

Výzkum vlivu nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních výrobků

Bc. Jan Liška

Diplomová práce 2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Liška**
Osobní číslo: **T14540**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum vlivu nadmolekulární struktury na jakost povrchu
polymerních výrobků**

Zásady pro vypracování:

- 1. Popište integritu povrchu a základní dokončovací operace.**
- 2. Popište rozdělení polymerních materiálů a technologii vstřikování.**
- 3. Provedte výrobu polymerních vzorků.**
- 4. Hodnoťte vliv nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních výrobků.**

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

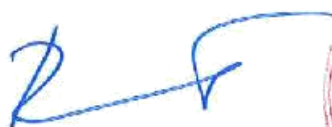
Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

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 11. 4. 2016



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 díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

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

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělení 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 přihlíáde k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výzkumem vlivu nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních výrobků.

Teoretická část diplomové práce je věnována polymerním materiálům, jejich rozdělení a nadmolekulární struktuře. Dále popisuje technologii vstřikování, včetně technologických podmínek vstřikování a vstřikovacího stroje. Obsahuje také souhrn z oblasti konvenčních dokončovacích technologií a integrity povrchu.

V praktické části se diplomová práce zabývá popisem výroby tvarových dutin vstřikovací formy a dokončením jejich funkční plochy. Následně byly dutiny použity ke vstřikování a na výsledných výrobcích vyhodnoceny drsnosti Ra , Rz a krystalický podíl polymerních výrobků.

Klíčová slova: polymery, vstřikování, nadmolekulární struktura, dokončovací technologie, integrita povrchu

ABSTRACT

The master thesis deals with research aimed at the influence of supramolecular structure on surface quality of polymer products.

Theoretical part of this master thesis describes polymer materials, their division and supramolecular structure of polymer materials. The following part describes injection technology including technological conditions and injection molding machines. It also includes a summary in the field of conventional finishing technologies and surface integrity.

The practical part of the master thesis focuses on production of injection mold cavities and finishing operations of their functional surfaces. The cavities were used for injecting and the roughness Ra , Rz , and crystalline share of polymer products have been evaluated.

Keywords: polymer materials, injection technology, supramolecular structure, finishing technologies, surface integrity

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Čopovi. Za jeho obětavý přístup, cenné připomínky a rady, za podklady a čas strávený nad touto prací.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františkovi Vavříkovi za jeho odbornou pomoc při vstřikování polymerních vzorků v laboratořích UVI.

Motto:

„Musíš se mnoho učit, abys poznal, že málo víš.“

Michel De Montaigne

Tato diplomová práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně číslo IGA/FT/2016/002

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

Jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	12
1.1.1 Plasty	13
1.1.2 Termoplasty.....	15
1.1.3 Reaktoplasty	17
1.1.4 Elastomery.....	18
1.2 NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	19
1.2.1 Amorfnní struktura.....	19
1.2.2 Semikrystalická struktura.....	20
2 VSTŘIKOVÁNÍ	22
2.1 PRINCIP VSTŘIKOVÁNÍ.....	22
2.2 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ.....	23
2.2.1 Vstřikovací rychlost	23
2.2.2 Vstřikovací tlak	23
2.2.3 Dotlak.....	24
2.2.4 Teplota taveniny.....	25
2.2.5 Teplota formy.....	25
2.2.6 Doba vstřikovacího cyklu	25
2.3 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	26
2.3.1 Vstřikovací jednotka	26
2.3.2 Uzavírací jednotka	27
2.3.3 Ovládání a řízení vstřikovacího stroje.....	28
3 KONVENČNÍ DOKONČOVACÍ OPERACE	30
3.1 JEMNÉ SOUSTRUŽENÍ.....	30
3.2 JEMNÉ FRÉZOVÁNÍ.....	31
3.3 BROUŠENÍ	31
3.4 HONOVÁNÍ	32
3.5 SUPERFINIŠOVÁNÍ	33
3.6 LAPOVÁNÍ	34
3.7 LEŠTĚNÍ.....	34
3.8 DOSAŽITELNÁ JAKOST POVRCHU.....	35
4 INTEGRITA POVRCHU A METODY HODNOCENÍ	36
4.1 JAKOST POVRCHU	37
4.1.1 Drsnost povrchu	37
4.1.2 Geometrická přesnost.....	41
4.1.3 Vlnitost.....	42
4.2 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	42
4.2.1 Dotykové měření jakosti povrchu	43
4.2.2 Bezdotykové měření jakosti povrchu.....	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	50

5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	51
6	POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE	52
6.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 470H 1000-400	52
6.2	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	54
6.3	SUŠIČKA GRANULÁTU ARBURG THERMOLIFT	55
6.4	PROFILOMĚR TAYLOR HOBSON FORM TALYSURF 50	56
6.5	RENTGENOVÝ DIFRAKTOMETR X'PERT PRO	57
7	POUŽITÉ MATERIÁLY	60
7.1	MATERIÁL TVAROVÝCH DUTIN	60
7.1.1	Ocel EN 1.2343 (ČSN 19 552)	60
7.2	POLYMERNÍ MATERIÁLY.....	61
7.2.1	PC Calibre 303EP	61
7.2.2	PMMA Pexiglas 8N	62
7.2.3	PP Syntegum 1020 AFV/HMFL.....	63
7.2.4	PA66 Technyl A 205F	64
8	VÝROBA TVAROVÝCH DUTIN.....	65
8.1	NÁVRH TVAROVÉ DUTINY	65
8.2	POSTUP VÝROBY	67
8.3	DOKONČOVACÍ OPERACE TVAROVÝCH DUTIN	67
9	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	71
9.1	HODNOCENÍ KRYSTALICKÉHO PODÍLU.....	72
9.2	HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU <i>R_a</i>	74
9.2.1	Porovnání jednotlivých polymerních materiálů	77
9.3	HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU <i>R_z</i>	78
	ZÁVĚR	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	87
	SEZNAM TABULEK.....	89

ÚVOD

Rozvoj výroby a následné spotřeby nových plastů vyžaduje pro jejich racionální a kvalitní aplikace v různých oborech našeho národního hospodářství podrobné technické informace. Polymerní materiály a technologie jejich zpracování zaujímají v posledních desetiletích obrovský rozvoj, používají se takřka ve všech průmyslových odvětvích. Polymery zahrnují širokou škálu chemického složení, různou vnitřní stavbu struktury a různé vlastnosti. Pro správnou aplikaci těchto materiálů je nutné umět se v nabízené škále orientovat. V minulosti byly polymery chápány výhradně jako součást chemických disciplín, nikoliv strojírenství. Je však zřejmé, že do této oblasti patří a návrhy moderních spotřebních i konstrukčních dílů se bez nich jen těžko mohou obejít. Výběr vhodného polymeru pro danou aplikaci, ale také řízení technologických procesů včetně kontroly jejich kvality vyžaduje alespoň základní znalosti o těchto materiálech.

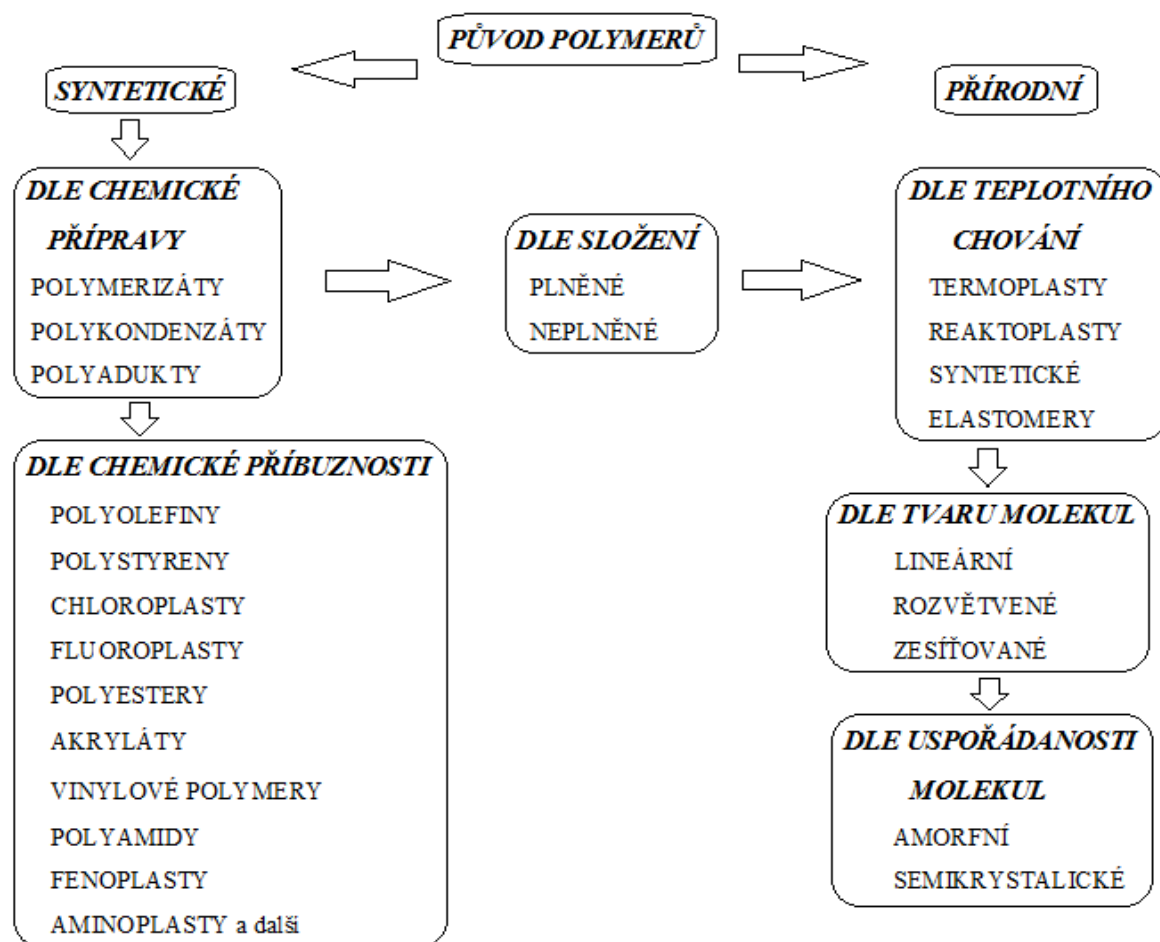
V konkurenci s klasickými materiály, zejména kovy, se polymery prosadily především svoji snadnou zpracovatelností, nízkou hustotou a obecně vhodným poměrem mezi užitnými vlastnostmi a cenou. Na vlastní výrobu plastů i na jejich zpracování je vynaloženo mnohem méně energie i práce než u kovů. Mnohé plasty předčí kovy svou odolností vůči chemikáliím. Všeobecně mají velmi dobré elektroizolační vlastnosti, vyznačují se schopností tlumit rázy a vibrace. U vybraných polymerů je výhodou také jejich průhlednost. V dnešní době je kladen důraz nejen na kvalitu a nízkou cenu, ale také na vzhled výrobku, jak celkově vypadá. To vede k vysokým nárokům jakosti funkční ploch dutin vstřikovacích forem, což také ovlivňuje cenu výrobku. Vzhledem ke konkurenčnímu boji je časově a finančně nevhodné dokončovat nad rámec tyto povrchy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, které jsou tvořeny makromolekulárními látkami, v nichž se mnohonásobně opakuje základní jednotka – mer. Ve svých obrovských molekulách obsahují většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, často dusíku, chloru, ale i jiných prvků. Molekulová hmotnost je zde o mnoho řádů vyšší než u ostatních tzv. nízkomolekulárních látek. Základní stavební částice nazýváme makromolekuly. Vznikají spojováním nízkomolekulárních látek, tzv. monomerů, a chemickými vazbami. Syntetické polymery vznikají třemi základními chemickými reakcemi, a sice polymerací, polyadící a polykondenzací. Při normální teplotě mají pevné skupenství. Za zvýšené teploty přecházejí do stavu kapalného (taveniny), což umožňuje dát polymerní tavenině tvar budoucího výrobku. Z hlediska chování za normální a za zvýšené teploty se polymery dělí na plasty a elastomery, jak lze vidět na Obr. 1. [1]

1.1 Rozdělení polymerů



Obr. 1. Rozdělení polymerů. [10]

Čisté polymery mohou být kombinovány s jinými materiály, obvykle pomocí mechanického míchání v pevném nebo roztaveném stavu. Takto jsou tvořeny směsi, které bývají dodávány ve formě granulí, prášku, past nebo kapalin. Směs je tvořena přídatkem vhodných typů přísad, plniv, výztužných materiálů či jiných polymerů. Účelem je zlepšit stávající zpracovatelnost a získat výrobek lepších vlastností. [1]

1.1.1 Plasty

Plasty jsou polymery, u nichž vnější namáhání způsobuje deformace převážně nevratného (trvalého) charakteru. Za běžných podmínek bývají většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. [1]

Plasty představují početnou a stále se rozšiřující skupinu materiálů, jejichž podstatu tvoří syntetické polymery. V zájmu zlepšení některých vlastností plastů se pak k základním syntetickým polymerům přidávají různé přísady, např. pigmenty (obarvují plasty), stabilizátory (zvyšují životnost plastů) či změkčovadla (zlepšují mechanické vlastnosti plastů). [1]

Jednou z oblastí, v níž plasty zaujímají téměř monopolní postavení a doprovázejí denně život každého z nás, je obalová technika. Obaly z plastů postupně vytlačily klasické materiály, jako byly sklo a papír. Největší uplatnění v tomto smyslu našly polyetylen, polypropylen, polystyren, polyetylen-tereftalát a polyvinylchlorid, zejména díky svým mechanickým vlastnostem a odolnosti vůči vodě i mikroorganismům. [1]

Vlastnosti plastů

Plasty se stávají stále významnějšími konstrukčními i textilními materiály. Jejich mnohostranná využitelnost je založena na jejich pozitivních vlastnostech a především na možnosti vyrobit polymery požadovaného charakteru. [19]

Plasty se vyznačují charakterovou variabilitou, např. tepelnou odolností, tvrdostí, pružností, schopností být formovány do předmětů, filmů či vláken. Mezi jejich výhody patří nízká hustota, chemická odolnost, jednoduše složení a struktury a dobrá zpracovatelnost. To je závislé na jejich struktuře i délce a vztahu řetězců makromolekul. [19]

Mechanické vlastnosti plastů (pevnost v tahu, ohyb, ráz, odolnost proti otěru) jsou dány strukturou řetězce, délkou řetězce a povahou mezimolekulárních sil. [19]

Tepelná odolnost plastů závisí na struktuře. Největší tepelnou odolnost mají silikony, fluorované uhlovodíky (te-flon), dosahující provozní teploty kolem 300°C. [19]

Chemické vlastnosti plastů záleží na struktuře, na charakteru příměsi a organických rozpouštědel, bobtnání, rozpuštění, vniknutí rozpouštědla mezi řetězce, odolnosti proti chemikáliím. [19]

Použití plastů

Plasty jsou neobyčejně významné materiály, aplikovatelné téměř ve všech odvětvích lidské činnosti. Z celkového objemu výroby plastů se v různých průmyslově vyspělých státech spotřebovává nejvíce pro účely elektrotechniky, chemických zařízení, dopravu a strojírenství.

Příklady použití plastů:

a) Elektrotechnika

- dobré dielektrické vlastnosti nepolárních plastů (PTFE, PS)
- proti elektrickému průrazu kompozity PF, PES, EP
- kabely a vodiče PVC, PE

b) Chemická zařízení

- trubky pro pitnou vodu lineární PE nebo PVC
- odpadní i PVC
- nádrže na uskladňování chemikálií, velké kompozity EP, PES
- PTFE i pro oxidační kyseliny.

c) Doprava

- čalounění, izolace, lehčené polyuretany, měkčené PVC
- karoserie a draky letadel, kompozity, především PP, PE, ABS.

d) Strojírenství

- ložiska PA, POM případně PTFE jako mazivo
- ozubená kola, tlumící elementy apod. [14]

Výhody

Mezi výhody plastů patří:

- Nízká měrná hmotnost
- Výborné zpracovatelské vlastnosti
- Jsou elektrickými izolanty
- Mají výbornou korozní odolnost
- Tlumí rázy a chvění

Nevýhody

Mezi nevýhody plastů patří:

- Nízké mechanické a časově závislé vlastnosti
- Ekologická zatížitelnost

Podle chování při zahřívání dále plasty dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [3]

1.1.2 Termoplasty

Polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu a lze je tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do oblasti taveniny přecházejí zahřátím nad teplotou tání, zpět do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání. Při zahřívání neprobíhá chemická reakce a během zpracování se nemění jejich chemická struktura. Změny, kterými materiál prochází, mají pouze fyzikální charakter a proces měknutí a tuhnutí je vratný, lze jej tedy teoreticky opakovat do nekonečna. Termoplasty mohou být amorfní i semikrystalické. [3]



Obr. 2. Příklady použití termoplastů. [24]

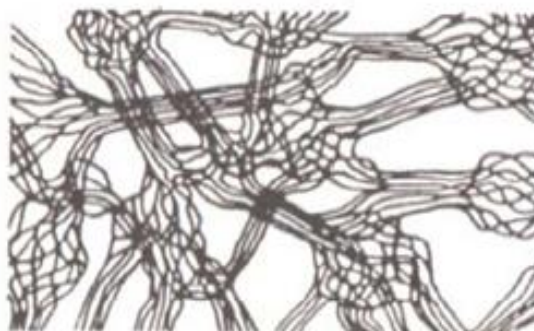
- **Amorfní** – makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu dle propustnosti světla čiré, transparentní, anebo průhledné. [3]



Obr. 3. Struktura amorfního termoplastu. [11]

Mezi nejznámější amorfní plasty patří:

- Polystyren (PS)
 - Polyvinylchlorid (PVC)
 - Akrylonitril-butadien-styren (ABS)
 - Polymethylmetakrylát (PMMA)
 - Polykarbonát (PC)
-
- **Semikrystalické** – Plasty, které vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených mezi oblastmi amorfními. [3]



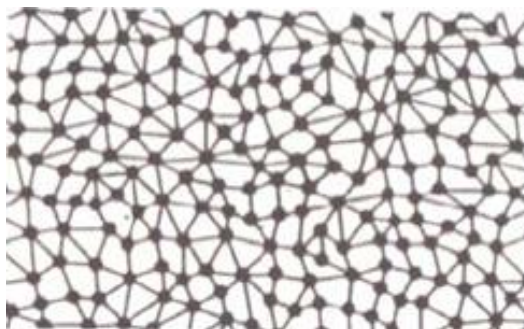
Obr. 4. Struktura semikrystalického termoplastu. [11]

Mezi nejznámější semikrystalické plasty patří:

- Polyetylen (PE)
- Polypropylen (PP)
- Polyamidy (PA)
- Polytetrafluoretylen (PTFE)
- Polyoxymetylen (POM)

1.1.3 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které v první fázi zahřívání měknou a lze je utvářet, ovšem pouze po omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci a k prostorovému sesíťování struktury, tzv. vytvrzování. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, protože zajištění rychlého ohřevu formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení materiálu by bylo obtížné. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit. Dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). [3]



Obr. 5. Struktura reaktoplastu. [11]

Mezi nejznámější reaktoplasty patří:

- Fenolformaldehydová pryskyřice (PF)
- Epoxidová pryskyřice (EP)
- Polyesterová pryskyřice (UP)
- Silikonové pryskyřice



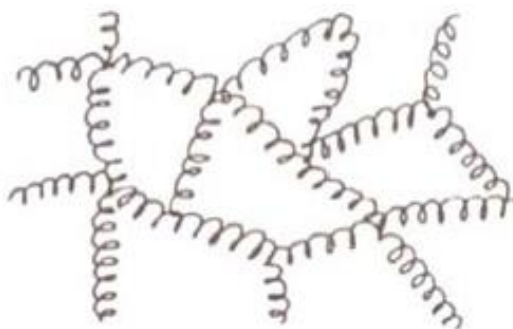
Obr. 6. Příklady použití reaktoplastu. [24]

1.1.4 Elastomery

Elastomery jsou vlastnostmi velmi podobné pryžím. Jejich struktura je tvořena tvrdými a měkkými segmenty. Měkké segmenty jsou tvořeny elastomery a tvrdé segmenty termoplasty, které vytvářejí uzly sítě. Termoplastické elastomery mají zesíťovanou strukturu. Zvyšováním teploty přecházejí na rozdíl od pryže do tekutého stavu a mohou se zpracovávat obdobně jako termoplasty. [3]

Základní surovinou pro výrobu elastomerů jsou kaučuky. Jsou to polymery, které mají ve svém makromolekulárním řetězci reaktivní místa, např. dvojně vazby, umožňující chemickou síťovanou reakci nazývanou vulkanizace. Při vulkanizaci se plasticky tvárný kaučuk mění na elastomer. [20]

Výhodou elastomerů je schopnost velké elastické deformace (100 % až 500 % i více) při zatěžování v tahu. Elasticita se projevuje tím, že lze elastomery poměrně malou silou deformovat v tahu, tlaku, ohybu, kroucením apod., a to v daleko větších mezích než je obvyklé u kteréhokoliv jiného materiálu. Jsou tedy schopny snášet bez poškození relativně velké opakované deformace a přeměňovat ve velké míře mechanickou energii v tepelnou (tlumení). [20]



Obr. 7. Struktura elastomeru. [3]



Obr. 8. Příklady použití elastomeru. [24]

1.2 Nadmolekulární struktura

Nadmolekulární struktura je stupeň uspořádanosti makromolekul a může být popsána jednak jako struktura amorfní a jednak jako struktura krystalická. Lineární makromolekuly vytváří, na rozdíl od rozvětvených makromolekul, uspořádanější nadmolekulární strukturu a zesíťované makromolekuly strukturu neuspořádanou. Termoplasty tak mohou mít amorfní nebo semikrystalickou nadmolekulární strukturu, zatímco reaktoplasty pouze strukturu amorfní. [11]

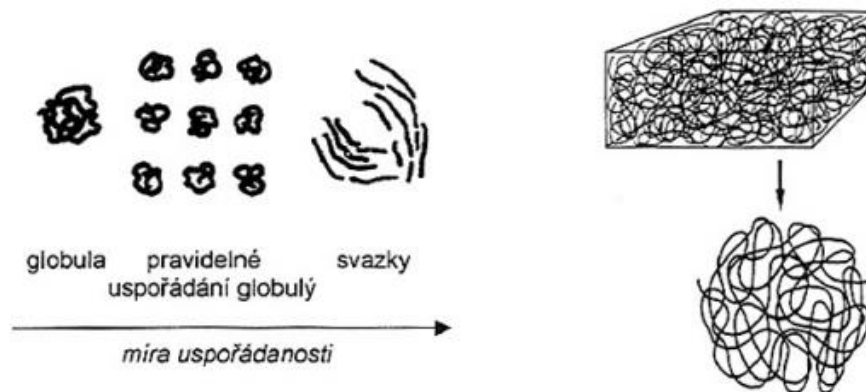
Mezi výhody patří nízká měrná hmotnost a výborné zpracovatelské vlastnosti. Polymery jsou elektrické izolanty, které mají výbornou korozní odolnost, tlumí rázy a chvění, apod. [3]

Nevýhodou polymerů jsou nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, kříp, ekologická zatížitelnost, apod. [3]

1.2.1 Amorfní struktura

Makromolekuly zde zauímají zcela nahodilou pozici. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu (1,4–1,6) dle propustnosti světla čiré (92 % propustnosti světla), transparentní, nebo průhledné (60 % propustnosti světla). Součinitel teplotní roztažnosti α je menší než u semikrystalických polymerů. Amorfní polymery jsou použitelné do teploty zesíťování T_g . Mezi amorfní polymery patří např.: PS, PVC, ABS, PMMA, PC, apod. [3]

Základním morfologickým útvarem amorfních polymerů jsou globuly, neboli klubíčka, o rozměrech desítek nanometrů ($10 \div 30$ nm), do kterých jsou sbaleny jednotlivé makromolekuly. Dojde-li k rozvinutí makromolekul tvořících globuly, jsou jednotlivé makromolekuly schopny se navzájem sdružovat do tzv. balíčků (svazků), které mohou dosáhnout takové dokonalosti v uspořádání, že vytvoří nepravé krystalické útvary. [3]



Obr. 9. Nadmolekulární struktura amorfních plastů. [27]



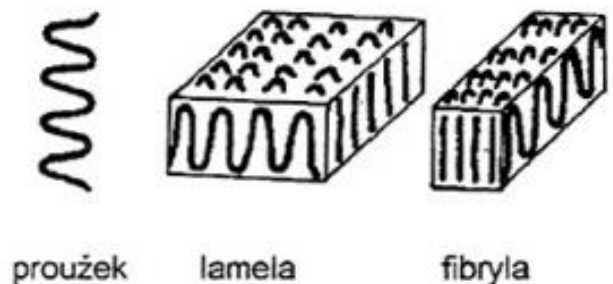
Obr. 10. Příklady použití amorfních plastů. [24]

1.2.2 Semikrystalická struktura

Vyazuje určitý stupeň uspořádanosti, který se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 % do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených mezi oblastmi amorfními. Nemůže nikdy dosáhnout 100 %, proto se krystalické plasty označují jako semikrystalické. Jsou mléčně zakalené, jejich index lomu je větší a jsou charakterizovány houževnatostí materiálu. Pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Semikrystalické plasty jsou použitelné do teploty tání T_m . Mezi semikrystalické polymery patří např.: PE, PP, PA, PTFE, POM, apod. [3]

Základním morfologickým útvarem krystalických polymerů (monokrystalů), které lze připravit krystalizací ze zředěných roztoků, jsou tzv. lamely, neboli destičkové útvary, o tloušťce 10 nm, které mohou být pyramidálně prohnuté. Elektronovou difrakcí bylo zjištěno, že řetězce v monokrystalu jsou uloženy téměř kolmo na rovinu lamel. Protože jsou řetězce mnohonásobně delší než tloušťka lamel, musí řetězec na jejich povrchu tvořit ohyb o 180° ,

na kterém se antiparalelně vrací do lamely, což se mnohokrát opakuje. Je-li roztok při krystalizaci vystaven smykovému namáhání, vznikají útvary vláknité, tzv. fibrily. V krajním případě řetězce tvoří ohyby a jsou napřímené. [3]



Obr. 11. Nadmolekulární struktura krystalických plastů. [3]

Míra uspořádanosti ve struktuře se vyjadřuje tzv. stupněm krystalinity. Stupeň krystalinity tedy udává relativní podíl krystalických oblastí ve hmotě. Pro vznik semikrystalické struktury je nutná tvorba krystalizačních zárodků (tzv. nukleace), na nichž teprve poté rostou krystality. K nukleaci dochází při ochlazování taveniny, která má amorfni strukturu. Pod teplotou zeskenění T_g a nad teplotou tání T_m k nukleaci nedochází. Druhým důležitým faktorem, rozhodujícím o tvorbě krystalické fáze je doba, kterou má polymer k dispozici. Má-li se dosáhnout jemnozrnné struktury, musí krystalizace probíhat při takové teplotě, kdy se tvoří velké množství zárodků. Má-li výrobek vykazovat co nejlepší mechanické vlastnosti je zapotřebí řídit krystalizaci tak, aby bylo dosaženo nejen co nejvyššího stupně krystalinity, ale také současně jemnozrnné struktury. Prudké ochlazení povrchu budoucího výrobku způsobí, že polymer sice zkrystalizuje, ale nevytváří sférolitickou strukturu. [11]



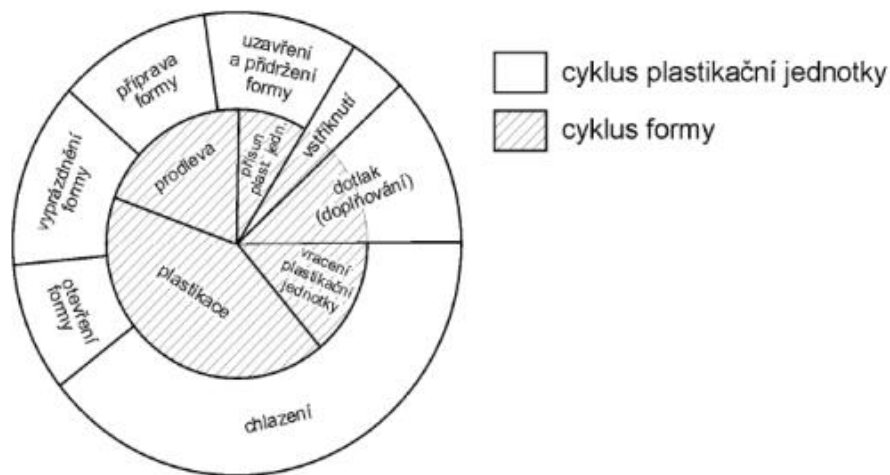
Obr. 12. Příklady použití semikrystalických plastů. [24]

2 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování patří k nejrozšířenějším a nejdůležitějším technologiím zpracování termoplastů. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Jejich tvar může být velice jednoduchý, ale stejně tak i značně složitý. Jejich hmotnost může dosahovat třeba jen zlomků gramu, zatímco nejtěžší výrobky váží až několik desítek kilogramů. Vstřikovací proces probíhá na moderních strojích, většinou plně automaticky, takže se dosahuje vysoké produktivity práce. K přednostem vstřikování rovněž patří vysoké využití zpracovaného materiálu. Tím se splňují požadavky kladené na bezodpadovou technologii. [3]

2.1 Princip vstřikování

Vstřikování je proces utváření plastů, během kterého se roztavený materiál vstříkne vysokou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy, kterou vyplní, následně ztuhne a vytvoří výrobek s požadovanými vlastnostmi a tvarem. Metoda vstřikování je velmi progresivní s vysokou opakovatelností a umožňuje zhotovení velkého počtu výrobků za jednu operaci. Vstřikovací cyklus lze vidět na Obr. 13. [3]



Obr. 13. Časové rozložení vstřikovacího cyklu. [27]

Vstřikování probíhá tak, že je plastový granulát dávkován do násypky stroje. Odtud přechází do tavicí komory vyhřívané odporovými pásy, kde působením tepla taje (plastikace). Vstřikovací cyklus začíná v okamžiku uzavření vstřikovací formy, kdy vstřikovací

jednotka je ve výchozí poloze. Následuje přisunutí vstříkovací jednotky a dosednutí na uzavřenou formu. Tavenina je vstříknuta a dotlačována (dotlak) pohybem šneku nebo pístu do dutiny vstříkovací jednotky. Tavenina zcela zaplní dutinu formy, čímž zaujme její tvar a ochlazením přejde do tuhého stavu bez tlaku. Po zatuhnutí dojde k odjezdu vstříkovací jednotky do výchozí polohy. Dále dojde k otevření formy a vyhození výrobku. Během zatuhnutí a vyhození produktu probíhá ve vstříkovací jednotce příprava taveniny. Forma a vstříkovací jednotka jsou ve výchozí poloze a celý proces se může opakovat. [3]

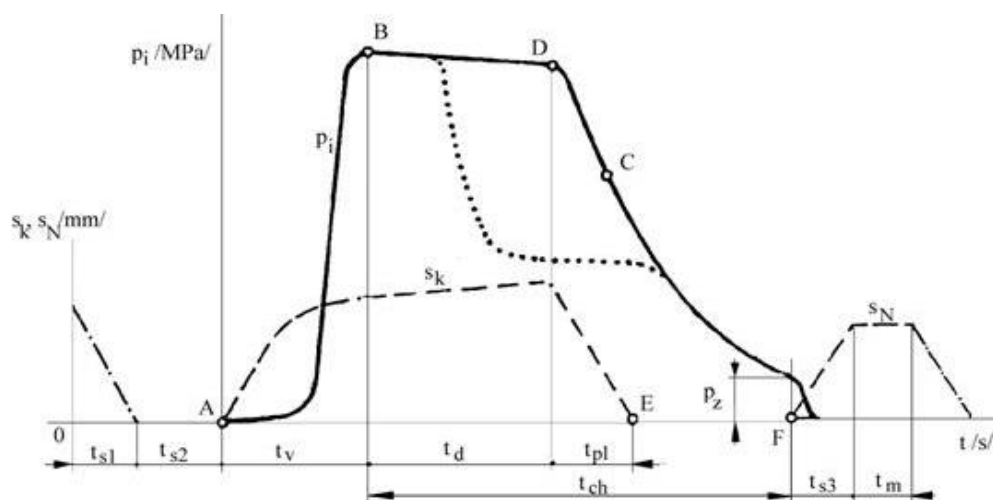
2.2 Technologické parametry vstříkování

2.2.1 Vstříkovací rychlost

Vstříkovací rychlost je ovlivněna vstříkovacím tlakem a časem. Musí být taková, aby dutina formy byla naplněna a přitom nedošlo k předčasnému zchlazení taveniny. Obvykle se definuje jako objem taveniny prošlý tryskou za jednotku času. Rychlost plnění závisí na viskozitě taveniny, homogenitě a odporech v trysce, na vtokových kanálech a vlastní formě. Vysoká vstříkovací rychlost má výrazný vliv na orientaci makromolekul a vláknitého plniva, ale je zde i nebezpečí přehřátí a teplotní degradace materiálu. Na druhou stranu je u vysoké rychlosti vstříkování tekuté jádro teplejší než u nízké vstříkovací rychlosti. [4]

2.2.2 Vstříkovací tlak

S velikostí vstříkovacího tlaku souvisí rychlost vstříkování. Vstříkovací síla je závislá na jednotce plochy čela vstříkovacího šneku nebo pístu. Ovlivňuje rychlost plnění, uzavírací sílu, vnitřní pnutí, smrštění i orientaci (narovnání makromolekul). [3]



Obr. 14. Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstříkování S_k - pohyb šneku, s_N - pohyb nástroje (formy). [3]

Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu, pohyblivá část formy se přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne. Následuje pohyb šneku v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty do dutiny vstřikovací formy. V této části šnek vykonává pouze axiální pohyb, neotáčí se a plní funkci pístu. Po naplnění formy je tavenina v dutině následovně stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty. [3]

Jakmile tavenina vstoupí do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne. Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku. Doba chlazení se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Doba chlazení závisí na teplotě formy a tloušťce stěny výrobku. Během chlazení se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem, aby se na výstřiku netvořily propadliny a staženiny. Zmenšování objemu je nutné kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy (dotlak). Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak, nebo se může po několika sekundách snížit a další chlazení probíhá při sníženém tlaku. Dotlak se proto rozděluje na izobarický a izochorický. Aby se dalo dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu (polštář), na který bude šnek působit svým čelem. Polštář nesmí být příliš velký, aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty. Nejčastěji se volí 10 až 15 % z průměru šneku. [3]

Po dotlaku následuje plastikace další dávky taveniny. Šnek se začne otáčet a tím nabírá granulát z násypky, plastikuje ji a vtlačuje před čelo šneku. Zároveň s otáčením šnek koná pohyb vzad. Plastikace se děje přestupem tepla z vyhřívané komory šneku a třením mezi stěnou komory a šnekem, tzv. frikčním teplem. [3]

Po ukončení fáze dotlaku tlak uvnitř formy klesá až na hodnoty 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 zchlazení výstřiku dojde k otevření formy a vyhození výstřiku z formy. [3]

2.2.3 Dotlak

Jedná se o tlak, který působí na taveninu po zaplnění dutiny formy do momentu zatuhnutí výstřiku nebo vtokového systému. Jeho hlavní úlohou je zabránit vytékání taveniny vtokovou soustavou z formy. Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak, nebo se může po několika sekundách snížit a další chlazení probíhá při sníženém tlaku. Proto se rozděluje na izobarický a izochorický. Aby bylo možné tzv. dotlačování, musí před

čelem šneku zůstat určitý objem plastu (polštář), na který bude šnek působit svým čelem. Tento objem nesmí být příliš velký, obvykle pouze cca 10 až 15 %, menší než jednonásobek průměru šneku D , aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty. [3]

2.2.4 Teplota taveniny

Je to teplota, na kterou se tavenina vytemperuje v průběhu fáze zvané plastikace při otáčení šneku, kdy se požadovaný objem množství taveniny shromáždí před čelem šneku. Přesná teplota je závislá na typu polymeru a ovlivňuje tekutost plastu, dobu chlazení, vstříkovací tlak, ale také dobu cyklu, smrštění, tlakové ztráty, dotlak, atd. [4]

2.2.5 Teplota formy

Udává teplotu povrchu tvarové dutiny formy. Teplota formy závisí na:

- Typu vstříkované plastické hmoty – zejména na specifickém teple, teplotě tání, na teplotě potřebné k přeměně na taveninu nebo k přeměně zpět do tuhého stavu, na tokových vlastnostech taveniny, na teplotě tváření a požadované nadmolekulární struktuře.
- Výrobku – na tvaru, zejména tloušťce stěny a její rovnoměrnosti, maximální délce toku taveniny od vtoku, požadovaných tolerancích, kvalitě povrchu a na mechanických vlastnostech.
- Vlastnostech formě – zejména na konstrukci a účinnosti temperačního systému (ohřevu a chlazení), na konstrukci vtokového systému a dutiny formy, na hmotě formy a na teplotní vodivosti a tepelném obsahu materiálu formy.
- Vstříkovacím stroji a technologických podmínkách – zejména na vstříkovacím cyklu. [4]

2.2.6 Doba vstříkovacího cyklu

Doba, za níž proběhnou všechny operace při vstříkování jednoho výstříku.

Doba vstříkovacího cyklu zahrnuje:

- dobu uzavření formy a dosedu vstříkovací jednotky na formu
- dobu plnění formy
- dobu působení dotlaku
- dobu chlazení bez tlaku
- dobu manipulace, tj. otevření formy a vyjmutí výstříku

2.3 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj je zařízení, které umožňuje roztavení plastické hmoty a její homogenizaci, dále vstřikování taveniny pod tlakem do formy uzavřené a zajištěné proti otevření silou, která musí být větší než síla vyvolaná tlakem taveniny v dutině formy. V současné době existuje velký počet různých konstrukcí strojů, které se od sebe liší svým provedením, stupněm řízení, stálostí a reprodukovatelností jednotlivých parametrů, rychlostí výroby, snadnou obsluhou i cenou. [4]

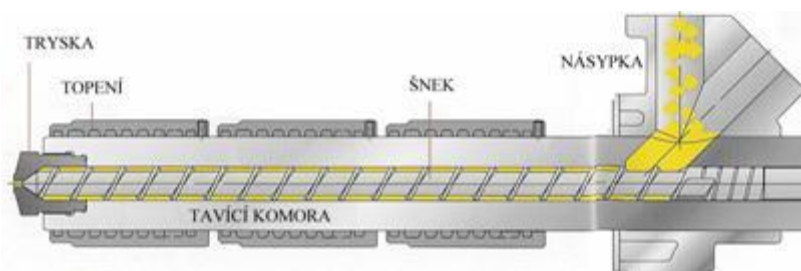
Konstrukce stroje je charakterizována podle:

- Vstřikovací jednotky
- Uzavírací jednotky
- Ovládání a řízení strojů

2.3.1 Vstřikovací jednotka

Připraví a dopraví požadované množství roztaveného plastu s předepsanými technologickými parametry do formy. Množství dopravované taveniny musí být menší, než je kapacita vstřikovací jednotky při jednom zdvihu. Při malém vstřikovacím množství setrvává plast ve vstřikovací jednotce delší dobu a tím může nastat jeho degradace. To se dá ovlivnit rychlejšími cykly výroby. Maximální vstřikované množství nemá překročit 90 % kapacity jednotky, protože je ještě nutná rezerva pro případné doplnění úbytku hmoty při chlazení (smrštění). Optimální množství je 80 %. [4]

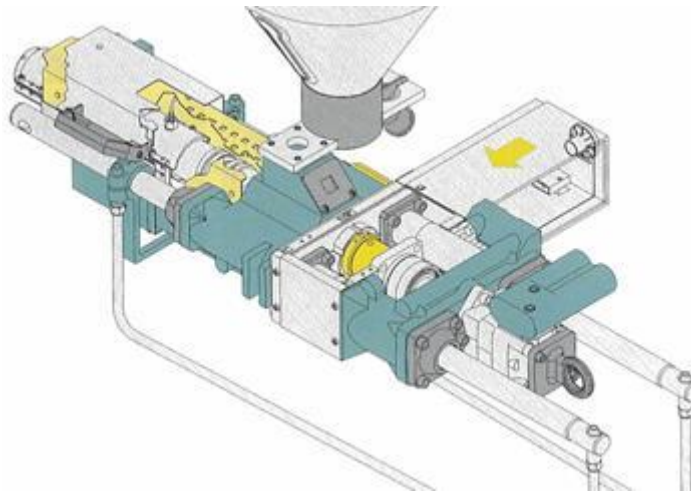
Vstřikovací jednotka pracuje tak, že je do tavného válce dopravován zpracovaný plast z násypky pohybem šneku. Plast je posouván šnekem s možnou změnou otáček přes vstupní, přechodové a výstupní pásmo. Postupně se plastikuje, homogenizuje a hromadí před šnekem. Současně ho odtlačuje do zadní polohy. [4]



Obr. 15. Řez vstřikovací jednotkou. [3]

Topení tavné komory je nejčastěji rozděleno do tří pásem (vstupní, přechodové a výstupní). Tryska má zvláštní samostatné topení. Část tepelné energie vznikne disipací v materiálu. [5]

Tavná komora je zakončena vyhřívanou tryskou, která spojuje vstřikovací jednotku s formou. Kulové zakončení trysky zajišťuje přesné dosednutí do sedla vtokové vložky formy. Jejich souosost, menší průměr otvoru a menší poloměr trysky než je u sedla vtokové vložky, jsou podmínkou správné funkce. [5]



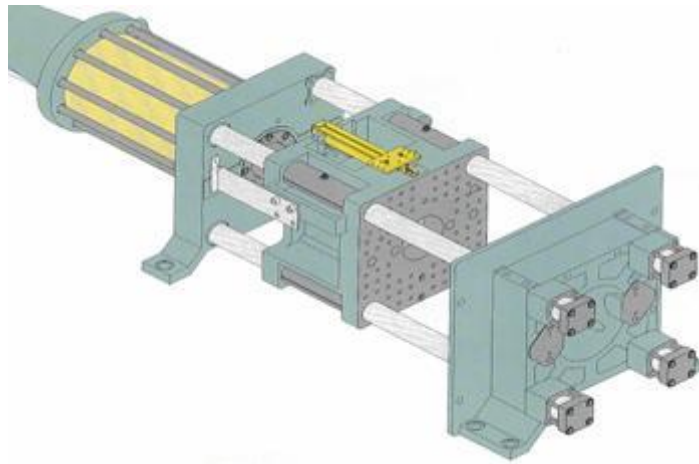
Obr. 16. Vstřikovací jednotka. [4]

2.3.2 Uzavírací jednotka

Ovládá formu a zajišťuje její dokonalé uzavření, otevření i případné vyprázdnění. Velikost uzavíracího tlaku je stavitelná a je přímo závislá na velikosti vstřikovacího tlaku, ploše dutiny a vtoků v dělicí rovině. [5]

Hlavní části uzavírací jednotky jsou:

- Opěrná deska pevná
- Upínací deska
- Vodící sloupky
- Uzavírací mechanismus



Obr. 17. Uzavírací jednotka. [3]

Uzavírací mechanismus je ukazatelem kvality uzavírací jednotky. Mívá nejrůznější provedení. Hydraulické uzavírací jednotky umožňují pootevření nástroje hydraulickým tlakem a vyžadují zajištění závorou. Výhodou těchto jednotek je nastavení libovolné hloubky otevření nástroje. Hydraulicko-mechanická jednotka je nejčastěji používána u strojů malých gramáží. Zaručuje vyšší rychlost uzavírání s potřebným zpomalením před uzavřením formy s dostatečnou tuhostí. Je konstruována jako kloubový mechanismus ovládaný hydraulickým válcem. Formu proti pootevření při vstřikovávání zajistí hydraulický válec velkého průřezu, který je pevně spojen s upínací deskou. Některé konstrukce uzavíracích jednotek jsou bez vodících sloupů. [5]

2.3.3 Ovládání a řízení vstřikovacího stroje

Stupeň řízení a snadná obsluha stroje jsou charakteristickými znaky jeho kvality. Stálá reprodukovatelnost technologických parametrů je význačným a nutným faktorem. Pokud tyto parametry nepřiměřeně kolísají, projeví se tato nerovnoměrnost na přesnosti a kvalitě výroby výstřiků. Řízení stroje se musí zajistit vhodnými řídicími a regulačními prvky.

Novější koncepce vstřikovacích strojů se v současnosti neobejdou bez výkonné procesorové techniky. Místo obvyklé textové formy nastavování technologických parametrů se využívá nejrůznější grafické formy řízení pracovního cyklu na displeji se selektivním přístupem k jednotlivým parametrům stroje. Pracovní cyklus sestavený do potřebných programových sekvencí je pak snadno kontrolovatelný a případně i upravitelný. [5]

Koncepčně je takové seřízení rozděleno na:

- Sestavení grafu vstřikovacího stroje
- Definice a nastavení parametrů
- Kontroly procesu

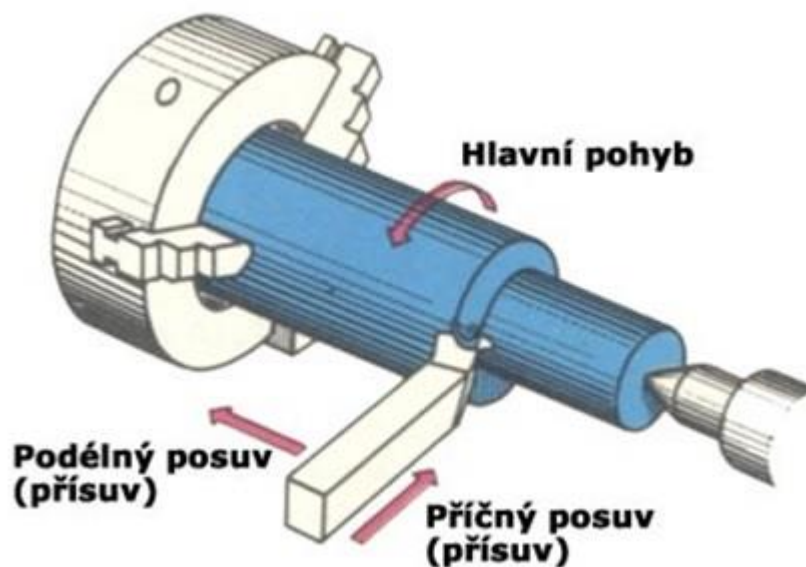
Nastavení stroje je řídicím systémem také kontrolováno (zpětná vazba). Alternativní volba a úprava programu se pak může snadno uskutečnit za pomoci barevné obrazovky. Na přesnosti a jakosti výstříků má řízení stroje rozhodující vliv:

- Tím, že určuje a dodržuje přesnost nastavení výše i doby vstřikovacího tlaku, do-tlaku, rychlosti vstřiku a chlazení. Tyto parametry určují především přesnost a tole-ranci výstříků.
- Tím, že určuje a dodržuje přesnost nastavením doby a výšky teploty taveniny, její homogenizací jsou určeny fyzikální a mechanické vlastnosti výstříků. [5]

3 KONVENČNÍ DOKONČOVACÍ OPERACE

3.1 Jemné soustružení

Soustružení je třískové obrábění vnitřních nebo vnějších ploch, většinou jednobřítým obráběcím nástrojem pohybujícím se rovnoběžně s osou rotace obrobku upnutého ve sklíčidle, mezi hroty apod. Soustružením se obrábí vnější a vnitřní plochy součástí rotačních tvarů. Hlavní otáčivý pohyb koná zpravidla obrobek, posuvný pohyb pak nástroj, který se posouvá. Podle posuvu řezného nástroje vzhledem k ose otáčení se rozeznává soustružení podélné, čelní a tvarové, jako je např. zapichování. Soustružením je tak možno obrábět vnější i vnitřní válcové plochy, provádět zarovnání čel, zápichy (vnitřní nebo vnější), upichování, řezání závitů i vyvrtávání v dutinách. Kuželové plochy se obrábějí vyosením koníka nebo kopírováním. [12]



Obr. 18. Princip jemného soustružení. [25]

Velikost řezné rychlosti se vypočítává jako obvodová rychlost obráběné plochy

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \quad [m/min] \quad (1)$$

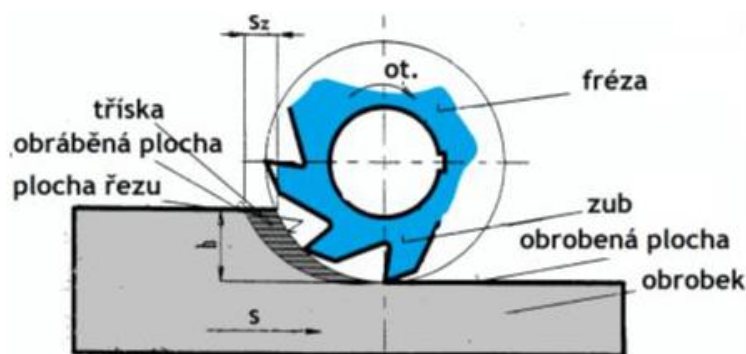
Kde D je v mm průměr obráběné plochy a n počet otáček obrobku za minutu. Optimální řezná rychlost závisí na mechanických vlastnostech materiálu obrobku, materiálu nože, velikosti posuvu s a hloubky odebírané třísky h .

Velikost podélného i příčného posuvu se udává dráhou nože za 1 otáčku obrobku. [12]

3.2 Jemné frézování

Jemné frézování je dokončovací metoda, při které je materiál obrobku odebrán břitem či břity otáčejícího se nástroje. 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 jsou schopny tyto pohyby vykonávat ve všech směrech. [12]

Obrábění probíhá na speciálních strojích, které mají dostatečnou tuhost a vysoké otáčky, při velké řezné rychlosti, minimálním posuvu a přísluvu. Tím vznikají pouze malé deformace a povrchová vrstva. K frézování se používají čelní frézy s jedním nebo několika noži s destičkami z SK nebo diamantu. [12]

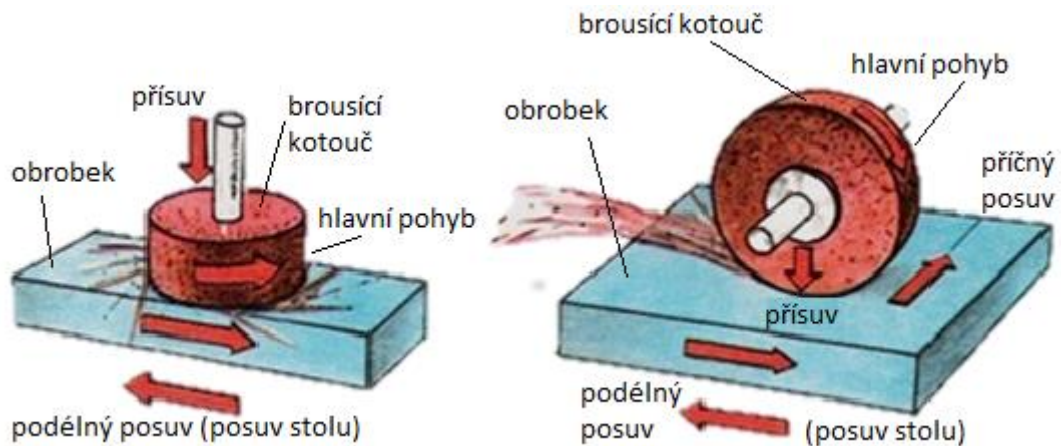


Obr. 19. Princip jemného frézování. [25]

Kde jsou ot – otáčky frézy, s – posuv obrobku, s_z – posuv na zub, h – hloubka záběru

3.3 Broušení

Broušení je dokončovací operace, která se vyznačuje velkou přesností, správností geometrického tvaru a zpravidla velmi dobrou jakostí povrchu. Patří k nejvýznamnější části technologické výroby dnešní doby. Operace broušení umožňuje vyšší tvarovou a rozměrovou kvalitu a v technologickém procesu je známá jako vysoce přesná dokončovací operace. Pro broušení je charakteristické rozložení zrn brousícího kotouče, která jsou rozložena nepravidelně po celém jeho povrchu a odebírají velké množství malých třísek. [13]



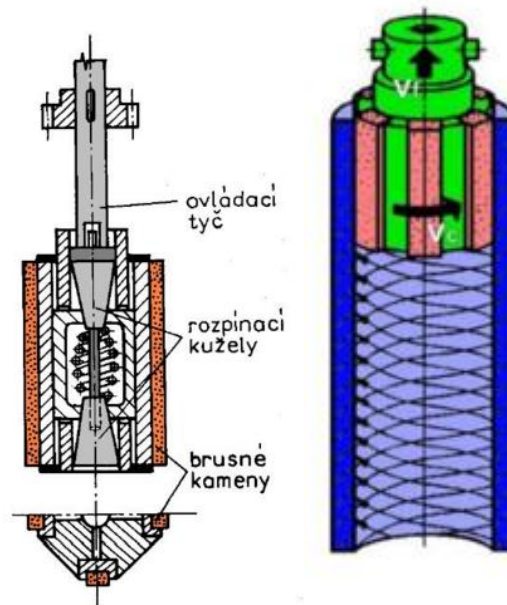
Obr. 20. Princip rovinného broušení čelem a obvodem kotouče. [25]

3.4 Honování

Honování je dobrušování vnitřních (případně i vnějších) válcových ploch, kterým se dosahuje vysoké kvality povrchu i vysokého stupně přesnosti vnitřních rotačních ploch. Tímto způsobem se dobrušují vnitřní činné plochy válců spalovacích motorů, kompresorů či hydraulických zařízení) i vnějších plochy čepů nebo pístů. [12]

Při honování děr se pohybuje nástroj, kdežto při honování vnějších ploch se pohybuje obrobek. K honování se používá 3 až 12 brusných honovacích kamenů upnutých v honovací hlavě, které konají kmitavý (700 až 1500 zdvihů za minutu) a axiální pohyb o délce 1 až 5 mm, což vytváří šroubovitou stopu. Honovací kameny jsou z karborunda (honování litiny), z umělého korundu (honování ocelí), z diamantu nebo slinutých karbidů. [12]

Drsnost ploch po honování závisí na drsnosti honovacích kamenů. Honováním se opravuje ovalita, kuželovitost a vlnovitost děr. Honovat je možné od průměru 2 do 1000 mm, do délky až 10 m. Honování se nejvíce používá ve výrobě spalovacích motorů pro obrábění válců, ojníc a všude tam, kde je potřeba dobrousit menší díry s malou drsností. [12]



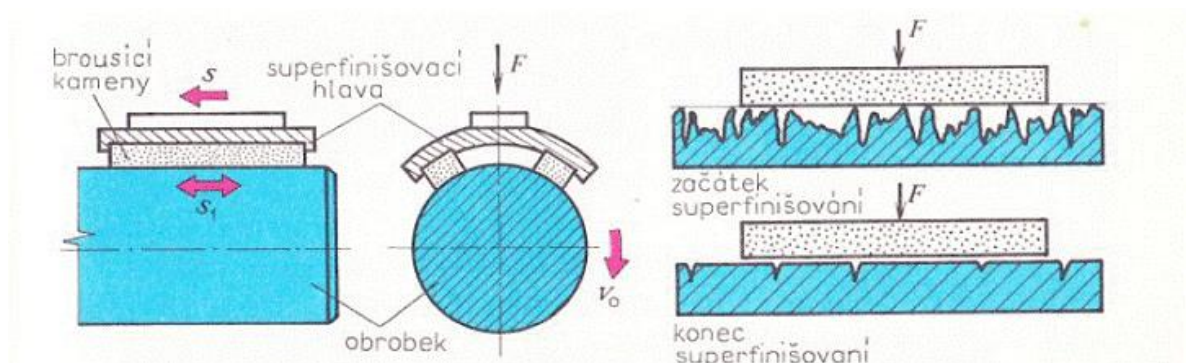
Obr. 21. Princip honování. [25]

3.5 Superfinašování

Superfinašování je broušení vnějších rovinných nebo rotačních ploch pomocí brusného kamenu, který vykonává kmitavý pohyb. Nutnou podmínkou obrábění je vytvoření kapaliného nosného filmu mezi brusným kamenem a superfinašovací plochou. [12]

Podstatou superfinašování je protržení kapaliného filmu vytvořeného na povrchu obráběné plochy, čímž dojde k přímému styku brusného zrna s obráběnou plochou. Obráběním vrcholů povrchových nerovností se snižuje měrný tlak, kameny začnou plavat a obrábění již dále neprobíhá. Další prodlužování procesu by bylo bezúčelné. [12]

Vnější rotační plochy se superfinašují na hrotových bruskách vybavených speciální superfinašovací hlavou na speciálních superfinašovacích strojích. [12]

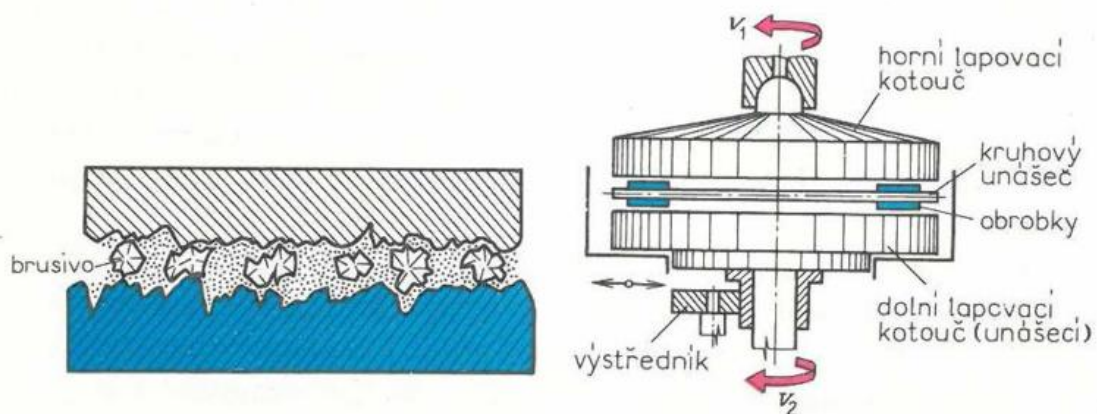


Obr. 22. Princip superfinašování. [25]

3.6 Lapování

Lapování je obrušování povrchu obrobku jemným brusivem volně neseným v lapovací kapalině (olej, petrolej) nebo pastě (např. parafín), které je na lapovanou plochu přitlačováno lapovacím nástrojem. Tvar lapovacího nástroje je negativem lapované plochy. Funkční plochy lapovacích nástrojů jsou zhotoveny z mědi, bronzu, olova, litiny, měkké nebo kalené oceli, plastů nebo dřeva. [14]

Na Obr. 23 je naznačeno lapování rovinných ploch čel obrobku tvaru kotouče. Obrobky jsou vloženy mezi dvě lapovací desky kruhového tvaru. Horní deska se otáčí a přitlačuje na obrobky, dolní deska se otáčí a současně posouvá ve vodorovném směru střídavě na obě strany. Mezi desky je přiváděna lapovací kapalina nebo pasta. V důsledku rozdílných pohybů desek dochází k rovnoměrnému obrušování čel obrobků. Rozměrová přesnost dosažená lapováním je IT 1 až IT 3, Drsnost povrchu $Ra = 0,02$ až $0,05$. Přídavek ponechávaný na honování je $0,005$ až $0,03$ mm. [14]



Obr. 23. Princip lapování. [25]

3.7 Leštění

Leštění je operace obrábění, kterou se odstraní drobné nerovnosti, docílí se zrcadlového lesku a vysoké jakosti obrobku. Materiál obrobku je odebrán mechanickým způsobem zrn tvrdých brousících materiálů, která jsou pevně uchycena na leštícím nástroji, nebo volně nanášena mezi nástroj a obrobek. Na rozdíl od broušení se jedná o malý úběr materiálu, který slouží k odstranění nerovností po předchozím obrábění. Leštění lze provádět ručně nebo strojně na univerzálních nebo jednoúčelových leštičkách. [14]

Leštící kotouče jsou zhotoveny z plsti, skládaných tkanin, bavlny, kůže, gumy, dřeva, korku, papíru, lisované bavlny, kovu apod. Při větším znečištění se na plstěný kotouč lepí

velmi jemné brusivo. Leštící kartáče mají střed vyroben z kovu, dřeva, plastu nebo gumy, do kterého jsou pevně uchycena vlákna z ocelového drátu, nylonu, silonu, žíní, příze, bronzu apod. [14]

3.8 Dosažitelná jakost povrchu

Tab. 1. Dosažovaná přesnost a drsnost povrchu dokončovacích operací.

Dokončovací operace			Přesnost rozměru IT		Drsnost plochy Ra [μm]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
Broušení	Vnější rotační plochy	hrubování	10	9 - 11	1,6	0,8 - 3,2
		dokončování	5	5 - 6	0,4	0,2 - 0,6
		jemné	4	3 - 5	0,2	0,05 - 0,4
	Vnitřní rotační plochy	hrubování	9	9 - 11	1,6	1,6 - 3,2
		dokončování	7	5 - 7	0,8	0,4 - 1,6
		jemné	5	3 - 6	0,2	0,05 - 0,4
	Rovinné plochy	hrubování	10	9 - 11	1,6	1,6 - 3,2
		dokončování	7	5 - 7	0,8	0,4 - 1,6
		jemné	5	3 - 6	0,2	0,05 - 0,4
Honování		hrubování		6 - 8		0,2 - 0,8
		jemné		5 - 7		0,1 - 0,2
		dokončování		3 - 5		0,06 - 0,1
Superfinašování		dokončování		3 - 5		0,05 - 0,4
		jemné		2 - 4		0,025 - 0,1
Lapování		hrubování	4	3 - 5	0,2	0,16 - 0,4
		jemné	2	1 - 3	0,1	0,08 - 0,16
		velmi jemné			0,03	0,01 - 0,04

4 INTEGRITA POVRCHU A METODY HODNOCENÍ

Integrita povrchu je souhrn charakteristik, kterými lze hodnotit kvalitu povrchové vrstvy ve vztahu k jeho funkčním vlastnostem a provozní spolehlivosti. Kvalita obrobku, kterou požaduje konstruktér, je základním vstupním údajem životnosti a spolehlivosti strojů i samostatného výrobního procesu. Špatná drsnost ohrožuje kvalitu výrobku i trvanlivost a provozuschopnost strojů. Neúměrná vysoká kvalita povrchu neúčelně a zbytečně zvyšuje výrobní náklady. Ukazatelem kvalitního hodnocení obrobku je míra dodržení všech předepsaných výkresových rozměrů, odchylek tvaru a polohy a požadované drsnosti obrobekových ploch. Při výrobě součástku nezhotovíme nikdy zcela přesně. Skutečné hodnoty se vždy odchyľují od jmenovité hodnoty nahoru nebo dolů, s tzv. plusovou nebo minusovou tolerancí. Geometrie obrobekové plochy se liší od ideální geometrie zadané výkresem. Na obrobekové ploše jsou vlivem stop po řezném nástroji a plastických deformacích určité mikrone rovnosti. Stav a jakost obrobekového povrchu mají vliv na únavovou pevnost, odolnost vůči opotřebení, protikorozní stabilitu, životnost a provozuschopnost strojů. Stav a jakost obrobekové plochy posuzujeme z hlediska geometrie obrobekového povrchu, fyzikálně-mechanických vlastností povrchové vrstvy, struktury i deformace, případně i dalších mimořádných jevů povrchové vrstvy. Při zkoumání geometrických odchylek skutečného tvaru od ideálního si všímáme makrogeometrických a mikrogeometrických odchylek a vlnitosti. [13]

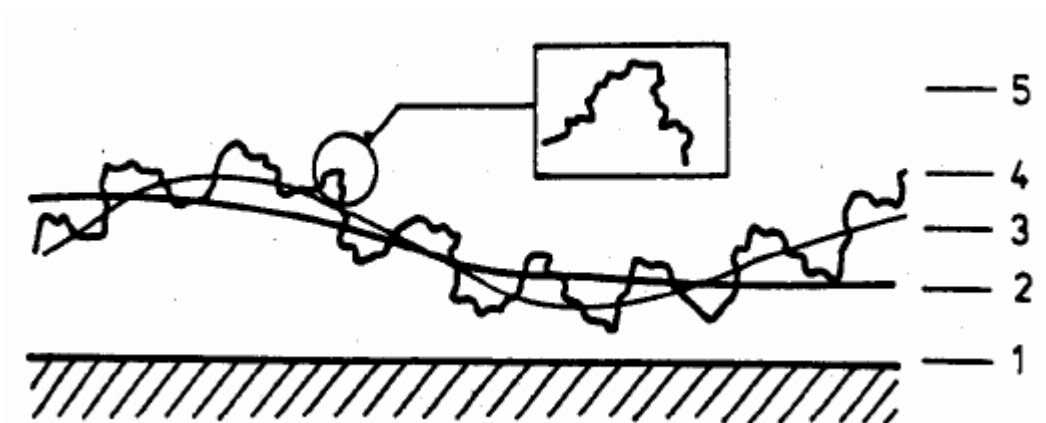
Podle následujících hledisek můžeme posuzovat integritu povrchu:

- Vizuální: Dislokace / spáleniny, mikro / makro trhliny, koroze, korozní napětí, estetika
- Zbytkové napětí: Tahové / tlakové, velikost a směr zbytkových napětí, dvouosé / trojosé napětí, gradient napětí, aj.
- Rozměrové: Jakost povrchu / vlnitost, geometrická přesnost, deformace, relaxace napětí
- Tribologické: tření, opotřebení, tvrdost, tepelné změny
- Metallurgické: Mikrostruktura, fázové přeměny
- Ostatní: Chemické, magnetické, optické a elektrické vlastnosti

4.1 Jakost povrchu

Geometrická struktura povrchu je soustavou geometrických prvků povrchu, podmíněná tvarem, rozměrem a rozmístěním převýšenin a prohlubní, které pocházejí z mechanického obrábění, nebo jsou zapříčiněné opotřebováním. Odchylkou tvaru je posouzení odchylky jednoho tvarového prvku od ideálního geometrického tvaru. Tvoření vln při broušení na čisto je nejvíce ovlivněno pracovními pohyby obrobku, brousícího vřeteníku kotouče a jeho tvarovou úchylkou (neokrouhlostí, ovalitou). Vlnitost povrchu je souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohlubenin. [21]

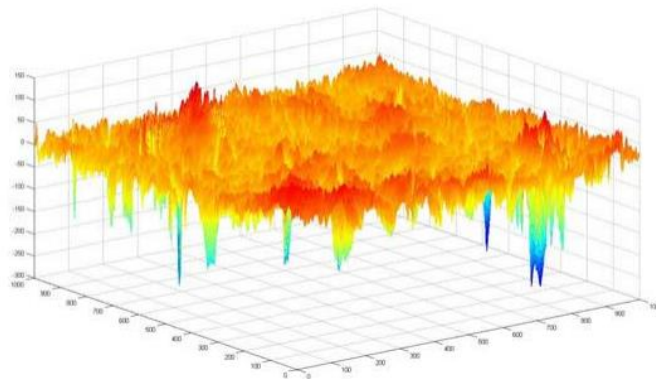
Vyrobené technické povrchy mají odchylky tvaru, polohy a drsnosti. Na Obr. 24. je znázorněno schéma geometrických odchylek od ideálně hladkého povrchu v řezu, kde 1-ideálně rovný povrch, 2-odchylky tvaru a polohy, 3-vlnitost povrchu, 4-mikroskopické drsnosti, 5-submikroskopické nerovnosti. [21]



Obr. 24. Charakter textury povrchu. [21]

4.1.1 Drsnost povrchu

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují pouze ojediněle (risky, trhliny, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Podle převládajícího směru nerovnosti se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. [13]



Obr. 25. Drsnost povrchu. [26]

Definice geometrických parametrů:

P - parametr: parametr vypočítaný ze základního profilu. Je to nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky l_n . [13]

R – parametr: parametr vypočítaný z profilu drsnosti. Je to svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubšímu filtrovanému profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n . [13]

W – parametr: parametr vypočítaný z profilu vlnitosti. Je to vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti uvnitř měřené délky l_n . [13]

Parametry textury povrchu se dělí na:

- Amplitudové
- Plošné a objemové
- Hybridní
- Funkční

1) **Amplitudové parametry** představují skupinu parametrů prostorového hodnocení, která vychází z rozložení výšek souřadnic profilu povrchu.

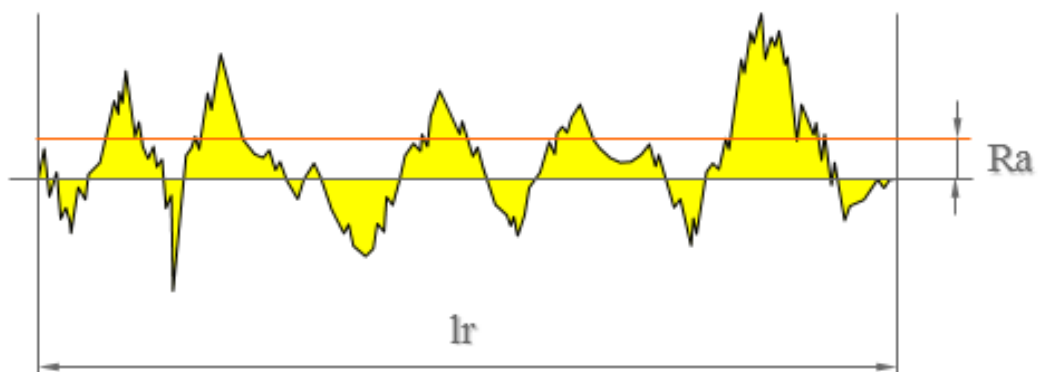
- **Ra** – Průměrná aritmetická odchylka povrchu
- **Rz** – Největší výška profilu drsnosti
- **Rt** – Celková výška povrchu
- **Rq** – Průměrná kvadratická úchylka (Rms) povrchu
- **Rsk** – Šikmost křivky rozdělení výšek

Průměrná aritmetická úchylka povrchu Ra

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu měřené délky l_r .

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2)$$

Střední aritmetická odchylka profilu Ra je základní charakteristikou pro popis mikrogeometrie povrchu. Naměřené hodnoty této veličiny vykazují při opakovaném měření poměrně značnou přesnost. Střední aritmetická odchylka profilu nám neumožňuje udělat si představu o tom, jak povrch vytvořený technologickou operací skutečně vypadá. Udává pouze střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry profilu. [13]

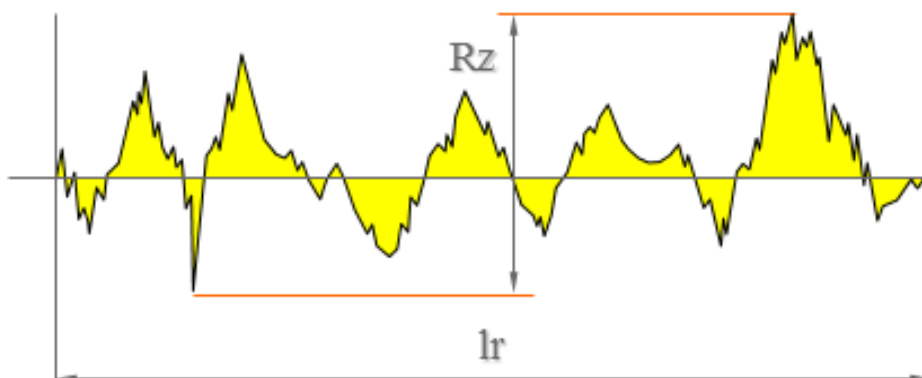


Obr. 26. Vyjádření hodnoty Ra . [15]

Největší výška profilu drsnosti Rz

Je součet největší výšky Z_p a nejnižší hloubky Z_v v rozsahu základní délky. [13]

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5} \quad (3)$$

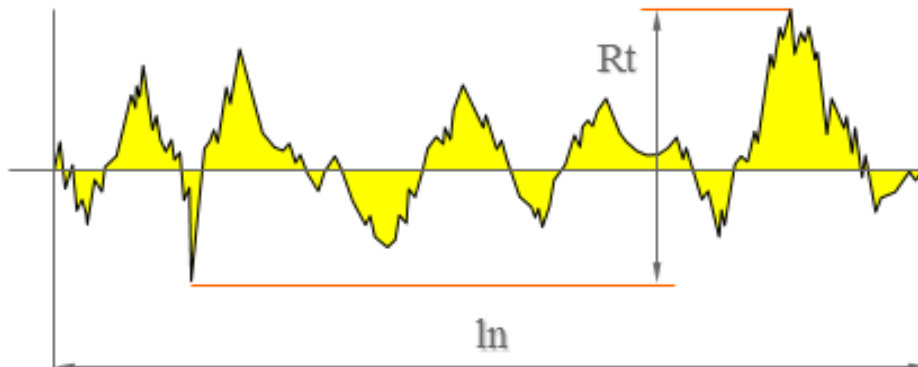


Obr. 27. Vyjádření hodnoty Rz . [15]

Celková výška profilu R_t

Celková výška profilu je součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky l_n . [21]

$$R_t = \sqrt{\frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad (4)$$



Obr. 28. Vyjádření hodnoty R_t . [15]

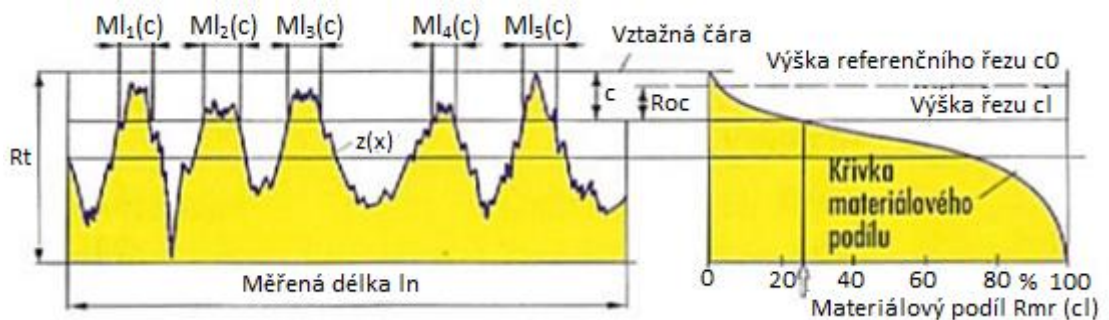
2) Plošné a objemové parametry

- **Rmr** – Nosný poměr v dané hloubce
- **Rdc** – Výškový rozdíl řezů povrchem
- **Rmvr** – Střední hodnota poměru nezaplňného objemu
- **Rmmr** – Střední hodnota poměru materiálového objemu

Materiálový poměr profilu Rmr

Materiálový poměr profilu je poměr délky materiálu elementů profilu drsnosti $MI(c)$ na dané úrovni c k vyhodnocované délce, při kterém platí: [21]

$$Rmr(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^n MI_i(c) = \frac{MI(c)}{l_n} \quad (5)$$



Obr. 29. Křivka materiálového podílu drsnosti povrchu. [26]

3) Hybridní parametry

Hodnocení textury, které charakterizují spojení kritérií amplitudových s prostorovými, jako jsou sklony, zakřivení atd. [13]

- **Sdq** - Kvadratický sklon povrchu
- **Ssc** – Aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu
- **Sdr** – Poměrná rozvinutá styková plocha

4) Funkční parametry

Nazývají se také parametry nosného podílu. Jsou skupinou parametrů charakterizující funkční aspekty povrchu, především mazání a broušení. Jsou speciálně určeny kontrole v automobilovém průmyslu. [13]

- **Sk** – Hloubka drsnosti jádra
- **Spk** – Výška výstupků drsnosti
- **Svk** – Hloubka drsnosti prohloubení
- **Sr1** – Horní materiálový poměr
- **Sr2** – Dolní materiálový poměr [3]

4.1.2 Geometrická přesnost

Geometrická přesnost je určena odchylkami tvaru, jedná se zejména o souosost, kruhovitost, válcovitost, kolmost. S vlnitostí povrchu mohou souviset textury, na které je nanesena (vytvořena) drsnost. To může být způsobeno chvěním, deformací obrobku a zpevněním materiálu. Vlnitost může způsobovat vliv stroje, např. nevyváženost broušícího kotouče, nepřesnost vodících částí nebo malá tuhost. [15]

Odstranění minimální vlnitosti je třeba hledat ve volbě vhodného brusného kotouče, jeho tvrdosti a zrnitosti. Brusný kotouč i při jemném orovnění si musí zachovat řezivost a jeho povrch nesmí být uhlazený. Tam, kde požadujeme především vysokou kvalitu broušeného povrchu (vlnitost, drsnost povrchu, vzhledová bezzávadnost) je vhodné volit kluzné, případně kombinované vedení brusného vřeteníku. [15]

4.1.3 Vlnitost

Velký význam drsnosti povrchu má také vlnitost, která je souhrnem periodických a neperiodických výstupků a prohlubenin. Tvoření vln při broušení na čisto je nejvíce ovlivněno pracovními pohyby obrobku, brousícího vřeteníku kotouče a jeho tvarovou úchylkou (neokrouhlostí, ovalitou). Velký vliv má i poměr obvodových rychlostí kotouče a obrobku, jejich velikosti, počet záběrů kotouče a fázový posun vln při dalších průchodech kotouče. Pokud se v jistém intervalu zvětší obvodová rychlost brousícího kotouče, zintenzivní se chvění technologické soustavy, čímž se omezuje možnost snižovat velikost vlnitosti. [21]



Obr. 30. Povrch s krátkou vlnovou délkou nerovnosti umístěn na dlouhou vlnovou délku. [26]

4.2 Metody hodnocení jakosti povrchu

Jakost je složitá vlastnost. Lze ji považovat za soubor vlastností, které se od sebe liší věcně a hodnotí se také odlišnými způsoby. Pro popis (charakterizování) jakosti se používají jednodušší prostředky – znaky jakosti. Teprve na jejich základě můžeme jakost popsat neboli usuzovat, zda je jakost produktu (objektu, entity) taková, jaká je potřebná pro daný účel, jaká byla požadovaná a specifikována, zda splňuje představu, předpoklady, očekávání, přání. [17]

Nerovnosti na povrchu, které vznikají po libovolné technologické operaci, představují prostorový útvar, který lze velmi obtížně posuzovat. Problém hodnocení nerovnosti povrchu (drsnosti) je obvykle řešen redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu je získán profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování textury povrchu. Existují také metody pro 3D hodnocení textury povrchu a to zejména při použití bezdotykového hodnocení drsnosti povrchu.[17]

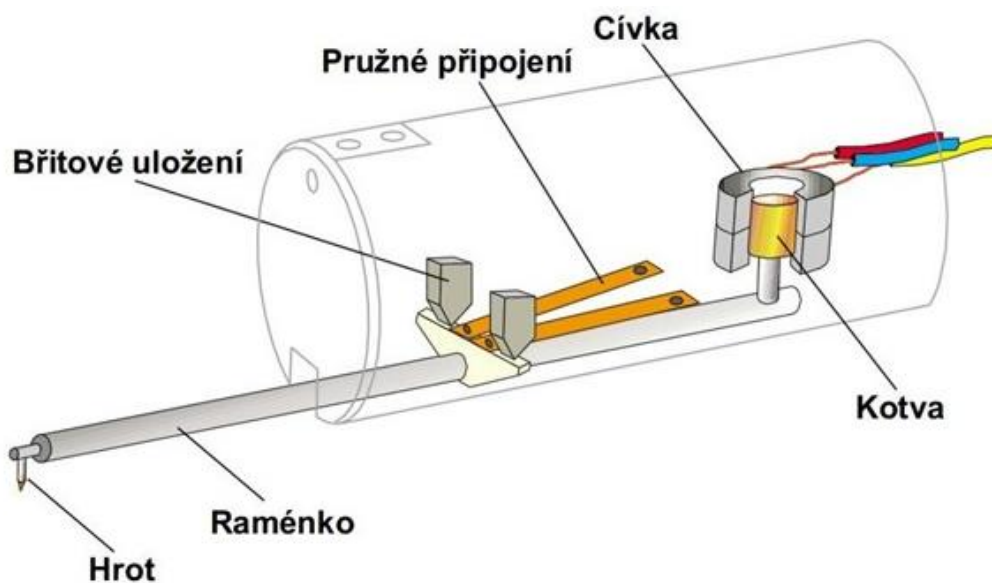
Metody měření se rozdělují podle způsobu zjišťování měřené veličiny na:

- Kontaktní (dotykové)
- Bezkontaktní (bezdotykové)

4.2.1 Dotykové měření jakosti povrchu

Pro praktické zjišťování hodnot charakteristik drsnosti povrchu existuje řada metod, z nichž nejpoužívanější je metoda dotyková. Tato metoda užívá ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu a umožňuje získat informaci o jeho profilu – viz Obr. 31.

Metoda umožňuje zjišťovat číselné hodnoty normalizovaných i nenormalizovaných charakteristik drsnosti povrchu a lze ji využít i pro moderní statistická a spektrální hodnocení textury povrchu. [17]

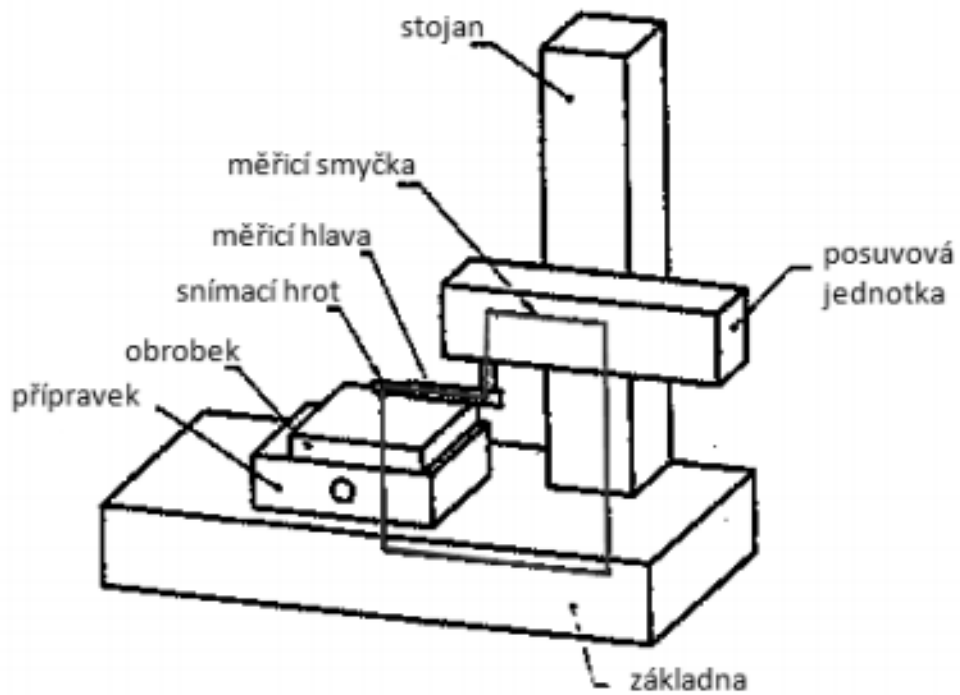


Obr. 31. Indukční snímač. [15]

Realizaci metody zabezpečuje dotykový profilometr, který se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanický signál, generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy, je v indukčním převodníku transformován na signál elektrický, který je dále zpracováván a interpretován jako číselná hodnota zvolené charakteristiky drsnosti povrchu, případně jako grafický záznam profilu nerovnosti daného povrchu. [17]

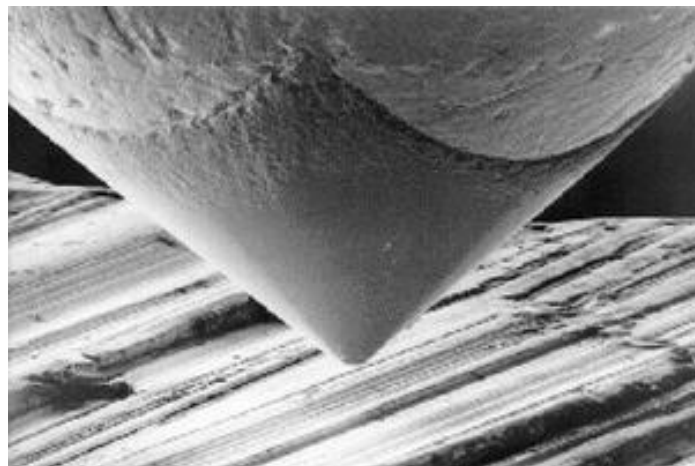
Pro praktické měření hodnot parametrů drsnosti povrchu je nezbytné správně volit základní délku (hodnotu cut-off u dotykového profilometru) tak, aby zahrnovala dostatečný počet nerovností profilu charakterizujících jeho drsnost a vyloučila ovlivnění nerovnostmi s větší roztečí – vlnovou délkou, která nepřísluší drsnosti. [17]

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. [17]



Obr. 32. Měřicí smyčka. [15]

Jako snímací hrot je využíván diamantový měřicí hrot ve tvaru kužele, který lze vidět na Obr. 33. Vrchol kuželu svírá úhel 90° nebo 60° a je zaoblen na 2, 5 nebo $10\ \mu\text{m}$. Měřicí síla se pohybuje v rozmezí 0,6–2 mN. [18]



Obr. 33. Diamantový měřicí hrot. [15]

Mezi výhody 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. [15]

4.2.2 Bezdotykové měření jakosti povrchu

Prostorové měření a hodnocení profilu povrchu přináší velmi cenné a prakticky využitelné informace o vztazích mezi geometrickou charakteristikou povrchu a jeho funkčními vlastnostmi. [16]

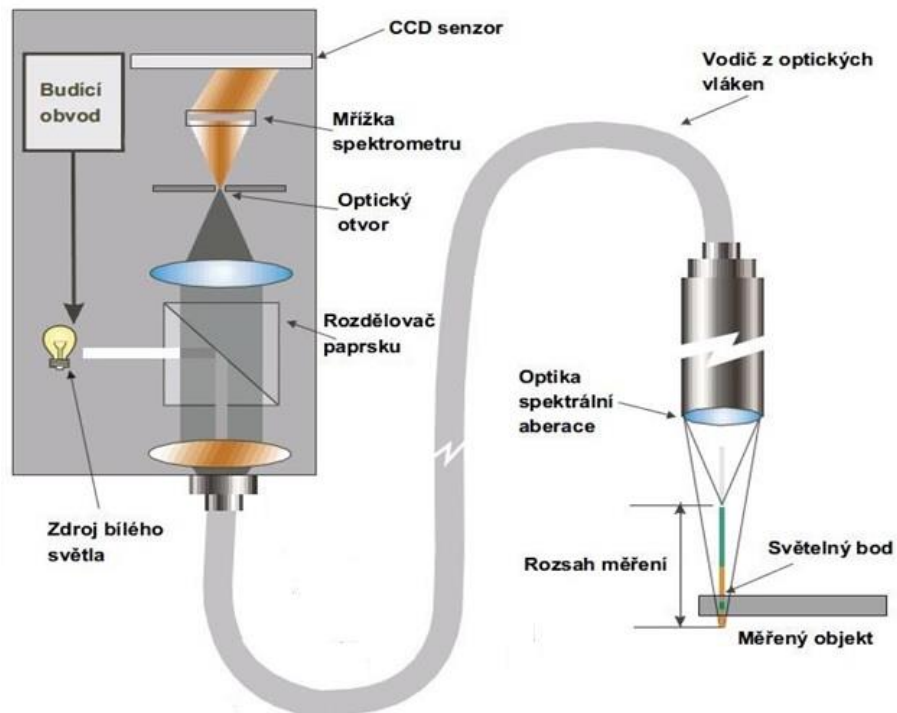
Progresivní měřicí přístroje uplatňují ve větší míře bezdotykové způsoby snímání povrchu, především optické, a využívají přesnější a výkonnější pohybové i náhonové uzly. Profil povrchu je snímán výrazně rychleji v porovnání s klasickými metodami a popis textury je získán s podstatně větším počtem datových údajů. Programové zabezpečení se soustřeďuje nejen na přípravu a provedení vlastního měření, ale především na zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot. [16]

K bezdotykovému měření povrchu se nejčastěji využívá:

- CLA snímač
- Laserový snímač
- Mikroskopy
- Metoda AFM

CLA snímač

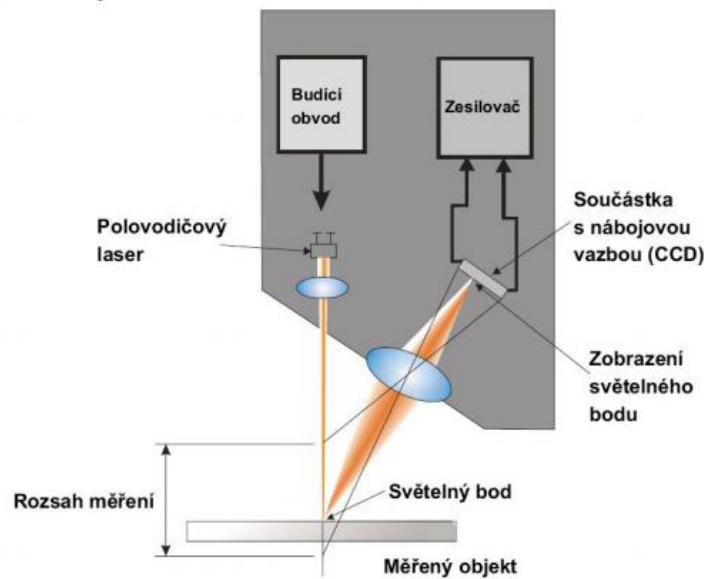
Princip CLA snímače znázorněného na Obr. 34. spočívá v rozkladu bílého světla, které prochází optikou se spektrální aberací, přes kterou je dále směřováno na kontrolovaný povrch. Rozložení světla je provedeno dle vlnových délek a v každém bodě povrchu dochází k zaostření pouze určité vlnové délky. Světlo, 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. [18]



Obr. 34. CLA snímač. [15]

Laserový snímač

Úprava povrchu struktury pomocí laserového snímače je bezkontaktní metoda rychlého snímání. Polovodičový laserový paprsek se odráží od měřeného povrchu do přijímacího optického systému. Odražený paprsek je zaostřován na CCD (Charge Coupled Device) snímacím poli. CCD zajišťuje kvalitní hodnotu rozdělení množství světla v bodě zobrazení paprsku. CCD obrazové prvky na ploše bodu paprsku určují přesné polohy zaměřeného bodu. Paprsek odražený od povrchu se mění s povrchovou texturou a přináší různé rozptylové modely. Velké rozptylování světla ovlivňuje především poškrábání na obrobeném povrchu díky nástroji. Je schopen zaznamenat rozdíly mezi podélnou a příčnou drsností. [15]



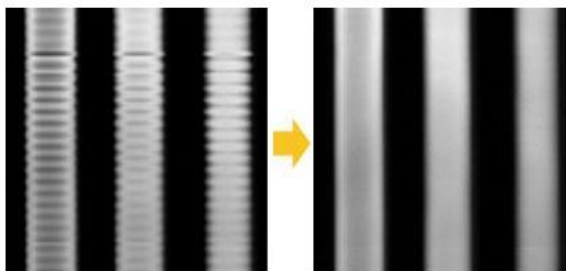
Obr. 35. Laserový snímač. [15]

Výhody bezkontaktní měřicí metody

- Vysoká rychlost a obousměrné snímání povrchu
- Bezkontaktní měřicí metody nejsou tolik náchylné na opotřebení a poškození
- Možnost měřit měkké, pružné, adhezní a citlivé materiály
- Oblasti, které se vymykají měřenému rozsahu přístroje, jako šikmé hrany, lze bezpečně přejít
- Odstraňuje vliv velikosti hrotu na měření, kdy paprsek je 10 krát menší než rozměr hrotu [15]

Nevýhody bezkontaktní měřicí metody

- Při měření může dojít k nežádoucí tzv. ztrátě dat. Tento problém nastane v hraničních oblastech nebo v místě s náhlou změnou profilu. Paprsek se neodrazí správně zpět do detektoru a data se nezaznamenají. Dodávaný software je schopný některé chyby napravit vhodnou interpolací okolních dat. [15]
- Výsledek měření ovlivňuje okolní prostředí. Největší vliv má nežádoucí okolní světlo a vibrace. Vliv okolního světla se opraví pomocí úprav rovnic v softwaru přístroje a nežádoucím vibracím zamezuje hybridní tlumící mechanismus. Ten se skládá z vinutých pružin a tlumících gum, jak lze vidět na Obr. 36. [15]



Obr. 36. Vliv snížení vibrací pomocí vibroizolačního mechanismu. [26]

Mikroskopy

Jedná se o ruční přístroje, které mají řadu možností využití a dokáží se díky svému systému přizpůsobit potřebám specifických uživatelů. Lze je použít např. pro kontrolu jakosti povrchů, analýzu materiálu nebo pro výzkum nových materiálů. [22]



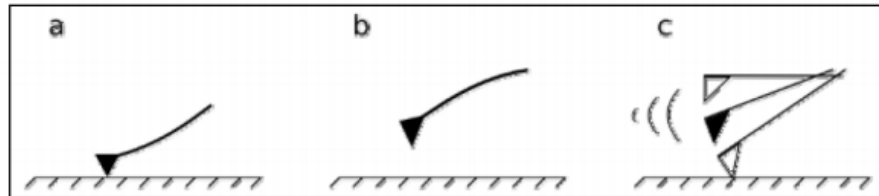
Obr. 37. Mikroskop Leica DMI3000 M. [22]

Metoda AFM

Mikroskopie atomárních sil AFM (Atomic force microscopy) je mikroskopická technika, která se používá k trojrozměrnému zobrazení povrchů. Obraz povrchu je sestavován postupně, bod po bodu. Metoda dosahuje velmi vysoké rozlišitelnosti – nejedná se o klasický mikroskop. AFM metoda je založena na snímání sil, které vznikají mezi hrotem a vzorkem. Základem AFM je velmi ostrý hrot, který je upevněn na ohebném nosníku. Působí na sebe především skrze Van der Waalsovu a elektrostatickou sílu. AFM mikroskopie bývá relativně malým a kompaktním zařízením.[22]

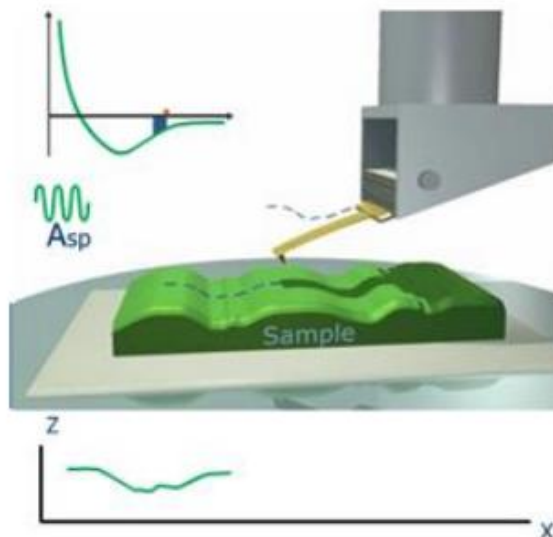
Režim snímání povrchu metodou AFM:

- Kontaktní
- Bezkontaktní
- Poklepový



Obr. 38. AFM schéma metod. [26]

Používají se především bezkontaktní režimy, v nichž není mezi hrotem a vzorkem přímý mechanický kontakt. Nosník s hrotem se pohybuje nad povrchem vzorku ve vzdálenostech jednotek až desítek nanometrů. K detekci slouží změny rezonanční frekvence nebo využití amplitudy kmitání nosníku v závislosti na vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem. U bezkontaktní metody se používají mnohem tvrdší nosníky než u režimu kontaktního. Při měření se hrot pohybuje v oblasti přitažlivých sil, dochází k mírnému snížení rozlišení, ale nedochází k poškození vzorku působením hrotu ani ke kontaminaci vzorku. [22]



Obr. 39. AFM bezkontaktní režim. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce byl výzkum vlivu nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních výrobků a objevení hranice, za níž již není další vylepšení povrchu formy žádoucí a efektivní, tedy neprojeví se na jakosti výrobku a pouze navyšuje náklady a čas. Pro výzkum byly použity polymerní materiály amorfni struktury (PMMA, PC) a semikrystalické struktury (PA66, PP). Důvodem tohoto výběru byla především jejich rozdílnost v uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhém stavu.

Postup při řešení diplomové práce:

- Návrh a výroba tvarových vložek vstřikovací formy s odlišnou a předem definovanou jakostí povrchu
- Volba a testování vybraných polymerních materiálů
- Měření drsnosti povrchu tvarových dutin vstřikovací formy
- Výroba vstřikovaných vzorků při předem definovaných podmínkách
- Měření krystalického podílu semikrystalických polymerních materiálů
- Měření drsnosti povrchu polymerních výrobků
- Statistické vyhodnocení naměřených dat experimentu

6 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE

6.1 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470H 1000-400

Výroba zkušebních vzorků probíhala v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství za použití vstřikovacího stroje značky Arburg, typu Allrounder 470H 1000-400, který lze vidět na Obr. 40. Vstřikovací stroj je určený pro výrobu z termoplastů.



Obr. 40. Vstřikovací stroj Arburg Allround 470H.

Tab. 2. Základní vlastnosti vstřikovacího stroje.

Vlastnosti vstřikovacího stroje	
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 vstřikovací 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]

Zkušební vzorky polymerních materiálů (PP, PA 66, PMMA, PC) se vstříkovaly za daných technologických podmínek:

Tab. 3. Technologické podmínky vstřikování.

Parametry	PP	PA66	PMMA	PC
Vstřikovací tlak [MPa]	60	60	60	60
Velikost dotlaku [MPa]	60	60	60	60
Vstřikovací rychlost [mm.s ⁻¹]	70	70	70	70
Doba chlazení [s]	30	30	30	30
Dráha dávkování [mm]	18	18	18	18
Dráha přepnutí [mm]	8	8	8	8
Uzavírací síla [kN]	1000	1000	1000	1000
Doba dotlaku [s]	10	10	10	10
Doba vstřikování [s]	0,21	0,21	0,21	0,21
Doba cyklu [s]	56	56	56	56
Teplota pod násypkou [°C]	40	40	40	40
Teplota zóny 2 [°C]	140	245	230	220
Teplota zóny 3 [°C]	150	255	240	230
Teplota zóny 4 [°C]	160	265	250	240
Teplota zóny 5 [°C]	170	275	255	250
Teplota zóny 6 [°C]	180	285	260	260
Teplota trysky [°C]	190	300	275	270
Teplota sušení [°C]	50	80	80	120
Doba sušení [hod.]	3	10	6	16

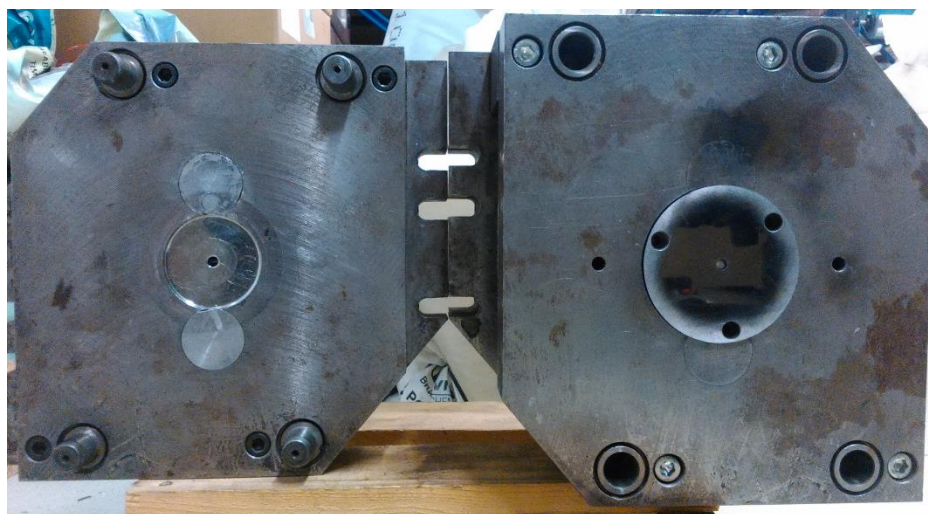
6.2 Vstřikovací forma

Pro výrobu zkušebních vzorků je potřeba nejen vstřikovací stroj, ale také vstřikovací forma (Obr. 41), která byla zkonstruována tak, aby bylo možné měnit tvarové dutiny.



Obr. 41. Vstřikovací forma.

Forma je jednonásobná s kuželovým vtokem. Jelikož tvarová dutina zároveň sloužila jako stírací deska, bylo možné po otevření formy dutinu vysunout z dělicí roviny a tím usnadnit a zrychlit výměnu tvarové dutiny. Na Obr. 42. lze vidět rozevřenou vstřikovací formu, kde v levé části je tvárnice a v pravé tvárník.



Obr. 42. Vstřikovací forma tvárníku a tvárnice.

6.3 Sušička granulátu Arburg Thermolift

Mnoho polymerních materiálů je hydrofilních. Z tohoto důvodu bylo nutné materiály určené pro výrobu zkušebních vzorků sušit. Sušicí doba se u většiny polymerních materiálů liší. Polyamid (PA66) se sušil při teplotě 80°C, po dobu 10 hodin. Polymethylmethakrylát (PMMA) se sušil při stejné teplotě jako PA66, doba sušení však probíhala 6 hodin. Polymerní materiál PP se sušil při teplotě 50°C po dobu 3 hodin. Polykarbonát (PC) se sušil nejvyšší teplotou (120 °C) a po nejdelší dobu (16 hodin). Granulát musí být dostatečně vysušen, aby se v tavenině nevytvářely vodní páry a bubliny. Ty pak ve snaze vyrovnat tlak praskají a jsou postupujícím čelem toku taveniny ochlazovány na stěnách nástroje. Další vadou, která se může objevovat jsou vlhkostní šmouhy ve tvaru U. Sušení granulátu probíhalo v sušičce Arburg Thermolift 100-2, která je znázorněna na Obr. 43.



Obr. 43. Sušička Arburg Thermolift 100-2.

Sušička pracuje jak s přívodem čerstvého vzduchu, tak s recirkulací vzduchu. Do vstřikovacího stroje je možné dodávat kontinuálně granulát, ale při sušení PA66, PMMA a PC nebyla tato možnost využita. Stroj je ovládán pomocí řídicí jednotky Selogica, která může být dle přání uživatele naprogramována na samostatné spuštění a ukončení procesu sušení.

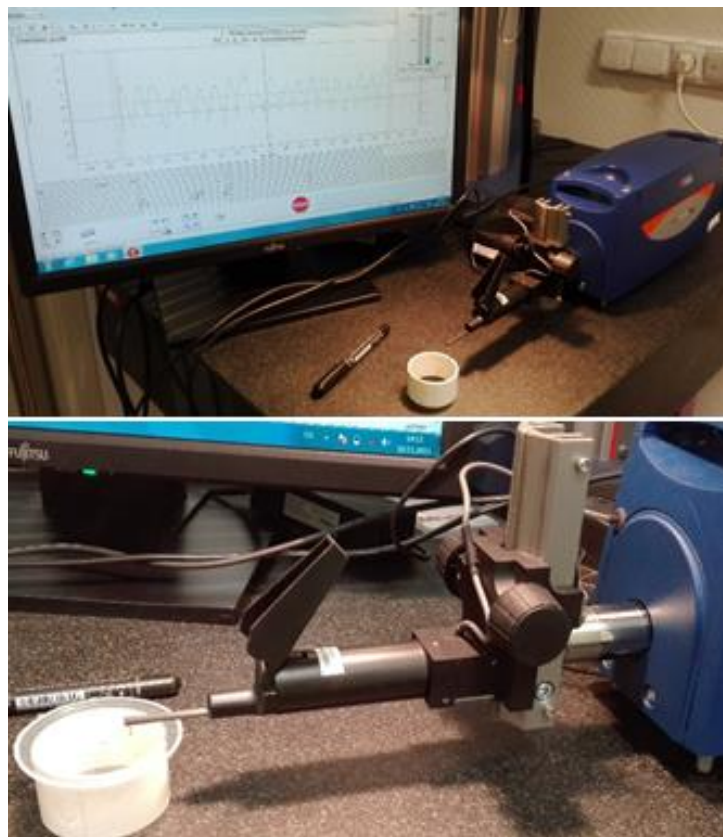
Vlastnosti stroje lze vidět v následující Tab. 4.

Tab. 4. Základní vlastnosti sušičky.

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

6.4 Profiloměr Taylor Hobson Form Talysurf 50

Přístroj Taylor Hobson Form Talysurf 50, který lze vidět na Obr. 44. byl použit při měření drsnosti i tvarových dutin. Profiloměrem lze měřit základní parametry drsnosti (R_a , R_z , apod.) a také vlnitosti, analýzy úchylek tvaru, které měří a vyhodnocuje poloměry, úhly, sklony a rozměry. Form Talysurf 50 má horizontální délky snímání 50mm.



Obr. 44. Měření drsností pomocí profiloměru Taylor Hobson.

Technické parametry profiloměru Taylor Hobson Form Talysurf 50 lze vidět v Tab. 5.

Tab. 5. Technické parametry profiloměru Taylor Hobson.

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

6.5 Rentgenový difraktometr X'Pert PRO

Metoda Rentgenové difrakční analýzy (mineralogická analýza, prášková difrakce) je určena především pro měření pevných vzorků (speciální oblastí je možnost studia transformací z pevného do kapalné fáze za vysokých teplot) a je schopna stanovit, zda je vzorek amorfni či krystalický. V případě krystalických vzorků je schopna stanovit přítomnost cca 365.877 krystalických fází porovnáním naměřených dat s databází PDF-4.

Metoda Rentgenové monokrystalové difrakce je určena pro stanovení molekulové a krystalové struktury, především organických látek. Vhodný monokrystal by měl mít velikost v rozmezí 0,1-1 mm. Větší krystaly je nutno opracovat, menší krystaly mohou vydávat příliš slabý signál. Posouzení vhodnosti monokrystalů je prováděno pomocí polarizačního mikroskopu.



Obr. 45. Rentgenový difraktometr X'Pert PRO od firmy PANalytical (Holandsko).

Rentgenový difraktometr představuje standartní techniku pro identifikaci fází, kvantitativní fázovou analýzu, analýzu krystalové struktury, velikost částic a stanovení napětí, non-ambient měření (vysoká teplota, vysoká vlhkost, přítomnost reakčních plynů) pro in-situ pozorování reakcí a vlastností při daných podmínkách.

Tab. 6. Technické parametry Rentgenového difraktometru X'Pert PRO, PANalytical.

Vlastnosti	Parametry
Zařízení	CuK α
Rozsah 2 Θ	0-150°
Typ detektoru	Vysokorychlostní polovodičový X' Celerator
Provozní režimy	Odrazová parafokusní (Bragg-Brentano) geometrie, transmise na plochých vzorcích Transmise ve skleněné kapiláře (Debye-Scherrer geometrie)
Rozsah teplot	Pokožová až 900 °C (reakční komora Anton Paar XRK900)
Optika	Měnitelné rozbíhavé a anti-rozptylové štěrby, Primární paprsek – hybridní monochromátor, Kolimátor 0.02 rad
Dostupný software	X'Pert Data Collector a High Score Plus
Databáze	PDF-4, ICSD

7 POUŽITÉ MATERIÁLY

7.1 Materiál tvarových dutin

Pro zjištění vlivu materiálu vstřikovací formy, při kopírování jakosti povrchu z tvarové dutiny na polymerní výrobek se použil materiál oceli třídy 19.

7.1.1 Ocel EN 1.2343 (ČSN 19 552)

Materiál oceli EN 1.2343 (ČSN 19 552) je chrom-molybden-křemíková středně legovaná ocel určená ke kalení v oleji a na vzduchu s velice dobrou prokalitelností. Vyznačuje se vysokou pevností za tepla, odolností proti popouštění, velice dobrou houževnatostí a plastickými vlastnostmi při normálních i zvýšených teplotách. Nástrojová ocel má také velmi dobrou odolnost proti vzniku trhlin tepelné únavy a malou citlivost na prudké změny teploty. Vyznačuje se dobrou tvárností za tepla a dobrou obrobitelností ve stavu žíhaném na měkko. Chemické složení a tepelné zpracování oceli EN 1.2343 je uvedeno v následujících tabulkách:

Tab. 7. Chemické složení oceli EN 1.2343.

Značka oceli	Chemické složení v %								Tvrdost ve stavu	
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P max.	S max.	Žíh. na měkko HB max.	HRC min.
ČSN 19 552	0,32-0,42	0,2-0,5	0,8-1,2	4,5-5,5	1,1-1,6	0,35-0,6	0,03	0,03	240	50

Tab. 8. Tepelné zpracování oceli EN 1.2343.

Způsob	Teplota [°C]	Postup
Kování	850-1110	Pomalou ochlazovat v suchém popelu nebo silné průřezy v peci
Žíhání na měkko	760-780	Několik hodin prohřát (podle velikosti předmětu), většinou stačí 4 hod. a pomalu ochlazovat v peci
Žíhání ke snížení pnutí	600-650	1 až 2 hod. prohřát a pomalu ochlazovat
Kalení v oleji nebo na vzduchu	1000-1030	Mensí a jednodušší nástroje ochlazovat v oleji asi do 100 °C, větší a členitější nástroje je lepší ochlazovat na vzduchu
Popuštění	550-650	Ochlazovat na vzduchu, stupeň popuštění se řídí tvrdostí a houževnatostí nástroje dle popuštěcího diagramu

Nástrojová ocel se používá pro formy na pevné i pohyblivé díly jádra či jiné části forem pro tlakové lití slitin hliníku a velké série odlitků slitin zinku a hořčíku. Je využitelná na nástroje pro tváření za tepla (velmi namáhané malé a středně velké zápustky a vložky zápustek), ale také pro lisovací matrice, trny, čelisti, šneky pro zpracování umělých hmot, nitridované vyhazovače a razníky s vysokou pevností přes 1800N/mm² chlazené vodou. Dále na silně namáhané průtlačníky a další pomocné nástroje pro protlačování neželezných kovů za tepla, průtlačnice na hliník a jeho slitiny. Využit se dá i pro nástroje pro stříhání za tepla (např. malé a středně velké nože nůžek, ostříhovací matrice a prostříhovací trny). [23]

Tab. 9. Fyzikální vlastnosti oceli EN 1.2343.

Vlastnosti	Hodnota
Modul pružnosti E při 20°C	215 000 Mpa
Hustota	7850 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita při teplotě 20°C	460 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Tepelná vodivost při teplotě 20°C	25 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Teplotní vodivost	0,05 m ² /s
Mez pevnosti Rm po zušlechtní	1200 MPa
Součinitel teplotní vodivosti při teplotě 20°C	6,97.10 ⁻⁶

7.2 Polymerní materiály

Ke vstřikování zkušebních vzorků byly vybrány dva amorfnní a dva semikrystalické materiály, přičemž jeden z nich měl mít vyšší obsah krystalické fáze. Jako amorfnní materiály byly zvoleny PC, PMMA a semikrystalické materiály byly vybrány PA66 a PP.

7.2.1 PC Calibre 303EP

Polykarbonáty jsou obecně polyestery kyseliny uhličitě a dihydroxysloučenin. Mají hlavně výborné mechanické a dielektrické vlastnosti. Jsou konstantní v neobvykle širokém rozmezí teplot (od -70 °C do 140 °C), dále vynikají malou nasákavostí a povětrnostní odolností. Tyto vlastnosti jsou spojeny s rozměrovou stabilitou, chemickou odolností a snadnou zpracovatelností. [8]

Jedná se o plasty fyziologicky nezávadné, bez chuti a zápachu. S výjimkou methylenchloridu jsou dobře rozpustné v řadě dalších chlorovaných uhlovodíků a v cyklohexanonu, ale jen ztěžka se rozpouštějí v aromatických uhlovodících, esterech a ketonech. Mají dobré elektroizolační vlastnosti, odolávají ultrafialovému záření, oxidaci do 120 °C, dlou-

hodobému působení vody, páry, amoniaku, aminů, alifatických uhlovodíků, alkoholů, zředěným roztokům kyselin a solí. Vysokou houževnatost si udržují až do velmi nízkých teplot. [8]

Tab. 10. Vlastnosti PC CALIBRE™ 303EP-22.

Vlastnosti, podmínky měření	Měřeno dle normy	Jednotka	Hodnota
Hustota (23 °C)	ISO 1183/B	g.cm ⁻³	1,2
Mez pevnosti v tahu (50 mm.min ⁻¹)	ISO 527-2/50	MPa	60
Modul pružnosti v tahu (1mm.min ⁻¹)	ISO 527-2/50	MPa	2300
HDT - teplota deformace (1,81 MPa)	ISO 75-2/A	°C	122

Používá se především na výrobu ochranných krytů a nosných těles. Největší množství polykarbonátu je využíváno ve stavebnictví pro veškeré ploché i obloukové zasklívání (zastřešení teras, vnitřních stropů, světlíků a světelných pásů), dále zimních zahrad a skleníků, městského mobiliáře a také na výrobu protihlukových stěn. Dále se uplatňuje při výrobě elektrických přístrojů a zařízení, jako jsou pláště mobilních telefonů, počítačů, přístrojů pro domácnost, krytů svítidel a podobně. Vynikající nárazová odolnost polykarbonátu chrání přístroje před poškozením. [8]

7.2.2 PMMA Pexiglas 8N

Nejcharakterističtější vlastností polymethylmethakrylátu je jeho čírost a naprostá bezbarvost i ve velmi silných vrstvách. Tato vlastnost zůstává prakticky neměnná po dlouhá léta používání, a to i v náročných klimatických podmínkách (např. v tropických). Propustnost světla je kolem 92 % v celém spektru, včetně blízké ultrafialové oblasti. PMMA Pexiglas 8N vykazuje také tzv. tvarovou paměť. Projevuje se např. vrácením vytvarované desky do původního stavu po jejím zahřátí na teplotu tvarování nebo vyšší. Polymethylmethakrylát má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolává vodě, zředěným alkáliím a kyselinám. Neodolává však koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům. Rozpouští se v aromatických a chlorovaných uhlovodících, esterech, ketonech a eherech. Dá se dobře mechanicky obrábět. Tepelná odolnost bez zatížení je kolem 80 °C. Jeho nedostatkem je nízká povrchová tvrdost. [8]

Tab. 11. Vlastnosti PMMA PEXIGLAS 8N

Vlastnosti, podmínky měření	Měřeno dle normy	Jednotka	Hodnota
Hustota (23 °C)	ISO 1183	g.cm ⁻³	1,19
Mez pevnosti v tahu (5 mm.min ⁻¹)	ISO 527	MPa	77
Modul pružnosti v tahu (1mm.min ⁻¹)	ISO 527	MPa	3300
HDT - teplota deformace (1,81 MPa)	ISO 75	°C	98

Využití polymethylmethakrylátu je velmi široké. Používá se např. ve stavebnictví, ve spotřebním průmyslu, v lékařství, optice, elektrotechnice a elektronice, bižuterii atd. Blokovaný polymethylmethakrylát je relativně drahý plast a jeho využití je namísto tam, kde se uplatní jeho vlastnosti – např. při zasklívání oken dopravních prostředků, při výrobě krytů přístrojů, kancelářských potřeb, hodinkových sklíček apod. [8]

7.2.3 PP Syntegum 1020 AFV/HMFL

Polypropylen patří do skupiny polyolefinů. Má semikrystalickou nadmolekulární strukturu. Vzhledem ke stupni krystalinity dosahujícímu 60 % až 75 % je však neprůhledný. Teplota tání čistého izotaktického polypropylenu je 176 °C, u obchodních produktů v rozmezí od 160 °C do 170 °C. Kromě vyšší teploty měknutí a tím i použitelnosti při vyšších teplotách se polypropylen liší od lineárního polyethylenu nižší hustotou a menší odolností vůči mrazu, oxidaci a povětrnosti. Na druhou stranu vyniká větší pevností, tvrdostí a odolností vůči oděru. Je také méně propustný pro plyny a páry. Je odolný vůči chemikáliím, zvláště při zvýšených teplotách. Rozpouští se při teplotách nad 80 °C v aromatických a chlorovaných uhlovodících. Minerální a rostlinné oleje absorbuje polypropylen jen nepatrně, beze změny mechanických vlastností. Přehled základních vlastností je uveden v Tab. 12. [8]

Tab. 12. Vlastnosti PP SYNTEGUM 1020 AFV/HMFL.

Vlastnosti, podmínky měření	Měřeno dle normy	Jednotka	Hodnota
Hustota (23 °C)	ISO 1183	g.cm ⁻³	1,04
Mez pevnosti v tahu (50 mm.min ⁻¹)	ISO 527	MPa	65
Mez pevnosti v ohybu	ISO 178	N.mm ⁻²	100
HDT - teplota deformace (1,81 MPa)	ISO 75	°C	127

Vzhledem k lepším mechanickým vlastnostem se polypropylen více využívá pro výrobu součástí strojů, přístrojů či v automobilovém a spotřebním průmyslu (vstřikované dílce přístrojových desek a ventilátorů, nárazníky, součásti vysavačů, kuchyňských přístrojů). Odolnost vůči sterilizačním teplotám umožňuje jeho použití ve zdravotnictví. [8]

7.2.4 PA66 Technyl A 205F

Charakteristickým rysem alkalického polyamidu je vysoká hodnota polymeračního stupně (300 až 500). Polyamidy obsahují relativně velký podíl vody, který se v závislosti na typu a oblasti užití může dle relativní vlhkosti vzduchu měnit. Pouze s určitou vlhkostí si polyamidy zachovávají svou úplnou pružnost, tuhost a rázovou pevnost. Pokud se polyamid dostatečně vysuší, dosáhne tím původní pružnosti. Přidáním krátkých skelných vláken během procesu výroby výrazně zvýší pevnost a tuhost těchto produktů (PA 66). Podíl skelných vláken zvýší i ohebnost a tvarovou stálost při zahřátí. Celkově mají polyamidy malé koeficienty tření a nízký sklon k opotřebení. Přírodní polyamidy jsou bíložluté nebo mléčně bílé. Jsou odolné proti běžným rozpouštědlům (např. aceton, alkohol, benzol), olejům, tukům, všem alkáliím a většině sloučenin kyselin. Polyamidy jsou dostatečně odolné vůči povětrnostním vlivům a stárnutí, ale nejsou odolné vůči koncentrovaným kyselinám. Při vzrůstajícím tepelném zatížení si polyamidy udržují velmi dobrou stálost rozměrů. [8]

Tab. 13. Vlastnosti PA66 TECHNYL A 205F.

Vlastnosti, podmínky měření	Měřeno dle normy	Jednotka	Hodnota
Hustota	ISO 1183-A	g.cm^{-3}	1,14
Mez pevnosti v tahu (50 mm.min^{-1})	ISO 527/1A	MPa	85
Modul pružnosti v tahu (1 mm.min^{-1})	ISO 527/1A	MPa	3200
HDT - teplota deformace (1,81 MPa)	ISO 75-2/A	$^{\circ}\text{C}$	75

Polyamidy se používají v nejrůznějších aplikacích v automobilovém průmyslu, v elektrotechnice a v osvětlovací technice, nacházíme je ve spotřebním a průmyslovém zboží i sportovním vybavení. Dále se používají na ozubená kola, rolny, řemenice, klece kuličkových ložisek, tělesa čerpadel, kluzná ložiska, části kloubů, těsnicí kroužky, oběžné válečky, řídicí válce či kluzné lišty. [8]

8 VÝROBA TVAROVÝCH DUTIN

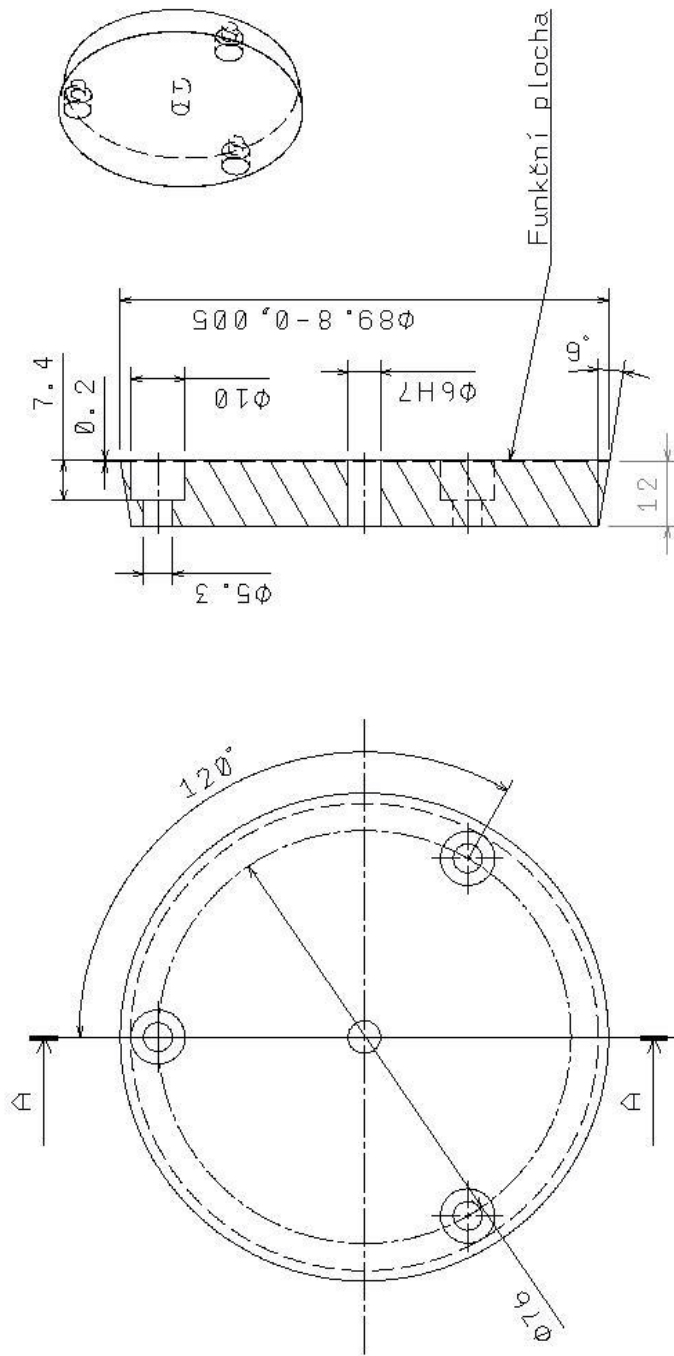
Pro vstřikování zkušebních vzorků, které byly vyráběny z materiálu PC, PMMA, PA66, PP, bylo nutné vyrobit tvarové dutiny. Každá z daných dutin se lišila drsností povrchu Ra a Rz funkční plochy. Celkem bylo vyrobeno 10 tvarových dutin lišících se parametrem drsnosti Ra a Rz funkční plochy, které byly vyrobeny z oceli EN 1.2343.

8.1 Návrh tvarové dutiny

Funkční plocha přichází do styku s vstřikovaným materiálem a má hlavní podíl na drsnosti výstřiku. Každá dutina byla očíslována od 1 do 10, z nichž nejvyšší hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz povrchu měla tvarová dutina s označením 10 a postupně se drsnost Ra a Rz snižovala k tvarové dutině s označením 1, která má nejlepší jakost obrobenej plochy.

Funkční plochy tvarových dutin označením 6 až 10 byly zhotoveny operací soustružení a liší se pouze nastavením technologických podmínek (otáčky, hloubka řezu, přísuv, řezná kapalina). Dutiny s označením 1 až 5 byly také vyráběny operací soustružení, poté však následovaly přesnější dokončovací operace např. broušení, lapování a leštění.

Na každé tvarové dutině byl zhotoven vryp (oblast), který zajistil, že na vyrobených výstřicích byly měřeny parametry drsnosti Ra a Rz stále ve stejném místě a bylo tedy možné vyloučit, že měřené parametry ovlivňovala vzdálenost měřené plochy od místa vtoku. Na Obr. 46. lze vidět výkres tvarové dutiny vstřikovací formy.



DRAWING TITLE		Tvarová dutina	
DRAWN BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER
Bc. Jan Liška	19.7.2013	A4	
CHECKED BY	DATE	SCALE	REV
XXX	XXX	1:1	X
DESIGNED BY	DATE	WEIGHT (kg)	SHEET
XXX	XXX	0,08	1/1

Ra funkční plochy:
 0,005
 0,01
 0,02
 0,03
 0,05
 0,1

Obr. 46. Výkres tvarové dutiny vstřikovaci formy.

8.2 Postup výroby

Výroba tvarových probíhala na soustruhu a frézce, jako dokončovací operace pro některé ze vzorků bylo následně provedeno broušení, lapování a leštění.

Polotovar kruhového průřezu z oceli EN 1.2343 byl na soustruhu upíchnut a obráběn dle dané délky a průměru s přídavkem 1 mm na pozdější zhotovení povrchu funkční plochy. Dále byl na soustruhu polotovar obráběn dle zadaných rozměrů, kdy vnější průměr měřil 89,8 – 0,005 mm s obvodovým zkosením pod úhlem 9° do délky 12,2 mm. Po zarovnání čela na soustruhu byla vyvrtána díra o průměru 6H7. Obrobek byl upevněn na přípravek frézky a byly vyrobeny díry o průměru 3,5 mm s daným zahloubením.



Obr. 47. Ocelová tvarová dutina.

8.3 Dokončovací operace tvarových dutin

Tvarová dutina č. 1

Tab. 14. Technologické podmínky dokončovacích operací.

Metody obrábění	Parametry
Soustruženo s užitím řezné kapaliny	$a_p=0,10$ mm; $f=0,01$ mm/ot; 250 ot/min
Broušeno broušícími hranoly Minimo se zrnitostí	1200; 900; 600
Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna	45 μ m; 25 μ m
Leštěno vatou s pastou Novapax s velikostí zrna	5 μ m; 1 μ m; 0,5 μ m
Celková doba výroby	4 hod.

Tvarová dutina č. 2*Tab. 15. Technologické podmínky dokončovacích operací.*

Metody obrábění	Parametry
Soustruženo s užitím řezné kapaliny	$a_p=0,10$ mm; $f=0,01$ mm/ot; 250 ot/min
Broušeno brousícími kameny se zrnitostí	1200; 900; 600
Lapováno lapovací pastou JOKE Magic o velikosti zrna	15 μ m; 7 μ m
Celková doba výroby	2 hod.

Tvarová dutina č. 3*Tab. 16. Technologické podmínky dokončovacích operací.*

Metody obrábění	parametry
Broušeno s vyjiskřováním a užitím řezné kapaliny	$a_p=0,005$ mm; $v_f=7$ m/min; $v_c=29,4$ m/s
Broušeno brousícím papírem Klingspor P2000 za přítomnosti řezné kapaliny se zrnitostí	2000
Leštěno plstí s leštící pastou Novapax za přítomnosti řezné kapaliny	10 μ m
Celková doba výroby	1 hod.

Tvarová dutina č. 4*Tab. 17. Technologické podmínky dokončovacích operací.*

Metody obrábění	parametry
Broušeno s vyjiskřováním a užitím řezné kapaliny	$a_p=0,005$ mm; $v_f=7$ m/min; $v_c=29,4$ m/s
Leštěno plstí s leštící pastou Novapax. Leštění probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 10 minut	20 μ m
Celková doba výroby	0,5 hod.

Tvarová dutina č. 5*Tab. 18. Technologické podmínky dokončovacích operací.*

Metody obrábění	Parametry
Broušeno s vyjiskřováním a užitím řezné kapaliny	$a_p=0,005$ mm; $v_f=7$ m/min; $v_c=29,4$ m/s
Broušeno broušicím papírem Klingspor P2000 za přítomnosti řezné kapaliny se zrnitostí. Broušení probíhalo na soustruhu při maximálních otáčkách po dobu 5 minut	2000
Celková doba výroby	20 minut

Tvarová dutina č. 6*Tab. 19. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po dobu 10 minut.*

Metody obrábění	Jednotky	Parametry
Axiální šířka záběru a_p	[mm]	0,10
Posuv f	[mm/ot]	0,01
Otáčky n	[1/min]	250
Procesní kapalina	-	MICROTREND 217 M

Tvarová dutina č. 7*Tab. 20. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po dobu 10 minut.*

Metody obrábění	Jednotky	Parametry
Axiální šířka záběru a_p	[mm]	0,10
Posuv f	[mm/ot]	0,04
Otáčky n	[1/min]	125
Procesní kapalina	-	-

Tvarová dutina č. 8*Tab. 21. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po dobu 10 minut.*

Metody obrábění	Jednotky	Parametry
Axiální šířka záběru a_p	[mm]	0,10
Posuv f	[mm/ot]	0,16
Otáčky n	[1/min]	125
Procesní kapalina	-	-

Tvarová dutina č. 9

Tab. 22. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po dobu 10 minut.

Metody obrábění	Jednotky	Parametry
Axiální šířka záběru a_p	[mm]	0,3
Posuv f	[mm/ot]	0,15
Otáčky n	[1/min]	125
Procesní kapalina	-	-

Tvarová dutina č. 10

Tab. 23. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po dobu 10 minut.

Metody obrábění	Jednotky	Parametry
Axiální šířka záběru a_p	[mm]	0,10
Posuv f	[mm/ot]	0,32
Otáčky n	[1/min]	125
Procesní kapalina	-	-

Tab. 24. Vyhodnocená data drsnosti R_a a R_z ocelové dutiny.

číslo dutiny/vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ocelová dutina	R_a [μm]	0,008	0,009	0,04	0,099	0,127	0,2	0,539	1,29	2,908	3,465
	Směr. od.	0,001	0,001	0,007	0,003	0,008	0,01	0,03	0,045	0,037	0,079
	Nej. typu A	0,001	0,001	0,007	0,003	0,009	0,011	0,031	0,047	0,039	0,083
	R_z [μm]	0,081	0,085	0,294	0,72	1,042	1,427	3,761	6,458	11,956	15,73
	Směr. od.	0,016	0,01	0,057	0,05	0,143	0,1	0,316	0,343	0,153	0,517
	Nej. typu A	0,017	0,011	0,06	0,053	0,151	0,106	0,333	0,362	0,162	0,545

9 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Naměřená data byla statisticky zpracována (odhadem středního aritmetického průměru, výběrovou směrodatnou odchylkou a nejistotou typu A. Pro data každé ocelové dutiny i zkušebních vzorků byly vypočítány následující hodnoty ze vztahu:

a) **Odhad středního aritmetického průměru \bar{x} :**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

Kde: \bar{x} – odhad středního aritmetického průměru

x_i – jednotlivé hodnoty měřených veličin

n – počet hodnot (měření)

b) **Směrodatná odchylka výběru:**

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

c) **Nejistota typu A:**

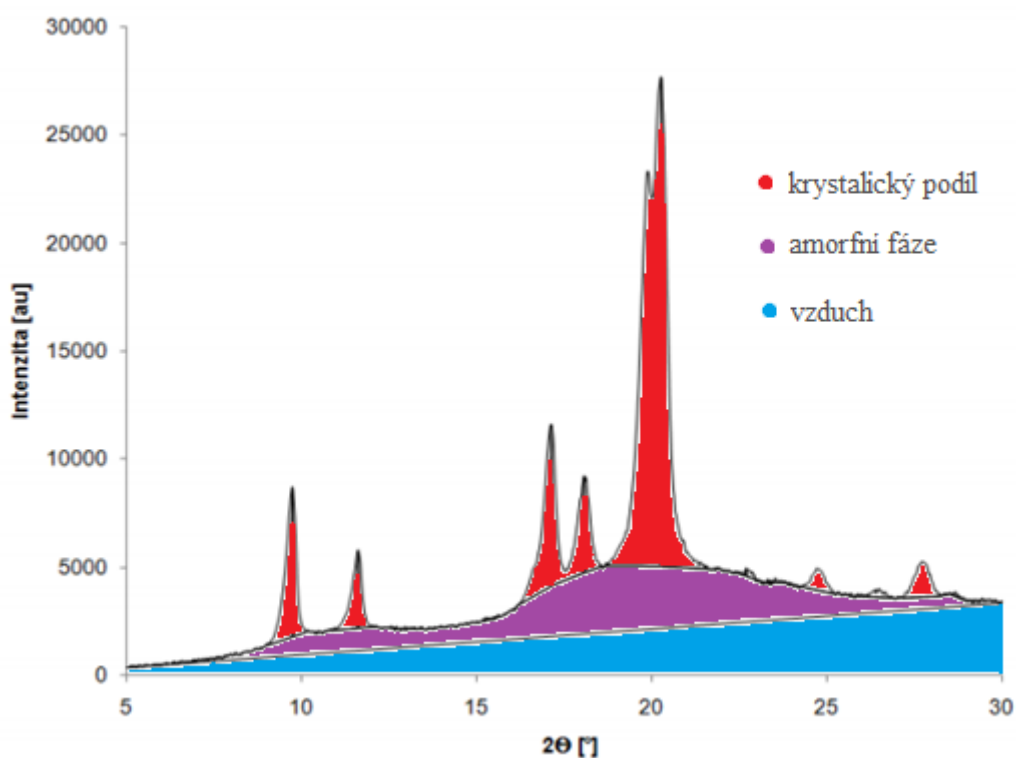
$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

Naměřená data průměrných drsností R_a , R_z a krystalického podílu byly zpracovány v tabulkách. Z výsledných dat se vytvořily grafy, které vyjadřují závislost průměrných drsností R_a a R_z zkušebních vzorků (PC, PMMA, PA66, PP) a tvarové dutiny.

9.1 Hodnocení krystalického podílu

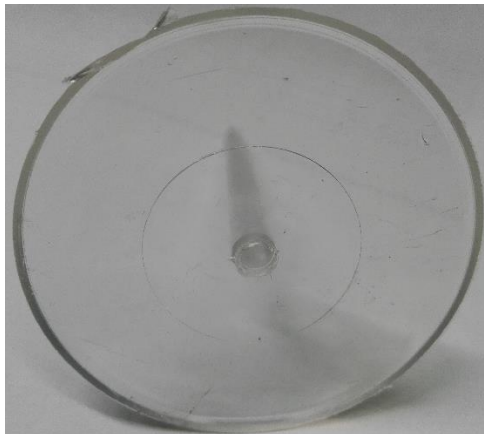
Pro měření krystalinity vzorku byl použit rentgenový difraktometr X'Pert PRO od firmy PANalytical (Holandsko) s rentgenkou a Ni filtrem. Přístroj je vybaven pozičně citlivým detektorem X'Celerator. Vzorky byly v pevném stavu. Při měření byla využita Bragg – Brentanova konfigurace, napětí 40 kV a proud 30 mA. Měření probíhalo v rozsahu 2θ od 5° do 30° .

Naměřená data byla převedena do formátu ASC a následně převedena do programu Microsoft Office Excel do připravené aplikace usnadňující výpočet krystalického podílu v semikrystalickém vzorku. Aplikací byla odečtena plocha prostředí, ve kterém měření probíhalo (vzduch) a dále se RTG difrakční záznam rozdělil na oblast amorfni a krystalickou. Podíl amorfni fáze ve vzorku je plocha pod křivkou oddělující amorfni a krystalickou oblast. Podíl krystalické fáze se vypočítal jako rozdíl celkové plochy záznamu vzorku a plochy amorfni oblasti, kdy jednotkou jsou procenta.



Obr. 48. Příklad RTG difrakčního záznamu – odlišení amorfni a krystalické fáze.

Krystalický podíl byl vyhodnocen pouze u vzorků se semikrystalickou strukturou, neboť u amorfních materiálů se krystalická fáze blíží k nule. Zkušební vzorek k vyhodnocení krystalinity lze vidět na Obr. 49.



Obr. 49. Zkušební vzorek.

Tab. 25. Krystalický podíl.

Vzorek	Krystalinita [%]	
	PA66	PP
1	20,24	40,23
2	16,25	42,91
3	20,20	42,50
4	18,45	37,90
5	17,46	37,90
6	16,01	39,26
7	16,89	39,63
8	20,41	43,86
9	19,91	40,80
10	19,99	41,68
\bar{x}	18,58	40,67
s	0,017	0,019

Krystalinita všech zkušebních vzorků polyamidu (PA66) vycházela průměrně 18,58 %, kdy nejvyšší krystalický podíl obsahoval vzorek č. 8. Naopak nejnižší krystalinitu měl zkušební vzorek č. 6. Zbylé zkušební vzorky byly průměrné s danými hodnotami.

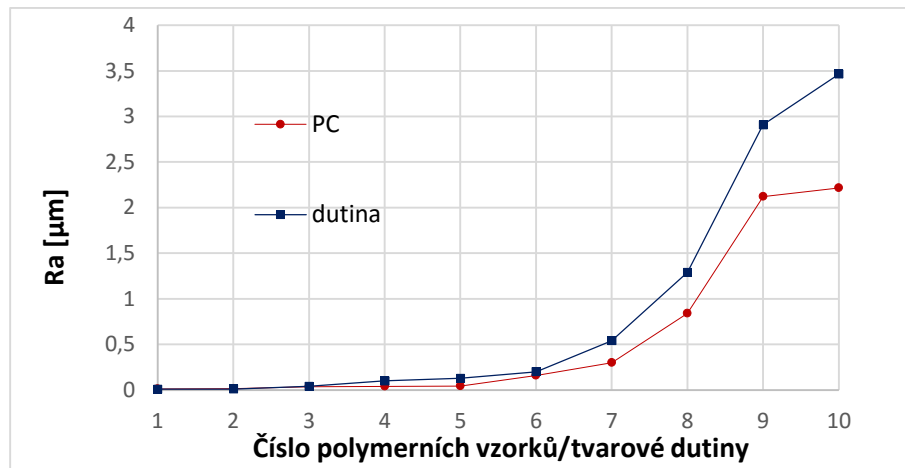
U druhého zkušebního materiálu polypropylenu (PP), dosahovala průměrná hodnota všech zkušebních vzorků 40,67 % krystalického podílu. Nejvyšší podíl krystalické fáze obsahoval vzorek č. 8. Naopak nejnižší obsah krystalické fáze měl zkušební vzorek č. 4 a č. 5 se stejnou krystalinitou 37,90 %. Zbylé zkušební vzorky byly ve svých hodnotách průměrné. Polypropylen vykazoval celkově vyšší hodnotu krystalinity než polyamid 66.

9.2 Hodnocení drsnosti povrchu R_a

Naměřená data drsnosti R_a ocelové vložky a polymerních vzorků (PC, PMMA, PA66, PP) byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 26. a následně graficky zobrazena.

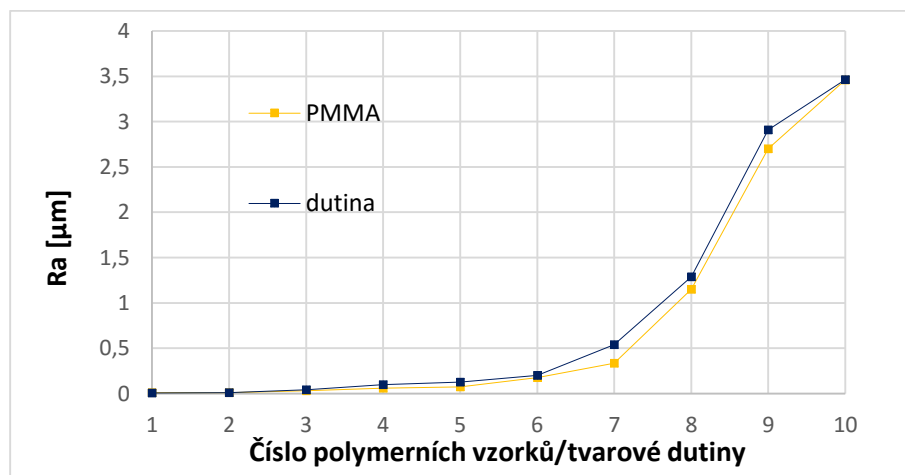
Tab. 26. Vyhodnocená data drsnosti R_a ocelové dutiny.

číslo dutiny/vzorku		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ocelová dutina	R_a [μm]	0,008	0,009	0,040	0,099	0,127	0,200	0,539	1,290	2,908	3,465
	Směr. od.	0,001	0,001	0,007	0,003	0,008	0,010	0,030	0,045	0,037	0,079
	Nej. typu A	0,001	0,001	0,007	0,003	0,009	0,011	0,031	0,047	0,039	0,083
PC vzorek	R_a [μm]	0,011	0,013	0,037	0,038	0,043	0,159	0,299	0,840	2,121	2,217
	Směr. od.	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,016	0,025	0,057	0,068	0,151
	Nej. typu A	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,016	0,027	0,060	0,072	0,159
PMMA vzorek	R_a [μm]	0,011	0,010	0,032	0,058	0,074	0,175	0,335	1,150	2,701	3,459
	Směr. od.	0,002	0,002	0,006	0,004	0,007	0,015	0,040	0,025	0,064	0,049
	Nej. typu A	0,002	0,002	0,006	0,004	0,007	0,016	0,042	0,027	0,067	0,052
PA66 vzorek	R_a [μm]	0,031	0,028	0,051	0,092	0,118	0,226	0,485	1,180	2,727	3,005
	Směr. od.	0,003	0,004	0,006	0,007	0,005	0,018	0,041	0,046	0,043	0,138
	Nej. typu A	0,003	0,004	0,006	0,008	0,005	0,019	0,044	0,049	0,046	0,145
PP vzorek	R_a [μm]	0,090	0,098	0,099	0,112	0,127	0,252	0,502	1,228	3,072	3,233
	Směr. od.	0,006	0,010	0,007	0,013	0,005	0,017	0,042	0,025	0,125	0,104
	Nej. typu A	0,006	0,011	0,007	0,014	0,005	0,018	0,045	0,026	0,131	0,110



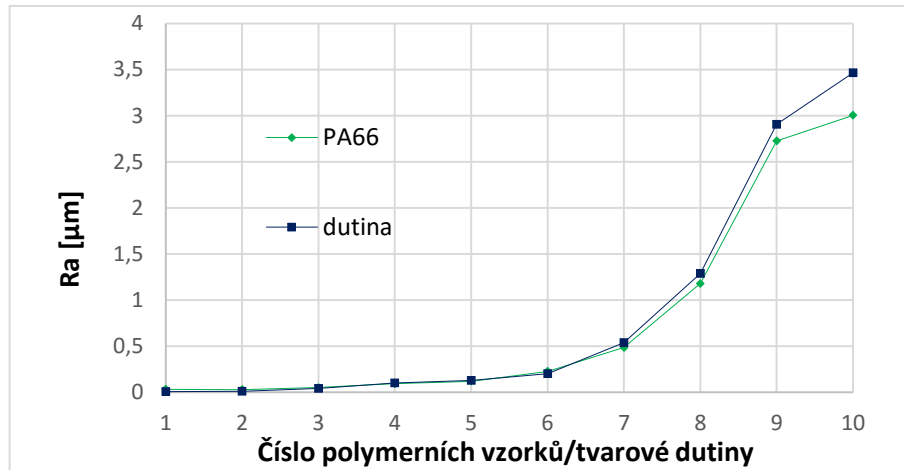
Obr. 50. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PC na tvarové dutině

V porovnání drsnosti Ra vzorků z PC a tvarových dutin mají polymerní vzorky z větší části nižší hodnoty drsnosti Ra , konkrétně u tvarové dutiny č. 9 a č. 10 jsou hodnoty drsnosti výrazně nižší. Lze vidět, že s rostoucí hodnotou drsnosti Ra tvarové dutiny roste také drsnost polymerních vzorků, které byly vstříkovány na příslušných tvarových dutinách. Při podrobném zkoumání lze pozorovat, že hodnota drsnosti Ra se velmi podobá při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 2.



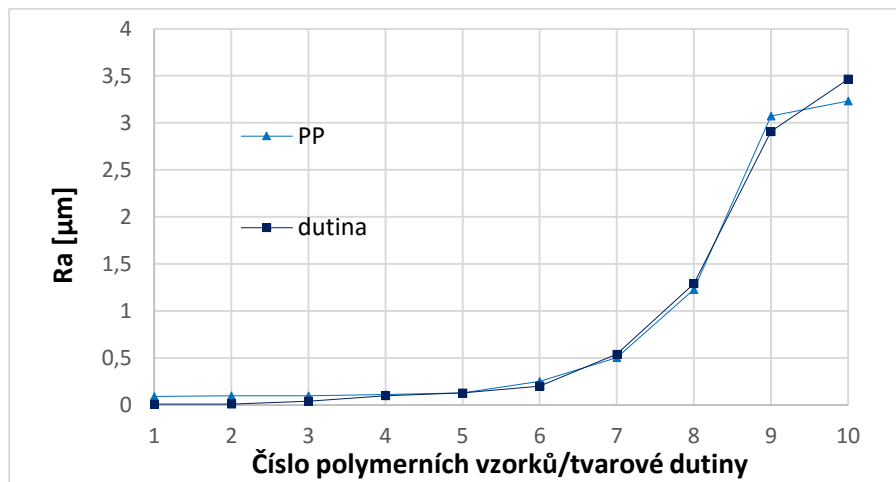
Obr. 51. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PMMA na tvarové dutině.

Průběh křivky parametru drsnosti Ra u polymerního vzorku z PMMA se velmi podobá průběhu křivky drsnosti tvarové dutiny. PMMA má z větší části nižší hodnotu parametru drsnosti Ra v porovnání s parametrem drsnosti tvarové dutiny. Výjimkou drsnosti Ra je tvarová dutina č. 1, 2 a 10, kdy vzorek z PMMA má vyšší parametr drsnosti Ra v porovnání s parametrem drsnosti Ra tvarové dutiny. I v případě použití polymerního materiálu PMMA lze vidět velkou podobnost drsnosti Ra polymerních vzorků při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 2. To lze pozorovat nejen z grafu, ale také z vyhodnocených dat v Tab. 26.



Obr. 52. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PA66 na tvarové dutině.

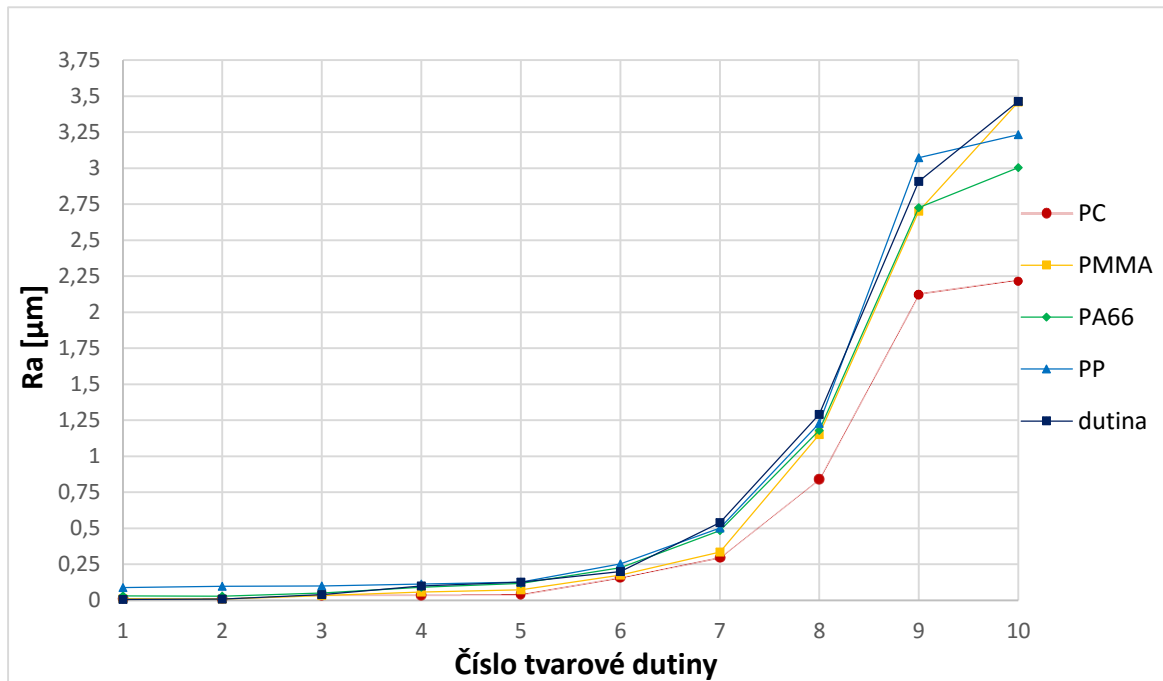
Parametry drsnosti polymerního materiálu PA66 jsou téměř shodné s drsností tvarové dutiny, pouze u vzorků č. 1, 2 a 3 je parametr drsnosti Ra vzorku vyšší v porovnání s tvarovou dutinou. U vzorku č. 10 jsou parametry drsnosti Ra nižší. V případě použití tohoto polymerního materiálu bylo naměřeno velmi podobných hodnot drsností povrchu Ra polymerních vzorků při použití tvarové dutiny č. 1 až č. 3, což lze vidět nejen z grafického vyjádření, ale také z vyhodnocených dat v Tab. 26.



Obr. 53. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PP na tvarové dutině.

Polymerní materiál PP má ve většině případu vyšší parametry drsnosti Ra v porovnání s tvarovou dutinou, jen u tvarové dutiny č. 7, 8 a 10 jsou nižší. U tvarové dutiny č. 5 jsou si parametry drsnosti podobné. U materiálu PP lze vidět velkou podobnost drsností Ra polymerních vzorků při použití tvarové dutiny č. 1 až č. 5. Tuto skutečnost si lze opět ověřit v tabulce vyhodnocených hodnot (Tab. 26).

9.2.1 Porovnání jednotlivých polymerních materiálů

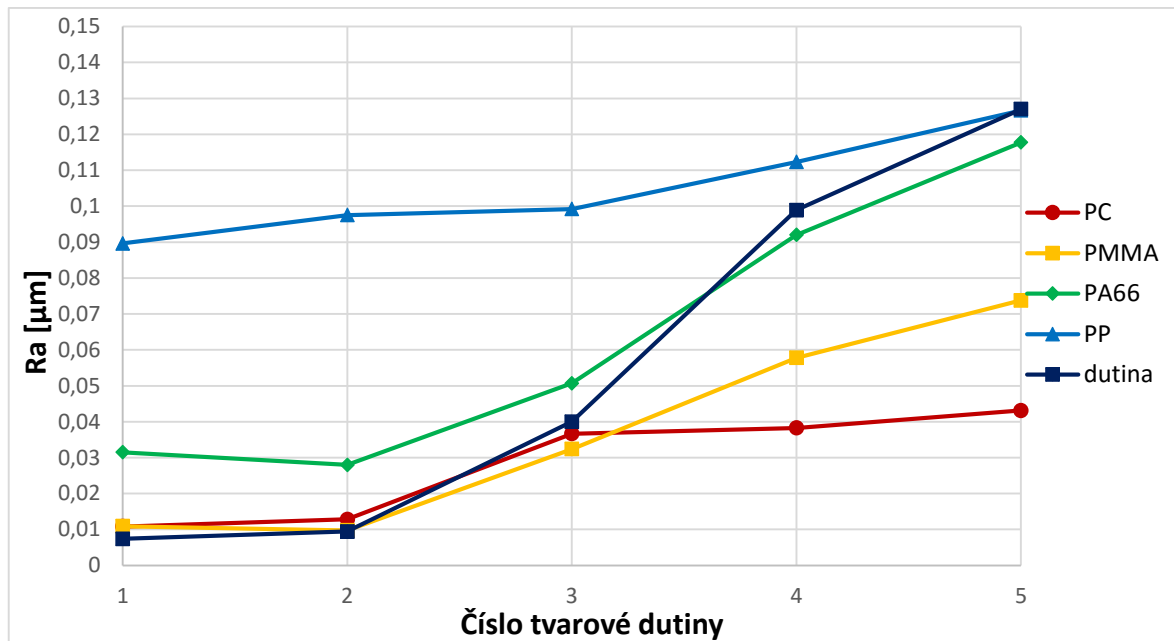


Obr. 54. Závislost drsnosti R_a polymerních vzorků na tvarové dutině.

U materiálu PMMA, PC lze vidět, že hodnota drsnosti R_a je velmi podobná při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 2. U těchto materiálů je tak nutné zvážit přínos dokončovací operace leštění, která výrobu tvarové dutiny č. 1 prodlužuje a zvyšuje zároveň cenu vstříkovací formy.

Hodnoty naměřených drsností R_a semikrystalického materiálu PA66 indikují, že tento materiál není schopen tak jako amorfny materiály kopírovat vysoce kvalitní povrch tvarové dutiny. I u tohoto materiálu lze vidět podobnost drsností R_a při použití dutiny č. 1 až č. 3. Je proto nezbytné řešit požadovanou drsnost polymerního výrobku, neboť cena i doba výroby tvarové dutiny č. 3 je v porovnání s leštěnou tvarovou dutinou č. 1 několikanásobně vyšší.

Materiál PP vykazuje zcela zjevně nejhorších výsledků ze všech použitých materiálů. Hodnota krystalinity pro vyrobené vzorky činila 40,67% což je dvojnásobek hodnoty naměřené u PA66. Vyšší hodnota krystalické fáze tak měla zřejmě za následek dosažení nejvyšších hodnot drsnosti povrchu R_a polymerních výrobků. V případě tohoto materiálu jsou si velmi podobny z pohledu drsnosti R_a vzorky vyrobené na dutině 1 až 5. Je tedy nutné zvážit ekonomický přínos lapování a leštění tvarových dutin v případě použití tohoto materiálu, neboť není schopen kopírovat kvalitní povrch a dosahuje pouze kvalitu o něco lepší než broušená tvarová dutina.



Obr. 55. Závislost drsnosti R_a polymerních vzorků na tvarové dutině.

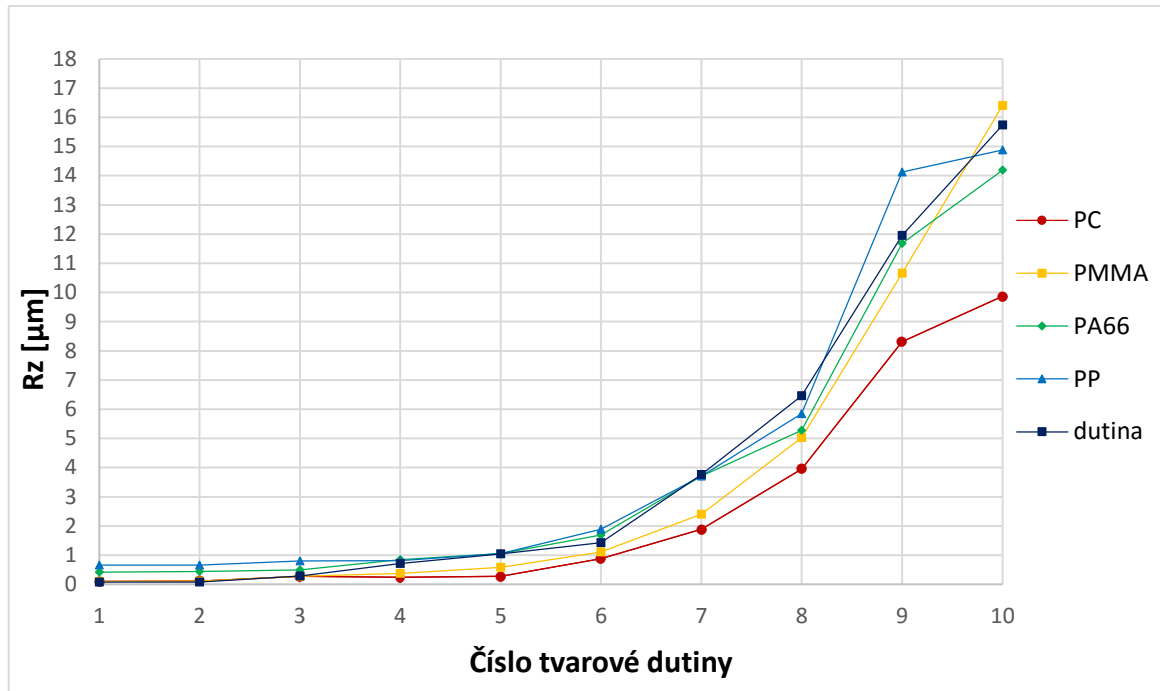
U tvarových dutin č.1 a č. 2 mají všechny polymerní materiály vyšší drsnost v porovnání s tvarovou dutinou, z čehož lze usoudit, že povrch tvarových dutin se již celý neokopíruje na vzorky. Polymerní tavenina tedy nevyplňuje a není schopna dosáhnout vysoké kvality povrchu tvarové dutiny. Tento fakt může být zapříčiněn ochlazením polymerní taveniny, který vede k poklesu viskozity, což může být eliminováno použitím teploty.

9.3 Hodnocení drsnosti povrchu R_z

Naměřená data drsnosti R_z ocelové tvarové dutiny a polymerních vzorků, byla vyhodnocena a zaznamenána do Tab. 27 a graficky zobrazena na Obr. 56. a 57.

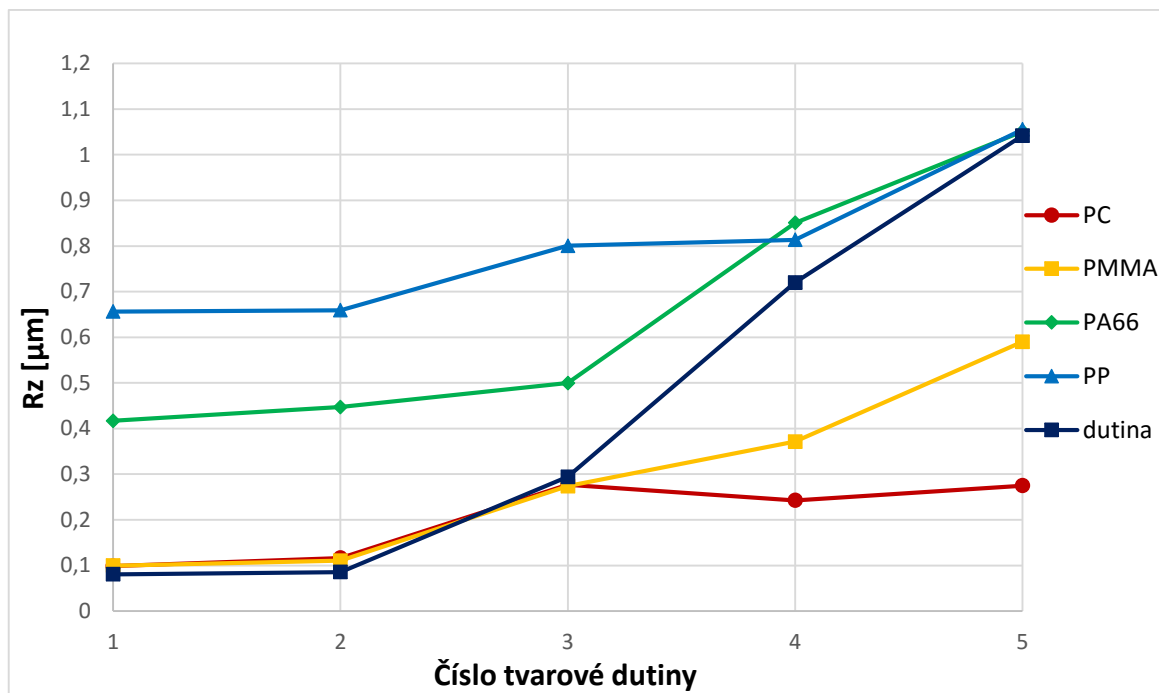
Tab. 27. Vyhodnocená data drsnosti R_z ocelové dutiny.

číslo dutiny/vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ocelová dutina	R_z [μm]	0,081	0,085	0,294	0,720	1,042	1,427	3,761	6,458	11,956	15,734
	Směr. od.	0,016	0,010	0,057	0,050	0,143	0,100	0,316	0,343	0,153	0,517
	Nej. typu A	0,017	0,011	0,060	0,053	0,151	0,106	0,333	0,362	0,162	0,545
PC vzorek	R_z [μm]	0,098	0,116	0,277	0,243	0,275	0,880	1,891	3,948	8,316	9,874
	Směr. od.	0,031	0,047	0,060	0,034	0,026	0,105	0,442	0,173	0,227	0,556
	Nej. typu A	0,033	0,050	0,063	0,036	0,027	0,110	0,465	0,183	0,240	0,586
PMMA vzorek	R_z [μm]	0,100	0,110	0,274	0,371	0,590	1,112	2,400	5,023	10,665	16,409
	Směr. od.	0,024	0,030	0,074	0,037	0,119	0,135	0,279	0,294	0,247	0,898
	Nej. typu A	0,026	0,031	0,079	0,039	0,125	0,142	0,294	0,310	0,260	0,947
PA66 vzorek	R_z [μm]	0,417	0,447	0,500	0,851	1,051	1,693	3,708	5,280	11,678	14,190
	Směr. od.	0,071	0,217	0,043	0,077	0,046	0,259	0,458	0,457	0,555	0,037
	Nej. typu A	0,075	0,229	0,045	0,081	0,048	0,273	0,482	0,482	0,585	0,038
PP vzorek	R_z [μm]	0,657	0,659	0,800	0,814	1,056	1,887	3,714	5,848	14,129	14,877
	Směr. od.	0,052	0,065	0,089	0,162	0,107	0,321	0,331	0,187	1,442	0,430
	Nej. typu A	0,055	0,068	0,094	0,171	0,112	0,339	0,349	0,197	1,520	0,453



Obr. 56. Závislost drsnosti R_z polymerních vzorků na tvarové dutině.

Z následujícího grafu závislosti drsnosti R_z polymerních vzorků na ocelové tvarové dutině vyplývá, že čím je vyšší drsnost tvarové dutiny, tím je vyšší hodnota drsnosti všech polymerních vzorků. Z daných polymerních vzorků má ve většině případů nejvyšší parametry drsnosti R_z semikrystalický materiál PP při porovnání polymerních materiálů a náležité tvarové dutiny. Naproti tomu PC má ve většině případů nejnižší parametry drsnosti R_z ze všech polymerních vzorků. Amorfni materiály mají ve většině případů nejnižší parametry drsnosti v porovnání se semikrystalickými materiály.



Obr. 57. Závislost drsnosti R_z polymerních vzorků na tvarové dutině.

Z následujícího grafu lze vyčíst, že hodnoty drsnosti R_z jsou pro vzorek č. 1 a č. 2 téměř totožné. Opět lze tedy říci, že leštění, které bylo na vzorku č. 1 provedeno, je z ekonomického hlediska de facto zbytečné a jen by se odráželo na výrobní ceně tvarové dutiny. Průběh křivek následujícího grafu parametru drsnosti R_z zobrazuje, že jak námi zvolené semikrystalické materiály (PA66 a PP) tak i amorfnní materiály (PC a PMMA) vychází obdobně jako u parametrů drsnosti R_a .

Při zhodnocování výsledků pro tento daný parametr, se opět jako nejméně vhodný materiál z hlediska dosažení co nejmenšího parametru drsnosti R_z jeví semikrystalický materiál PP, s nejvyšší hodnotou krystalické fáze, následovaný PA66 s takřka poloviční hodnotou krystalické fáze. Nejlepších drsností povrchu R_a a R_z bylo dosaženo u amorfnních PC a PMMA.

Důsledkem tohoto výsledku může s největší pravděpodobností být hodnota krystalinity daného polymeru, ta byla již dříve zmíněných 40,67 % oproti 18,28 % krystalinity materiálu PA66.

Dle dosažených hodnot drsnosti R_a pro semikrystalický materiál PP při použití tvarové dutiny č. 1 a č. 5 je opět na zvažování vynechání některých dokončovacích operací z důvodu minimálního snížení drsnosti v porovnání jak finanční tak i časové náročnosti operace.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl výzkum vlivu nadmolekulární struktury na jakost povrchu polymerních výrobků.

Teoretická část diplomové práce je věnována teorii o polymerech, jejich rozdělení a nadmolekulární struktuře polymerů. Dále popisuje technologii vstřikování polymerních vzorků, včetně technologických parametrů vstřikování a také vstřikovací stroj a jeho jednotlivé nejdůležitější části. Teorie také obsahuje souhrn z oblasti konvenčních dokončovacích operací, které byly hlavně použity při výrobě tvarových dutin. Poslední kapitola teoretické části se věnuje integritě povrchu, kde jsou vysvětleny pojmy jakosti povrchu a také se věnuje metodám dotykového a bezdotykového měření jakosti povrchu.

V praktické části je uveden návrh a popis výroby ocelových tvarových dutin vstřikovací formy. Pro výrobu dutin byla zvolena nástrojová ocel s označením EN 1.2343, která je jedna z nejčastěji používaných materiálů při výrobě forem, především kvůli jejím dobrým vlastnostem. Jednotlivé tvarové dutiny byly vyrobeny odlišnými dokončovacími operacemi při různých technologických podmínkách tak, aby dutina č. 1 měla nejlepší jakost povrchu a postupně se zhoršovala drsnost ploch až k dutině č. 10, která měla nejhorší jakost. Pro vstřikování se použily polymerní materiály PMMA a PC, s amorfní strukturou a také materiály PA66 a PP se semikrystalickou strukturou. Drsnost povrchu výstřiku a tvarových dutin se měřila na profiloměru Taylor Hobson. Naměřená data byla zaznamenána, statisticky vyhodnocena a vložena do grafů.

U semikrystalických polymerních vzorků byl měřen podíl krystalické fáze z důvodu zjištění vlivu krystalinity na jakost povrchu polymerního výrobku. Byl použit rentgenový difraktometr X'Pert PRO od firmy PANalytical (Holandsko), pomocí kterého se vyhodnocoval krystalický podíl polymerních vzorků PA66 a PP. Naměřená data byla převedena do formátu ASC a následně zpracována v programu Microsoft Office Excel pomocí aplikace usnadňující výpočet krystalického podílu v semikrystalickém vzorku. Aplikací byla odečtena plocha prostředí, ve kterém měření probíhalo (vzduch) a dále se RTG difrakční záznam rozdělil na oblast amorfní a krystalickou. Podíl amorfní fáze ve vzorku je plocha pod křivkou oddělující amorfní a krystalickou oblast. Podíl krystalické fáze se vypočítal jako rozdíl celkové plochy záznamu vzorku a plochy amorfní oblasti, kdy jednotkou jsou procenta.

Krystalinita všech zkušebních vzorků polyamidu (PA66) vycházela průměrně 18,58%. U druhého zkušebního materiálu polypropylenu (PP), vycházela průměrná hodnota

všech zkušebních vzorků 40,67 % krystalického podílu. Polypropylen vykazoval celkově dvakrát vyšší hodnotu krystalinity v porovnání s PA66.

Z vyhodnocení drsnosti R_a polymerních vzorků na ocelové tvarové dutině vyplývá, že čím je vyšší hodnota parametru drsnosti R_a tvarové dutiny, tím je vyšší hodnota drsnosti všech polymerních materiálů. Z daných polymerních vzorků byla nejhorší jakost povrchu naměřena u PP. Semikrystalický PP vykazuje nejhorší výsledky zřejmě kvůli vysokému procentu krystalinity, poté následoval PA66 a nejlépe byly vyhodnoceny amorfní materiály. Je tedy zcela zřejmé, že nadmolekulární struktura má vliv na drsnost povrchu vstřikovaných polymerních výrobků.

U drsnosti R_a pro materiál PMMA, PC můžeme sledovat, že je hodnota při použití tvarových dutin č. 1 a č. 2 velmi podobná. Při použití těchto materiálů je tedy vhodné zvážit použití leštění, které nám bez viditelného snížení parametrů drsnosti R_a zvyšuje náklady na výrobu daných vložek. Hodnoty naměřených drsností R_a semikrystalického materiálu PA66 indikují, že tento materiál není schopen tak jako amorfní materiály kopírovat vysoce kvalitní povrch tvarové dutiny. U tvarových dutin č. 1 a č. 2 mají jak semikrystalické, tak i amorfní vzorky vyšší drsnost v porovnání s tvarovou dutinou. Materiál PP vykazoval téměř stejné hodnoty parametru R_a jak u broušené tak i leštěné dutiny, z tohoto důvodu by bylo vhodné opět zvážit přínos aplikované dokončovací operace, neboť doba výroby se může lišit několiknásobně v závislosti na použité technologii.

Průběh křivek drsností R_z se velmi podobá průběhu křivek drsnosti R_a s pouhým rozdílem, že bylo dosaženo vyšších hodnot. Příčinou takto obdobných výsledků je vzájemná provázanost obou parametrů.

Hranice vysokých hodnot jakostí povrchu R_a a R_z tvarových dutin, při které by se přestal kopírovat povrch tvarových dutin na polymerní vzorky, nebyla nalezena. Pro objevení této hranice by tedy bylo zřejmě nutné zhoršit jakost povrchu dutin a zvýšit tak hodnotu drsnosti R_a i R_z na vyšší hodnotu, než byla v tomto experimentu dosažena.

Při dalších experimentech pro zajištění více kontrolovaného prostředí při výrobě polymerních vzorků a pro širší paletu zpracovatelných materiálů bude zapotřebí upravit stávající formu tak, aby bylo možné zajistit temperaci tvarových dutin. Tato úprava umožní vyrábět vzorky vyšší kvality a celý výzkum tak bude mít větší vypovídající hodnotu a opakovatelnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. *Aplikovaná reologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-7318-039-1.
- [2] MAKROMOLEKULÁRNÍ LÁTKY. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z WWW: <http://ucitelchemie.upol.cz/materialy/studijni_texty/vyukova_temata/plasty_text.pdf>
- [3] TECHNOLOGIE 2, Vstřikování plastů. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm>.
- [4] NEUHÄUSL, Emil. *Vstřikování plastických hmot*. Praha: SNTL, 1973. Knižnice dělníka v chemickém průmyslu.
- [5] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů*. 2. opr. vyd. Brno: Uniplast, 1999.
- [6] INTEGRITA POVRCHU. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf>
- [7] ŠTĚPEK, J., ZELINGER, J., KUTA, A., *Technologie zpracování plastů*. 1st ed. Praha: SNTL, 1989. 638s
- [8] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1995. ISBN 80-7080-241-3.
- [9] RYBNÍKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. Řada chemické literatury.
- [10] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 9788070807880.
- [11] NAUKA O MATERIÁLU II. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z WWW: <<http://docplayer.cz/6844437-Nauka-o-materialu-ii.html>>
- [12] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 4: výroba a zpracování ocelí a litin*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 9788001056868.
- [13] LIŠKA, J.: *Hodnocení průběhu opotřebení progresivních brousících kotoučů: Diplomová práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická.
- [14] POLYMERY. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z WWW: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/polymery.pdf>>

- [15] PATA, V., *Přednáškové materiály předmětu Jakost a metrologie*
- [16] MĚŘENÍ TEXTURY. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z
WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf>
- [17] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009.
ISBN 9788073330729
- [18] MRLÍK, J.: *Výzkum vlivu jakosti povrchu formy na jakost polymerních výrobků. Diplomová práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, 2014.
- [19] VLASTNOSTI PLASTŮ. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z
WWW: <<http://vseochemii.blogspot.cz/2008/10/vlastnosti-plast.html>>
- [20] POLÍVKA, P.: *Tváření elastomery. Bakalářská práce*. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [21] ČOP, J.: *Výzkum broušení dílů forem kotoučem z diamantu a kubického nitridu bóru*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, 2012.
- [22] CHOVANCOVÁ, L.: *Snímání a hodnocení jakosti otisků povrchů bezkontaktním způsobem, včetně jejich replikací*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, 2014.
- [23] NÁSTROJOVÁ OCEL. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z
WWW: <http://www.jkz.cz/taxonomy/term/1/all>
- [24] POLYMERY. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z
WWW: <<https://epubli.publi.cz/?book=180-polymery>>
- [25] DOKONČOVACÍ METODY. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z
WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1385>>
- [26] METROLOGIE. [online]. [cit2016-2-20]. Dostupné z
WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanky-v-nomenklature.html?code=680>>
- [27] TOMIS, František. *Gumárenská a plastikářská technologie: zpracovatelské procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1987.

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
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
t _{s1}	strojní doba na uzavření formy
t _{s2}	strojní doba na uzavření formy
t _{s3}	strojní doba na otevření formy
t _v	doba plnění dutiny formy
t _d	doba dotlaku
t _{pl}	doba plastikace
t _{ch}	doba chlazení
p _z	zbytkový tlak

v_c	řezná rychlost
d	průměr obrobku
n	otáčky
a_p	hloubka řezu
x_i	jednotlivé hodnoty
\bar{x}	odhad aritmetického průměru
s	výběrová směrodatná odchylka
u_A	nejistota typu A
PP	polypropylen
PC	polykarbonát

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělení polymerů. [10]</i>	12
<i>Obr. 2. Příklady použití termoplastů. [24]</i>	15
<i>Obr. 3. Struktura amorfního termoplastu. [11]</i>	16
<i>Obr. 4. Struktura semikrystalického</i>	16
<i>Obr. 5. Struktura reaktoplastu. [11]</i>	17
<i>Obr. 6. Příklady použití reaktoplastu. [24]</i>	18
<i>Obr. 7. Struktura elastomeru. [3]</i>	18
<i>Obr. 8. Příklady použití elastomeru. [24]</i>	19
<i>Obr. 9. Nadmolekulární struktura amorfních plastů. [27]</i>	20
<i>Obr. 10. Příklady použití amorfních plastů. [24]</i>	20
<i>Obr. 11. Nadmolekulární struktura</i>	21
<i>Obr. 12. Příklady použití semikrystalických plastů. [24]</i>	21
<i>Obr. 13. Časové rozložení vstřikovacího cyklu. [27]</i>	22
<i>Obr. 14. Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování</i>	23
<i>Obr. 15. Řez vstřikovací jednotkou. [3]</i>	26
<i>Obr. 16. Vstřikovací jednotka. [4]</i>	27
<i>Obr. 17. Uzavírací jednotka. [3]</i>	28
<i>Obr. 18. Princip jemného soustružení. [25]</i>	30
<i>Obr. 19. Princip jemného frézování. [25]</i>	31
<i>Obr. 20. Princip rovinného broušení čelem a obvodem kotouče. [25]</i>	32
<i>Obr. 21. Princip honování. [25]</i>	33
<i>Obr. 22. Princip superfinišování. [25]</i>	33
<i>Obr. 23. Princip lapování. [25]</i>	34
<i>Obr. 24. Charakter textury povrchu. [21]</i>	37
<i>Obr. 25. Drsnost povrchu. [26]</i>	38
<i>Obr. 26. Vyjádření hodnoty R_a. [15]</i>	39
<i>Obr. 27. Vyjádření hodnoty R_z. [15]</i>	39
<i>Obr. 28. Vyjádření hodnoty R_t. [15]</i>	40
<i>Obr. 29. Křivka materiálového podílu drsnosti povrchu. [26]</i>	40
<i>Obr. 30. Povrch s krátkou vlnovou délkou nerovnosti</i>	42
<i>Obr. 31. Indukční snímač. [15]</i>	43
<i>Obr. 32. Měřicí smyčka. [15]</i>	44

<i>Obr. 33. Diamantový měřicí hrot. [15]</i>	44
<i>Obr. 34. CLA snímač. [15]</i>	46
<i>Obr. 35. Laserový snímač. [15]</i>	47
<i>Obr. 36. Vliv snížení vibrací pomocí</i>	48
<i>Obr. 37. Mikroskop Leica DMI3000 M. [22]</i>	48
<i>Obr. 38. AFM schéma metod. [26]</i>	49
<i>Obr. 39. AFM bezkontaktní režim. [26]</i>	49
<i>Obr. 40. Vstřikovací stroj Arburg Allround 470H.</i>	52
<i>Obr. 41. Vstřikovací forma.</i>	54
<i>Obr. 42. Vstřikovací forma tvárníku a tvárnice.</i>	54
<i>Obr. 43. Sušička Arburg</i>	55
<i>Obr. 44. Měření drsnosti pomocí profiloměru</i>	56
<i>Obr. 45. Rentgenový difraktometr X'Pert PRO</i>	58
<i>Obr. 46. Výkres tvarové dutiny vstřikovací formy.</i>	66
<i>Obr. 47. Ocelová tvarová dutina.</i>	67
<i>Obr. 48. Příklad RTG difrakčního záznamu – odlišení amorfni a krystalické fáze.</i> ...72	
<i>Obr. 49. Zkušební vzorek.</i>	73
<i>Obr. 50. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PC na tvarové dutině</i>	75
<i>Obr. 51. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PMMA na tvarové dutině.</i>	75
<i>Obr. 52. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PA66 na tvarové dutině.</i>	76
<i>Obr. 53. Závislost drsnosti Ra polymerního vzorku PP na tvarové dutině.</i>	76
<i>Obr. 54. Závislost drsnosti Ra polymerních vzorků na tvarové dutině.</i>	77
<i>Obr. 55. Závislost drsnosti Ra polymerních vzorků na tvarové dutině.</i>	78
<i>Obr. 56. Závislost drsnosti Rz polymerních vzorků na tvarové dutině.</i>	79
<i>Obr. 57. Závislost drsnosti Rz polymerních vzorků na tvarové dutině.</i>	80

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu dokončovacích operací.</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2. Základní vlastnosti vstřikovacího stroje.</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 3. Technologické podmínky vstřikování.</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4. Základní vlastnosti sušičky.</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 5. Technické parametry profiloměru Taylor Hobson.</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6. Technické parametry Rentgenového difraktometru X'Pert PRO, PANalytical.</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7. Chemické složení oceli EN 1.2343.</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 8. Tepelné zpracování oceli EN 1.2343.</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 9. Fyzikální vlastnosti oceli EN 1.2343.</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 10. Vlastnosti PC CALIBRE™ 303EP-22.</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 11. Vlastnosti PMMA PEXIGLAS 8N.</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 12. Vlastnosti PP SYNTEGUM 1020 AFV/HMFL.</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 13. Vlastnosti PA66 TECHNYL A 205F.</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 14. Technologické podmínky dokončovacích operací.</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 15. Technologické podmínky dokončovacích operací.</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 16. Technologické podmínky dokončovacích operací.</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 17. Technologické podmínky dokončovacích operací.</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 18. Technologické podmínky dokončovacích operací.</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 19. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením.</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 20. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením.</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 21. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením.</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 22. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po.</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 23. Technologické podmínky použité při dokončování funkční plochy soustružením po.</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 24. Vyhodnocená data drsnosti Ra a Rz ocelové dutiny.</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 25. Krystalický podíl.</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 26. Vyhodnocená data drsnosti Ra ocelové dutiny.</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 27. Vyhodnocená data drsnosti Rz ocelové dutiny.</i>	<i>78</i>