, nebyla nalezena. Pro nalezení této hranice by tedy bylo zřejmě nutné zhoršit jakost povrchu vložek a zvýšit tak hodnotu drsnosti povrchu Ra i Rz na vyšší hodnotu, než byla v tomto experimentu dosažena.

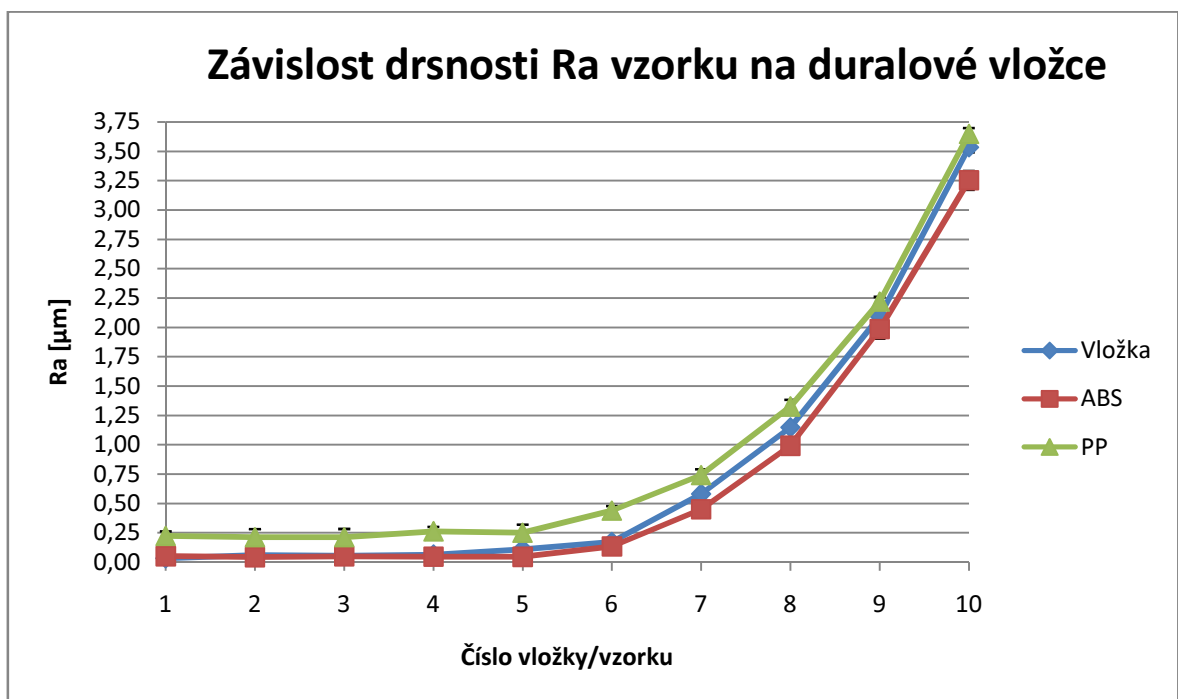
9.2 Duralová tvarová vložka

9.2.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra

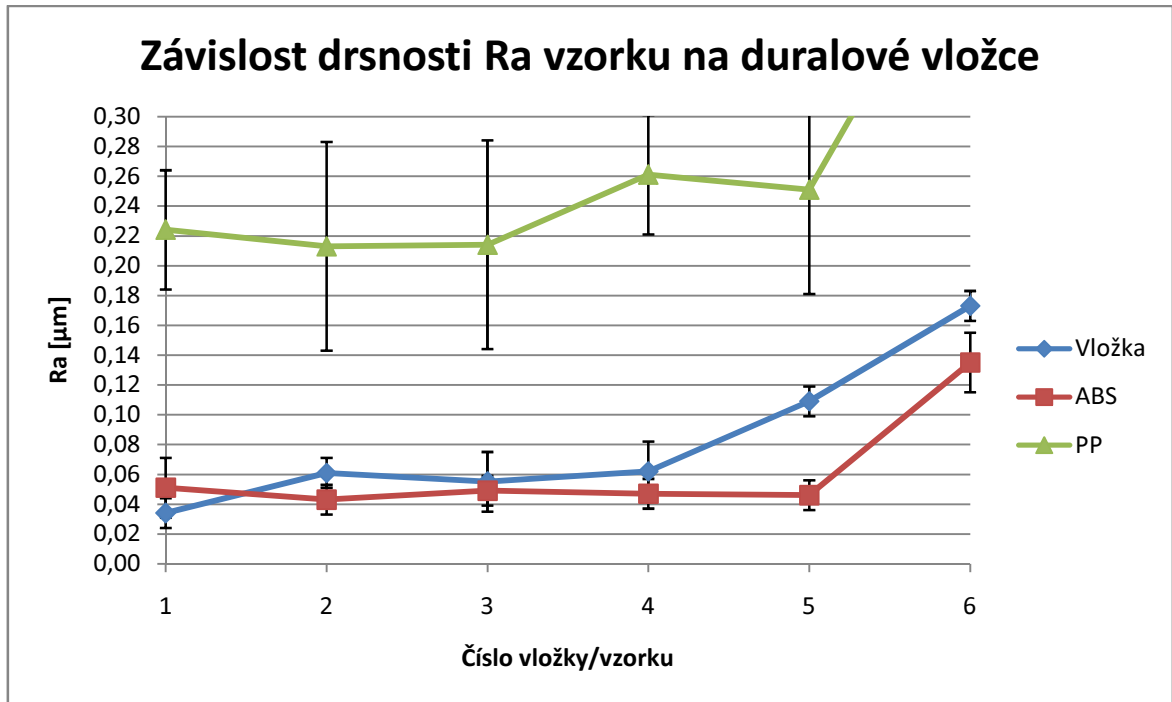
Naměřená data drsnosti Ra duralové tvarové vložky a polymerních vzorků byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 21. a graficky zobrazena na Obr. 68 a 69.

Tab. 21 Vyhodnocená data drsnosti Ra duralové vložky

Vložka duralová				ABS vzorek			PP vzorek		
Číslo vložky/vzorku	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A
1	0,03	0,01	0,01	0,05	0,02	0,01	0,22	0,04	0,01
2	0,06	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,21	0,07	0,02
3	0,06	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,21	0,07	0,02
4	0,06	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,26	0,04	0,01
5	0,11	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,25	0,07	0,02
6	0,17	0,01	0,01	0,14	0,02	0,01	0,44	0,04	0,01
7	0,58	0,01	0,01	0,45	0,04	0,01	0,74	0,05	0,02
8	1,15	0,02	0,01	0,99	0,03	0,01	1,32	0,06	0,02
9	2,09	0,02	0,01	1,99	0,08	0,02	2,22	0,04	0,01
10	3,53	0,04	0,01	3,25	0,08	0,03	3,65	0,05	0,02



Obr. 68 Porovnání drsnosti Ra duralové vložky a polymerního vzorku



Obr. 69 Detail porovnání drsnosti Ra duralové vložky a polymerního vzorku

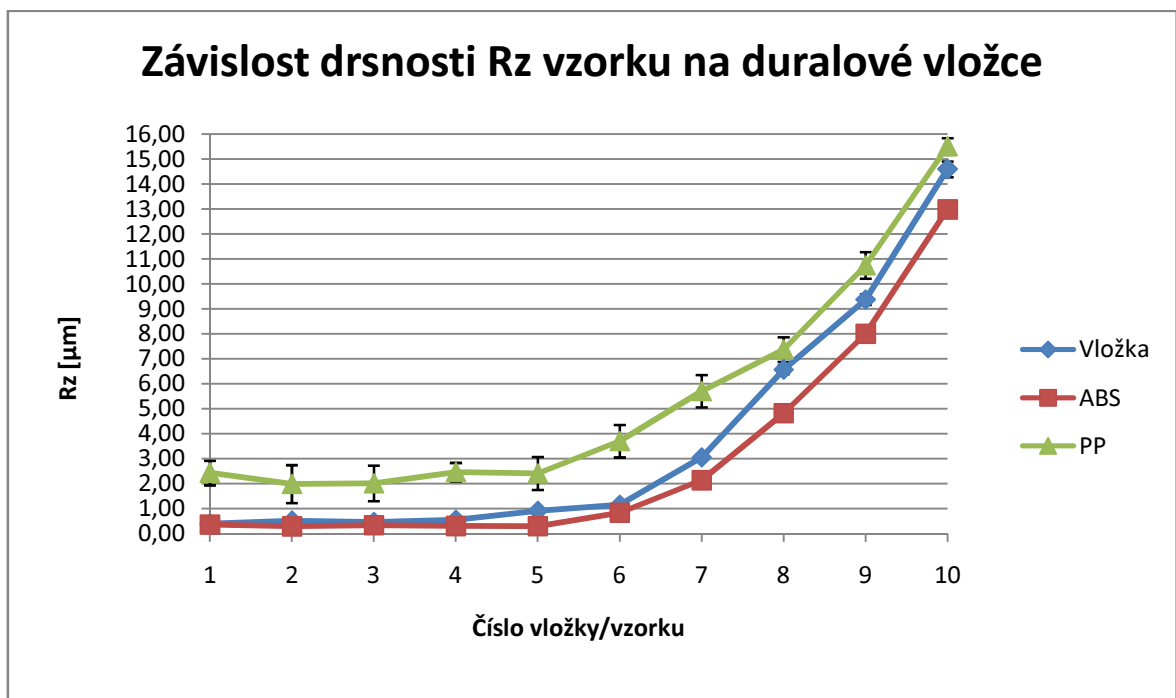
Z Obr. 68 je zřejmé, že stejně jako v případě ocelové tvarové vložky, ani v případě duralové vložky PP nepřetne křivku drsnosti tvarové vložky jako se děje v případě ABS. Oba polymerní materiály rovnoměrně kopírují drsnost povrchu tvarových vložek až k vložce č.5, kterou je charakterizována drsností $Ra=0,11\mu\text{m}$. Od této hranice se drsnost vzorků vyrobených z ABS nemění a setrvává na hodnotě přibližně $Ra=0,05\mu\text{m}$. Toto zjištění se shoduje s pozorováním při vstřikování vzorků na ocelové tvarové vložky. Jelikož duralová tvarová vložka č.1 jako jediná má menší hodnotu drsnosti Ra než $0,04\mu\text{m}$, dochází k přetnutí křivky vložky a ABS až v oblasti mezi vložkami č.1 a č.2. Celkově nelze pozorovat žádné odlišné chování vzorků z ABS a PP ve vztahu k materiálu vložky, které by vedlo k odlišným jakostem povrchu oproti ocelovým tvarovým vložkám. Lze tedy říct, že materiál dural jenž má přibližně třikrát vyšší teplotní vodivost (schopnost materiálu vést teplo) příliš neovlivní jakost budoucího polymeru tím, že rychleji odvede teplo z taveniny. Polymerní materiál je tedy i přes přítomnost materiálu s větší schopností ochlazovat polymerní taveninu, schopen kopírovat jakost povrchu tvarových vložek. Tento fakt je důležitý především pro malosériovou výrobu, kde může dural z důvodu až 4x nižší pořizovací hodnoty nahradit ocel.

9.2.2 Vyhodnocení parametru drsnosti Rz

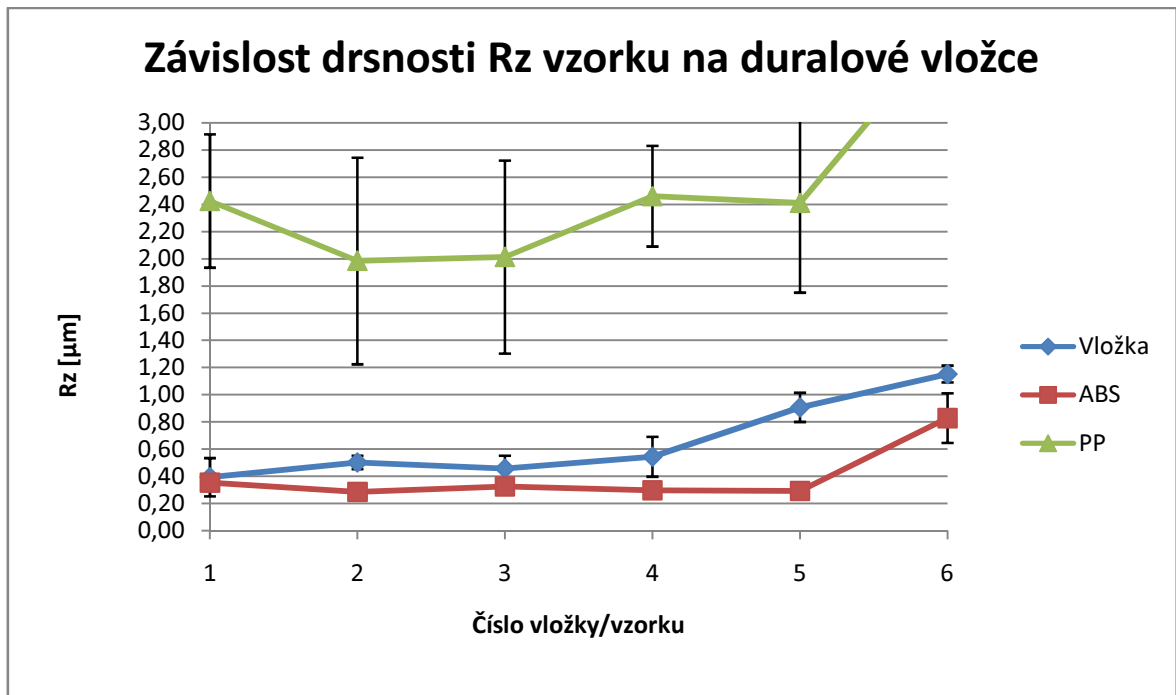
Naměřená data drsnosti Rz duralové tvarové vložky a polymerních vzorků byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 22. a graficky zobrazena na Obr. 70 a 71.

Tab. 22 Vyhodnocená data drsnosti Rz duralové vložky

Vložka duralová				ABS vzorek			PP vzorek		
Číslo vložky/vzorku	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A
1	0,39	0,14	0,05	0,36	0,06	0,02	2,43	0,49	0,16
2	0,50	0,05	0,02	0,29	0,05	0,02	1,99	0,76	0,25
3	0,46	0,09	0,03	0,33	0,05	0,02	2,01	0,71	0,24
4	0,55	0,15	0,05	0,30	0,05	0,02	2,46	0,37	0,12
5	0,91	0,11	0,04	0,29	0,04	0,01	2,41	0,66	0,22
6	1,15	0,06	0,02	0,83	0,18	0,06	3,70	0,65	0,22
7	3,05	0,11	0,04	2,13	0,12	0,07	5,71	0,65	0,22
8	6,57	0,17	0,06	4,82	0,19	0,06	7,37	0,49	0,16
9	9,37	0,21	0,07	8,00	0,20	0,07	10,75	0,53	0,17
10	14,60	0,31	0,10	12,98	0,30	0,10	15,51	0,33	0,11



Obr. 70 Porovnání drsnosti Rz duralové vložky a polymerního vzorku



Obr. 71 Porovnání drsnosti Rz duralové vložky a vzorku

Na základě grafického vyjádření porovnání drsnosti Rz duralové tvarové vložky a polymerního vzorku na Obr. 70 lze říci, že stejně jako v případě ocelové tvarové vložky, ani v případě duralové vložky PP nepřetne křivku drsnosti tvarové vložky. Na rozdíl od hodnot Ra jsou hodnoty Rz polymeru ABS vždy menší než obdobné hodnoty tvarové vložky. To má za následek neprotnutí křivek drsností Rz tvarových vložek a ABS vzorků v žádném bodě. Oba materiály rovnoměrně kopírují drsnost povrchu vložek až k vložce č. 5. Od této hranice se drsnost ABS i plněného PP nemění. Toto pozorování se shoduje s pozorováním při vstřikování vzorků na ocelové tvarové vložky. Rozdíl v hodnotách jakosti Rz a Ra materiálu PP vůči ABS by mohl být způsoben nevhodnými technologickými podmínkami, kdy může např. docházet k nerovnoměrné krystalizaci. Dále by mohl být rozdíl způsoben materiálem samotným, jelikož ABS je polymer amorfní a PP je materiál semikrystalický, tudíž se vyznačuje i vyšší smrštěním při tuhnutí, což ve spojení s plnivem může zhoršit jakost povrchu vzorku. Další úvaha o důvodu horších hodnot jakosti povrchu směřuje ke krystalickému podílu PP, který může být až 60%. Tato krystalická část může hůře kopírovat povrch tvarové vložky než kopíruje plně amorfní ABS.

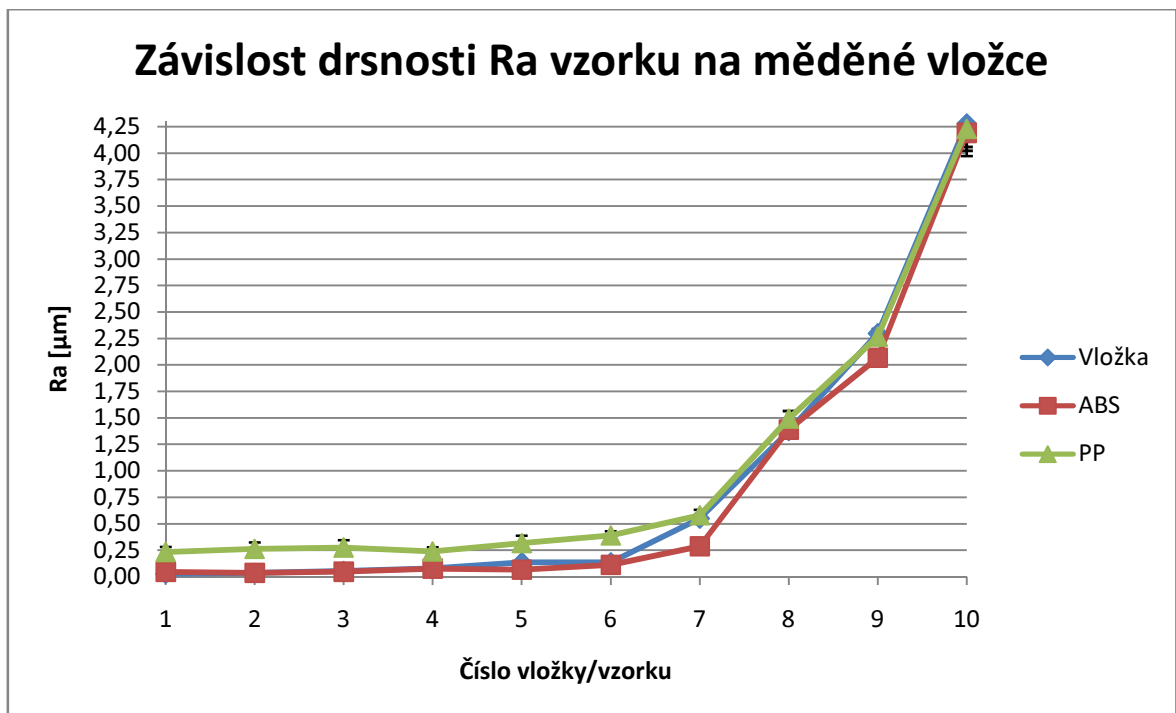
9.3 Měděná tvarová vložka

9.3.1 Vyhodnocení parametru drsnosti Ra

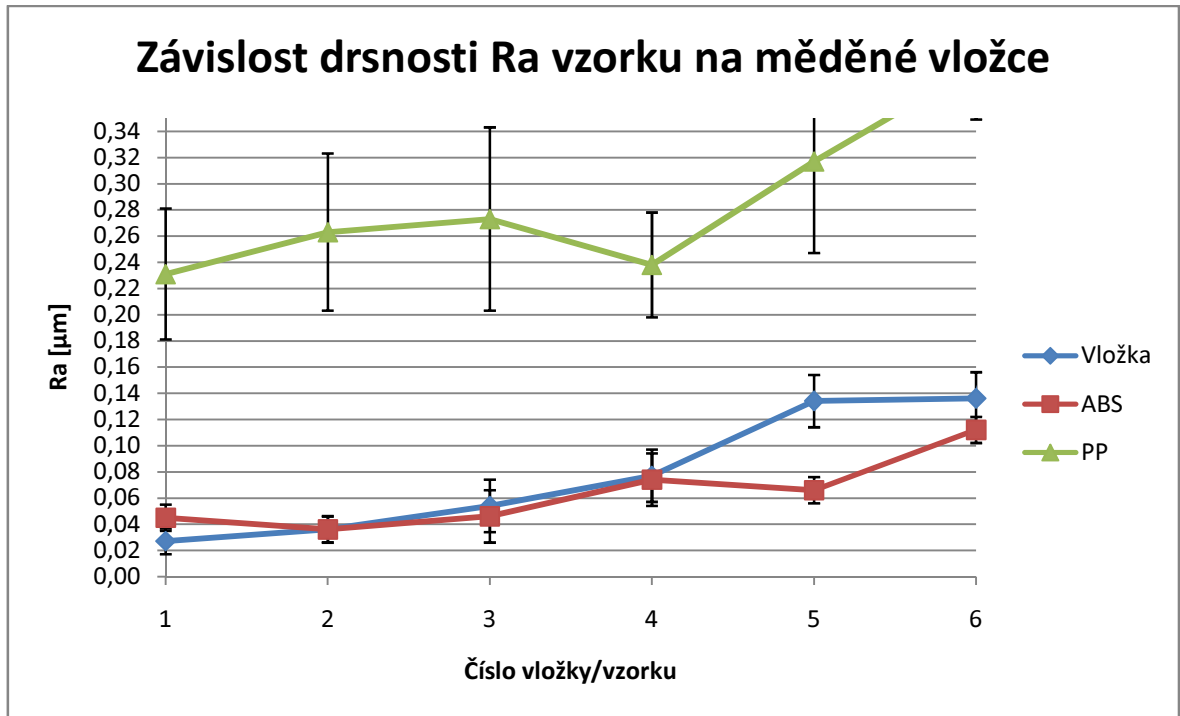
Naměřená data drsnosti Ra měděné tvarové vložky a polymerních vzorků byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 23. a graficky zobrazena na Obr. 72 a 73.

Tab. 23 Vyhodnocená data drsnosti Ra měděné vložky

Vložka měděná				ABS vzorek			PP vzorek		
Číslo vložky/vzorku	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Ra [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A
1	0,03	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,23	0,05	0,02
2	0,04	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,26	0,06	0,02
3	0,05	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,27	0,07	0,02
4	0,08	0,02	0,01	0,07	0,02	0,01	0,24	0,04	0,01
5	0,13	0,02	0,01	0,07	0,01	0,01	0,32	0,07	0,02
6	0,14	0,02	0,01	0,11	0,01	0,01	0,39	0,04	0,01
7	0,55	0,01	0,01	0,29	0,04	0,01	0,58	0,05	0,02
8	1,38	0,01	0,01	1,39	0,04	0,01	1,49	0,07	0,02
9	2,30	0,03	0,01	2,07	0,05	0,02	2,27	0,07	0,02
10	4,28	0,31	0,10	4,19	0,17	0,06	4,23	0,17	0,05



Obr. 72 Porovnání drsnosti Ra měděné vložky a polymerního vzorku



Obr. 73 Detail porovnání drsnosti Ra měděné vložky a polymerního vzorku

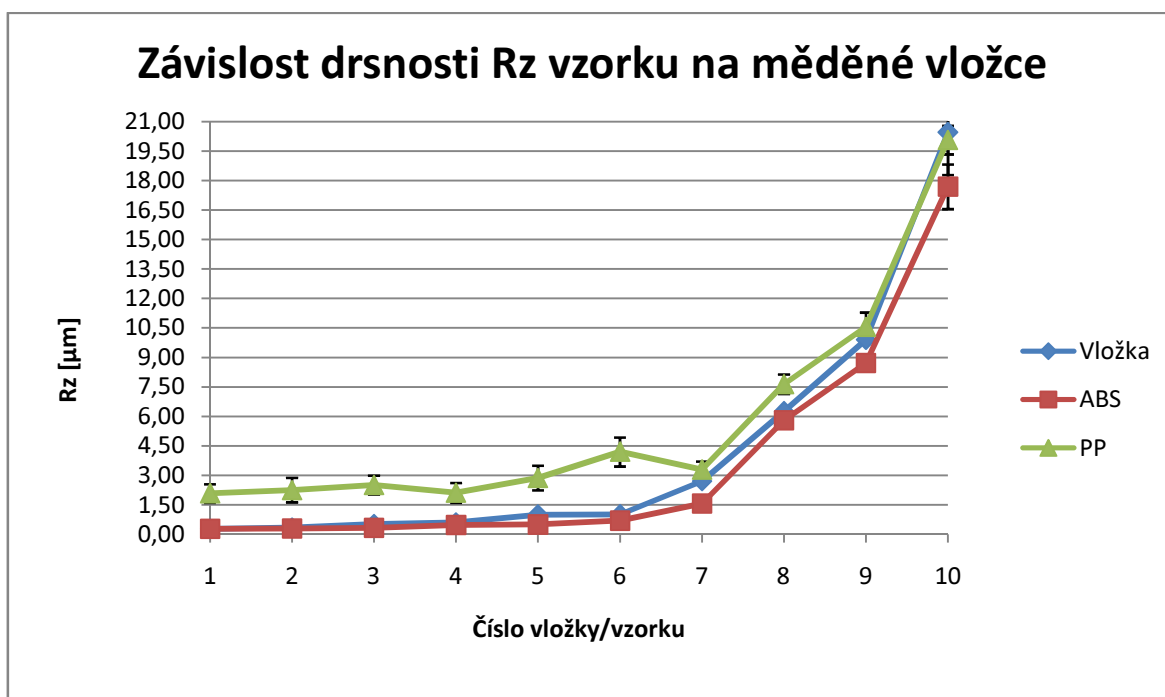
Porovnání drsnosti Ra měděné vložky a vzorku na Obr. 72 vystihuje situaci, kdy při vstříkávání vzorků na měděnou vložku docházelo k rychlejšímu odvodu tepla z taveniny díky vlastnostem mědi, což může být důvod mírně odlišných křivek drsností Ra oproti dvěma předcházejícím materiálům vložek. Opět celkově PP dosahuje vyšší průměrné drsnosti Ra oproti vložkám, ale s tím rozdílem, že u vložek č. 9 a 10 dosahuje nepatrně nižších hodnot drsnosti Ra, než mají samotné vložky. Takovéto chování PP nebylo v předchozích případech zaznamenáno. Vzorky z materiálu ABS mají podobnou drsnost Ra jakou dosahují tvarové vložky. K zajímavému jevu dochází u vložek č. 6 a 5, jejichž drsnost Ra odpovídá hranici, za kterou se u předchozích materiálů již neprojeví zlepšení drsnosti povrchu vložky na povrchu vzorku. Jako hraniční hodnotu drsnosti měděné tvarové vložky lze označit $Ra=0,13\mu\text{m}$, což je hodnota drsnosti Ra tvarové vložky č. 5, protože vložka č. 6 má jen nepatrně vyšší hodnotu drsnosti povrchu Ra než č. 5 a polymerní vzorky vystříknané na této vložce vykazují zřetelně horší jakost povrchu než vzorky vystříknané na tvarové vložce č. 5. Toto chování taveniny je přínosné, protože se měď používá při konstrukci vstříkovacích forem jako materiál, který dokáže rychle odvést teplo z povrchu tvarové dutiny a tak slouží jako chladič.

9.3.2 Vyhodnocení parametru drsnosti Rz

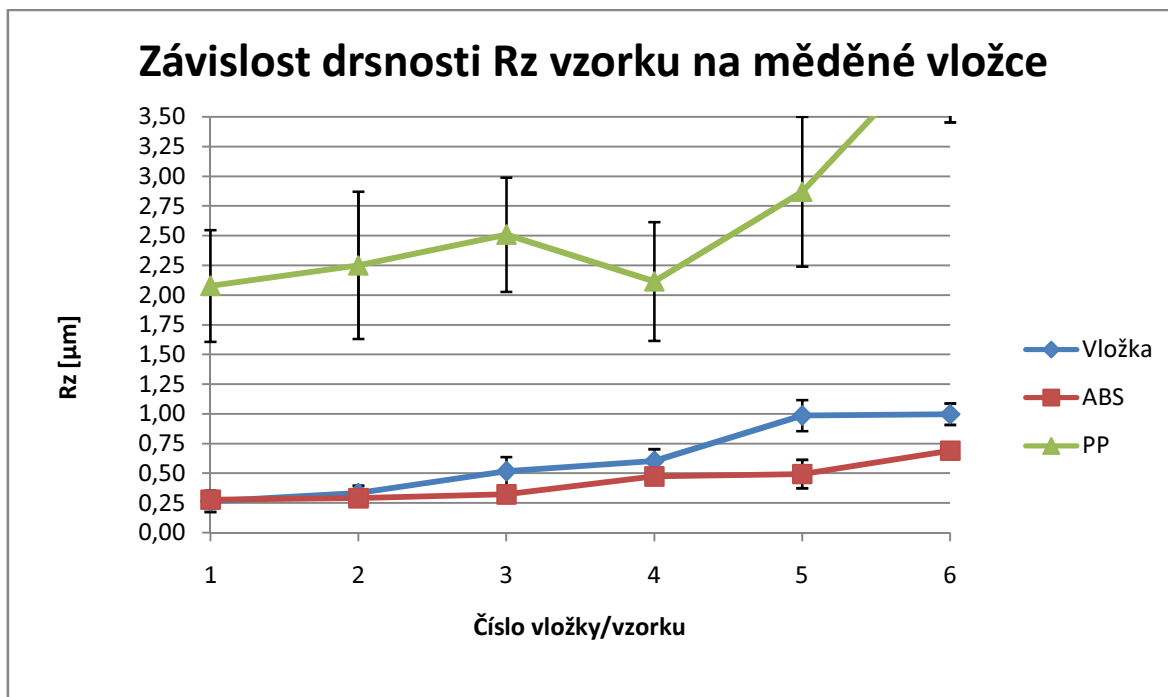
Naměřená data drsnosti Rz měděné tvarové vložky a polymerních vzorků byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 24. a graficky zobrazena na Obr. 74 a 75.

Tab. 24 Vyhodnocená data drsnosti Rz měděné vložky

Vložka měděná				ABS vzorek			PP vzorek		
Číslo vložky/vzorku	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A	Průměrné Rz [μm]	Směrodatná odchylka	Nejistota typu A
1	0,27	0,09	0,03	0,28	0,04	0,01	2,08	0,47	0,16
2	0,34	0,06	0,02	0,29	0,07	0,02	2,25	0,62	0,21
3	0,52	0,12	0,04	0,32	0,07	0,02	2,51	0,48	0,16
4	0,60	0,10	0,03	0,47	0,05	0,02	2,12	0,50	0,17
5	0,99	0,13	0,04	0,49	0,12	0,04	2,87	0,63	0,21
6	1,00	0,09	0,03	0,69	0,07	0,02	4,19	0,74	0,25
7	2,70	0,11	0,03	1,56	0,20	0,07	3,28	0,43	0,14
8	6,25	0,11	0,04	5,80	0,30	0,10	7,64	0,50	0,15
9	9,90	0,13	0,04	8,72	0,05	0,02	10,55	0,74	0,24
10	20,46	2,16	0,72	17,69	1,14	0,38	20,08	0,73	0,24



Obr. 74 Porovnání drsnosti Rz měděné vložky a polymerního vzorku



Obr. 75 Detail porovnání drsnosti Ra měděné vložky a polymerního vzorku

Z grafu závislosti průměrné drsnosti Rz polymerních vzorků na průměrné drsnosti Rz tvarových vložek na Obr. 74 je patrné, že celkově PP opět dosahuje vyšší průměrné drsnosti Rz oproti tvarovým vložkám. U vložky č.10 dosahuje nepatrně nižších hodnot drsnosti Rz než mají samotné tvarové vložky, což je změna oproti průběhu drsnosti Ra, kde plněný PP dosahoval nižších hodnot drsnosti Ra nejen u vložky č.10 ale i u č.9. Stejně jako v případě vyhodnocování drsností Ra, takovéto chování PP nebylo v předchozích případech zaznamenáno. Křivka drsnosti Rz vzorků z materiálu ABS plně kopíruje průběh křivky drsnosti Ra s rozdílem, že hodnoty Rz jsou asi 6krát vyšší. K zajímavému jevu dochází u vložek č.5 až 1. Jakost povrchu vstříkovaných vzorků se již se zlepšující jakostí povrchu tvarových vložek nelepší. Tudíž lze drsnost Rz vzorků č.4 a č.5 označit za hraniční. Dalším zajímavým pozorováním je skutečnost, že hraniční hodnota drsnosti Rz a Ra měděných vložek je téměř stejná s hodnotami ocelových a duralových vložek. To je důležité zjištění, jelikož měď má teplotní vodivost více jak 20krát vyšší než ocel a více jak 6krát vyšší než dural. Této vlastnosti se využívá při místním chlazení výrobku ve vstříkovací formě. Část formy, kde je potřeba taveninu více chladit, je vyrobena z mědi, která rychle odvádí teplo z taveniny do jiných částí formy.

10 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl výzkum vlivu jakosti povrchu formy na jakost povrchu polymerních výrobků.

V teoretické části diplomové práce byly uvedeny, rozděleny a popsány základní dokončovací metody. A dále byla uvedena problematika vyhodnocování jakosti povrchu součástí. V této části byly vysvětleny pojmy jako integrita povrchu a měření jakosti povrchu. Teoretická část práce končí popsáním technologie vstřikování polymerních výrobků, cyklu vstřikování, částí vstřikovací formy a také vstřikovacího stroje a jeho jednotlivé nejdůležitější části.

V praktické části diplomové práce bylo nejprve úkolem vyrobit ze tří rozdílných materiálů tvarové vložky vstřikovací formy soustružením společně s frézováním. Tvarové vložky byly vyrobeny z nástrojové oceli EN 1.2343, duralu EN AW-7075 a mědi EN CW004A. Dalším úkolem bylo vytvořit strukturu povrchu tvarových vložek tak, aby se jednotlivé stupně jakosti povrchu funkční plochy daly mezi materiály porovnávat. Toho bylo docíleno užitím rozdílných technologických podmínek. Následovala aplikace takto vyrobených tvarových vložek ve vstřikovací formě při vstřikování vzorků. Při vstřikování bylo použito dvou materiálů - polypropylenu s obsahem 20hm.% skelných krátkých vláken a akrylonitrilbutadienstyrenu. Po vystříknutí vzorků a jejich konečné úpravě, proběhlo závěrečné měření vybraných veličin jakosti jejich povrchu. Stejně měření bylo provedeno i u tvarových vstřikovacích vložek. Takto získaná data byla následně statisticky vyhodnocena a graficky znázorněna.

Materiály tvarových vložek byly zvoleny pro jejich specifické užití při konstrukci vstřikovacích forem. Pro hromadnou a sériovou výrobu se volí jako materiál vstřikovací formy nástrojová ocel zejména kvůli vlastnostem jako jsou dostatečná mechanická pevnost a tuhost, dobrá obrobitelnost, odolnost proti korozi, vysoká tepelná vodivost, odolnost proti opotřebení, vysoká stabilita při tepelném zpracování, dobrá leštitelnost a brousitelnost. V malosériové výrobě se lze setkat s použitím zejména duralových forem, přestože není jejich životnost tak vysoká jako u forem z oceli, ale tuto nevýhodu vyvažují výhody jako téměř 4krát nižší cena materiálu vůči oceli, menší měrná hmotnost, lepší teplotní vodivost, menší řezné síly při obrábění, což znamená, že forma je obrobitelná na širším spektru strojů. Dále se dural používá jako chladicí prvek ve formě. Měď se využívá zejména kvůli jejím fyzikálním vlastnostem a vysoké ceně jen omezeně. Měď je 1,5krát dražší než ocel a

dokonce 6krát dražší než dural. Mezi její přednosti patří velká teplotní vodivost, což je vlastnost charakterizující schopnost materiálu vést teplo. Na základě této vlastnosti se měď používá k místnímu ochlazení taveniny uvnitř dutiny formy.

Z vyhodnocených dat lze pozorovat velmi podobné vlastnosti povrchu zhotovených na ocelových, duralových i měděných tvarových vložkách. Za hranici efektivního dokončování povrchu ocelové, duralové a měděné formy lze označit hodnoty $R_a=0,11-0,13\mu\text{m}$ a $R_z=0,80-0,90\mu\text{m}$ při vstřikování akrylonitrilbutadienstyrenu i plněného polypropylenu, protože vstřikované polymery vykazovaly neměnnou jakost povrchu vzorků pro prvních 5 z 10 jakostních řad tvarových vložek.

Dokončení povrchu formy na menší hodnoty drsnosti se jeví z hlediska jakosti plochy výsledného výrobku zbytečné a ekonomicky nevýhodné. Použití dalších dokončovacích operací může vést až k nárůstu 50% výrobního času a stejně tak se mohou zvýšit náklady. Např. ocelovou tvarovou vložku s jakostí povrchu $R_a=0,11\mu\text{m}$ trvalo dokončit 25minut, ale doba potřebná k dokončení tvarové vložky s jakostí povrchu $R_a=0,06\mu\text{m}$ už byla 40minut.

Při dalších experimentech pro zajištění více kontrolovaného prostředí při výrobě vzorků a pro širší paletu zpracovatelných materiálů bude potřeba upravit stávající formu tak, aby bylo možné zajistit temperaci tvarových vložek. Takovýto zásah umožní vyrábět vzorky vyšší kvality a celý výzkum tak bude mít větší vypovídající hodnotu a opakovatelnost. Dále by bylo vhodné zkusit použít i stejný materiál, který má ale různý index toku taveniny. Přínosné by mohlo být zvolit jiné technologické podmínky při vstřikování a zejména se zaměřit na nejlepší jakosti povrchu vložek, protože u měděných a duralových tvarových vložek nebylo dosaženo plánovaných nízkých hodnot jakostí povrchu zřejmě z důvodu horší obrobitelnosti těchto materiálů v porovnání s nástrojovou ocelí. Pro měření nejlepších jakostí použít bezdotykový měřicí přístroj, který je vhodnější než dílenský drsnoměr.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, K., PROKOP, J., *Technologie obrábění*. 2nd ed. Brno: Akademické nakladatelství cerm, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [2] KOCMAN, K., *Technologické procesy obrábění*. 1st ed. Brno: Akademické nakladatelství cerm, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] LUKOVICS, I., *Progresivní metody dokončování funkčních ploch*. 1st ed. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 40 s. ISBN 978-80-248-2033-0.
- [4] HOLEŠOVSKÝ, F., *Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu*. 1st ed. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. 43 s. ISBN 978-80-248-1644-9.
- [5] LIPA, Zdenko, JANÁČ Alexander. *Dokončovacie spôsoby obrábania*. 1st ed. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. 94 s. ISBN: 80-227-1324-4.
- [6] ŠTĚPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A., *Technologie zpracování plastů*. 1st ed. Praha: SNTL, 1989. 638s.
- [7] DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ. [online]. [cit2014-3-18]. Dostupné z WWW: <<http://files.prumyslovak.webnode.cz/>>.
- [8] KUBÍČEK, M., *Dokončovací metody obrábění 1*. [online]. [cit2014-3-23]. Dostupné z WWW: <http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_19-14.pdf>.
- [9] TECHNOLOGIE 2, *Vstřikování plastů*. [online]. [cit2014-3-29]. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm>.
- [10] MAŇKOVÁ, I., *Progresívne technológie*. 1st ed. Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN: 80-7099-430-4.
- [11] PATA, V., *Přednáškové materiály předmětu Jakost a metrologie*.
- [12] AFJEHI-SADAT, A., *Meranie drsnosti, vlnitosti a primárneho profilu*.
- [13] *Frézování III: odborná konference FSI VUT v Brně Ústavu strojírenské technologie ve spolupráci s PRAMET TOOLS, s.r.o., ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE, a.s., Zlín a dalšími společnostmi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 178 s. ISBN 80-214-2436-2.
- [14] Oficiální www stránky firmy Arburg, [online]. [cit2014-5-2]. Dostupné z WWW: <www.arburg.com/cs/cz/>
- [15] Arburg Thermolift 100-2, Návod k použití.
- [16] Proma FHV-50PD univerzální frézka, Návod k použití.
- [17] Mitutoyo Surftest SJ-201 drsnoměr, Návod k použití.

- [18] Materiálový list EN 1.2343, [online]. [cit2014-4-27]. Dostupné z
WWW:<<http://www.bolzano.cz/cz/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-tepla/materialove-listy/materialovy-list-oceli-x37crmov5-1>>
- [19] Materiálový list EN CW004A, [online]. [cit2014-4-27]. Dostupné z
WWW:<<http://www.pxprecimet.ch/data/documents/fiches-techniques/EN/Cu-ETP.pdf>>
- [20] Materiálový list ČSN 424222, [online]. [cit2014-4-27]. Dostupné z
WWW:<<http://www.proal.cz/info/424222.htm#>>
- [21] BRH 20.03F, Rovinná horizontální bruska, Návod k použití.
- [22] Materiálový list AW-7075, [online]. [cit2014-4-27]. Dostupné z
WWW:<<http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=26119&U=0&E=243401>>
- [23] Materiálový list PP
- [24] PATA,V., *Přednáškové materiály předmětu Počítačová podpora zpracování dat*
- [25] DeGARMO,E.;BLACK,T.;KOSHER,R.: *Materials and Processes in Manufacturing*.
Edit. Horton Marcia, London s.1259, 1997

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	střední aritmetická odchylka
IT	stupeň přesnosti
v_f	rychlost posuvu
v_c	řezná rychlost
v_w	rychlost otáčení obrobku
ω_k	frekvence kmitavého pohybu
lr	základní délka profilu drsnosti
ln	vyhodnocovaná délka profilu
lt	celková délka snímání
n	počet základních délek
Rv	hloubka prohlubně profilu
Rt	celková výška profilu
Xs	rozestup prvku profilu
Rmr	relativní materiálový poměr
p_i	průběh vnitřního tlaku v dutině formy
s_k	pohyb šneku
s_n	pohyb nástroje - formy
v_c	řezná rychlost
d	průměr obrobku
n	otáčky
a_p	hloubka řezu
x_i	jednotlivé hodnoty
x	odhad aritmetického průměru
s	výběrová směrodatná odchylka
u_A	nejistota typu A

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Čelní fréza se 2 noži pro jemné frézování [7].....</i>	13
<i>Obr. 2 Nůž pro jemné soustružení [7].....</i>	14
<i>Obr. 3 Výstružník s válcovou stopkou.....</i>	15
<i>Obr. 4 Vznik třísky při broušení [22].....</i>	16
<i>Obr. 5 Princip honování [2]</i>	18
<i>Obr. 6 Stopy po honování – křížové stopy</i>	19
<i>Obr. 7. Svislý jednovřetenový honovací stroj [1].....</i>	20
<i>Obr. 8. Průběh superfinišovacího procesu – zvětšování nosného podílu [1]</i>	21
<i>Obr. 9. Schéma kinematiky superfinišování [1].....</i>	21
<i>Obr. 10. Svislý lapovací stroj pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch [2]</i>	22
<i>Obr. 11. Princip lapování [1]</i>	23
<i>Obr. 12 Leštící kotouč [22]</i>	24
<i>Obr. 13. Válečkovací hlava pro statické válečkování vnějších válcových ploch [2]</i>	26
<i>Obr. 14 Princip dynamického válečkování [2]</i>	26
<i>Obr. 15 Kuličkovací hlava pro statické kuličkování děr [1].....</i>	27
<i>Obr. 16 Diamantový vyhlazovací nástroj [1].....</i>	28
<i>Obr. 17 Speciální kalibrovací trn [20].....</i>	29
<i>Obr. 18 Princip ručního obrábění abrazivním paprskem [10].....</i>	31
<i>Obr. 19 Řez rozloženou dýzou [10].....</i>	31
<i>Obr. 20 Detail pracovního procesu AFM [10]</i>	32
<i>Obr. 21 Příklad přípravku pro AFM [10].....</i>	33
<i>Obr. 22 Princip chemického leštění [10]</i>	33
<i>Obr. 23 Elektrochemické broušení [10].....</i>	35
<i>Obr. 24 Tangenciální užití laserového paprsku [10].....</i>	35
<i>Obr. 25 Drsnost a vlnitost povrchu [11].....</i>	39
<i>Obr. 26 Střední čára [11]</i>	39
<i>Obr. 27 Schéma měřicí dráhy snímače [11]</i>	39
<i>Obr. 28 Prvek profilu [12]</i>	40
<i>Obr. 29 Příklady profilu [11].....</i>	41
<i>Obr. 30 Křivka materiálového podílu [12]</i>	41
<i>Obr. 31 Indukční snímač [11]</i>	44
<i>Obr. 32 Měřicí smyčka [11]</i>	44

<i>Obr. 33 CLA snímač [11].....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 34 Laserový snímač [11]</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 35 Vstřikovací cyklus [9].....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 36 Časové rozložení vstřikovacího cyklu.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 37 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [9]</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 38 Diferenciální šnek [9].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 39 Pístová plastikační a vstřikovací jednotka [6]</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 40 Kombinovaná plastikační a vstřikovací jednotka [6].....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 41 Otevřená tryska [6].....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 42 Princip posuvné uzavíratelné vložky [6]</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 43 Jehlové uzavíratelné vložky [6] a - s vnější pružinou, b - s vnitřní pružinou</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 44 Uzavíratelná vložka ovládaná zvnějšku [6].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 45 Hydraulická uzavírací jednotka [6].....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 46 Uzavírací jednotka s kloubovým uzávěrem ovládaným hydraulicky [6].....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 47 Vzájemná poloha mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou [9].....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 48 Ukázka konstrukce jednonásobné a vícenásobné vstřikovací formy [14]</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 49 Ukázka temperačního systému (modře)</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 50 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470H [14].....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 51 Vstřikovací forma</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 52 Úprava středícího kroužku vstřikovací formy</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 53 Sušička Arburg Thermolift 100-2</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 54 Soustruh TOS Žebrák S32</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 55 Univerzální frézka FHV-50PD</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 56 Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 57 Drsnoměr Mitutoyo Surf test SJ-201</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 58 Výkres vložky vstřikovací formy</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 59 Krok 1 až 4 při výrobě vložky vstřikovací formy</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 60 Hotové vložky všech 3 materiálů</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 61 Model vzorku včetně kuželového vtoku; vytvořeno v programu Catia V5R20.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 62 Vystříknuté zkušební vzorky.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 63 Označení místa měření</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 64 Porovnání drsnosti Ra ocelové vložky a polymerního vzorku.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 65 Detail porovnání drsnosti Ra ocelové vložky a polymerního vzorku</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 66 Porovnání drsnosti Rz ocelové vložky a polymerního vzorku</i>	<i>89</i>

<i>Obr. 67 Detail porovnání drsnosti Rz ocelové vložky a polymerního vzorku.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 68 Porovnání drsnosti Ra duralové vložky a polymerního vzorku.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 69 Detail porovnání drsnosti Ra duralové vložky a polymerního vzorku</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 70 Porovnání drsnosti Rz duralové vložky a polymerního vzorku</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 71 Porovnání drsnosti Rz duralové vložky a vzorku</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 72 Porovnání drsnosti Ra měděné vložky a polymerního vzorku.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 73 Detail porovnání drsnosti Ra měděné vložky a polymerního vzorku</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 74 Porovnání drsnosti Rz měděné vložky a polymerního vzorku</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 75 Detail porovnání drsnosti Ra měděné vložky a polymerního vzorku</i>	<i>98</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Základní vlastnosti vstříkovacího stroje [14]</i>	63
<i>Tab. 2 Základní vlastnosti sušičky [15]</i>	66
<i>Tab. 3 Základní vlastnosti soustruhu</i>	66
<i>Tab. 4 Základní vlastnosti frézky [16]</i>	67
<i>Tab. 5 Základní vlastnosti brusky [21]</i>	68
<i>Tab. 6 Základní vlastnosti drsnoměru [17]</i>	70
<i>Tab. 7 Chemické složení oceli 1.2343 [18]</i>	71
<i>Tab. 8 Vybrané vlastnosti oceli 1.2343 [18]</i>	71
<i>Tab. 9 Vybrané vlastnosti mědi EN CW004A [19]</i>	72
<i>Tab. 10 Chemické složení duralu AW-7075 [20]</i>	72
<i>Tab. 11 Vybrané vlastnosti duralu AW-7075 [20]</i>	73
<i>Tab. 12 Vybrané vlastnosti ABS HG-0760 [22]</i>	74
<i>Tab. 13 Vybrané vlastnosti PP 1020 AFV 00/HMFL [23]</i>	74
<i>Tab. 14 Technologické parametry soustružení ocelových vložek</i>	77
<i>Tab. 15 Technologické parametry soustružení měděných vložek</i>	79
<i>Tab. 16 Technologické parametry soustružení duralových vložek</i>	80
<i>Tab. 17 Technologické parametry vstříkování</i>	83
<i>Tab. 18 Nastavení drsnoměru</i>	85
<i>Tab. 19 Vyhodnocená data drsnosti Ra ocelové vložky</i>	87
<i>Tab. 20 Vyhodnocená data drsnosti Rz ocelové vložky</i>	89
<i>Tab. 21 Vyhodnocená data drsnosti Ra duralové vložky</i>	91
<i>Tab. 22 Vyhodnocená data drsnosti Rz duralové vložky</i>	93
<i>Tab. 23 Vyhodnocená data drsnosti Ra měděné vložky</i>	95
<i>Tab. 24 Vyhodnocená data drsnosti Rz měděné vložky</i>	97